

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

***МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ И ЗАДАНИЯ
ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ
И РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИХ РАБОТ***

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Специальность

21.05.03 Технология геологической разведки

Екатеринбург

СОДЕРЖАНИЕ

Часть 1. ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	5
1.1. Цель преподавателя дисциплины.....	5
1.2. Задачи изучения дисциплины.....	5
1.3. Перечень дисциплин с указанием разделов (тем), усвоение которых необходимо для изучения данной дисциплины	5
1.4. Содержание дисциплины	6
 Часть 2. ДИЭЛЕКТРИКИ.....	12
2.1. Основные сведения о пробое диэлектриков	12
2.2. Пробой газообразных диэлектриков.....	13
2.3. Пробой твердых диэлектриков.....	18
2.4. Практическая работа № 1. Определение электрической прочности твердых и газообразных диэлектриков. Цель работы	21
2.5. Объект исследования.....	21
2.6. Средства измерения.....	21
2.7. Рабочее задание.....	21
2.8. Методические указания по выполнению рабочего задания	22
2.9. Контрольные вопросы	27
 Часть 3. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	28
3.1. Основные характеристики магнитных веществ	28
3.2. Физическая природа магнетизма	29
3.3 Классификация веществ по магнитным свойствам.....	32
3.4. Строение ферромагнетиков	33
3.5. Явления магнитной анизотропии и магнитострикции.....	36
3.6. Намагничивание ферромагнетика.....	38
3.7. Свойства ферромагнитных материалов в квазипостоянных магнитных полях.....	41
3.8. Дифференциальная магнитная проницаемость	44
3.9. Свойства ферромагнетиков в переменных магнитных полях.....	46
3.10. Индукционный метод определения параметров магнитных материалов с использованием осциллографа.....	53

3.11. Объект исследования.....	58
3.12. Средства измерения и вспомогательные средства исследования	59
3.13. Подготовка осциллографа к работе	59
3.14. Калибровка осциллографа и определение масштабов по напряженности и индукции магнитного поля	60
3.15. Подготовка звукового генератора к работе	61
3.16. Практическая работа №1. «Исследование свойств магнитных материалов в магнитных полях постоянной частоты». Цель работы	62
3.17. Рабочее задание.....	62
3.18. Методические рекомендации к выполнению рабочего задания	63
3.19. Содержание отчета	66
3.20. Вопросы для самоконтроля.....	67
3.21. Практическая работа №2. «Исследование свойств магнитных материалов в магнитных полях переменной частоты». Цель работы.....	67
3.22. Рабочее задание.....	68
3.23. Методические указания к выполнению рабочего задания	68
3.24. Содержание отчета	70
3.25. Вопросы для самоконтроля.....	70

Часть 4. РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1.

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИЗОЛЯЦИИ ДВУХЖИЛЬНОГО КАБЕЛЯ»	72
4.1. Требование к оформлению контрольной работы.....	72
4.2. Задание на контрольную работу	72
4.3. Методические указания к выполнению контрольной работы	74
4.4. Экзаменационные вопросы.....	78
Учебно-методические материалы	80

Часть 1

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

1.1. Цель преподавателя дисциплины

В дисциплине «Электротехническое и конструкционное материаловедение» излагается широкий круг вопросов, связанных со свойствами различных материалов по отношению к электрическому и магнитному полям. Излагаются свойства разновидностей электротехнических материалов, применяемых в технике.

Целью преподавания дисциплины является изложение основных сведений о процессах, происходящих в электротехнических материалах под воздействием электрического и магнитного полей, ознакомление с основными характеристиками и параметрами, посредством которых оцениваются свойства материалов к этим полям, методами их практического определения, ознакомление с основными видами электротехнических материалов, областями и способами их применения.

Дисциплина «Электротехническое и конструкционное материаловедение» является одним из основных предметов, необходимых для последующего успешного освоения специальных дисциплин, изучаемых студентами направления подготовки бакалавров «Электроэнергетика и электротехника».

1.2. Задачи изучения дисциплины

В результате изучения дисциплины «Электротехническое и конструкционное материаловедение» студенты должны иметь ясное представление о процессах, происходящих в электротехнических материалах при воздействии на них электрического и магнитных полей, знать основные характеристики и параметры материалов, научиться определять их экспериментально, усвоить требования, которым должны удовлетворять материалы при использовании в устройствах, предназначенных для работы в условиях горной промышленности, уметь производить выбор конкретных видов электротехнических материалов.

1.3. Перечень дисциплин с указанием разделов (тем), усвоение которых необходимо для изучения данной дисциплины

Успешное усвоение дисциплины «Электротехническое и конструкционное материаловедение» базируется на знаниях, полученных студентами при изучении физики (разделы: физика твёрдого тела, электричество, магнетизм),

химии, теоретических основ электротехники (разделы: электрические цепи постоянного и переменного тока, магнитные цепи), электрических измерений (разделы: основы метрологии, методы измерения электрических величин).

1.4. Содержание дисциплины

1.4.1. Введение

Краткий исторический обзор развития производства и использования электротехнических материалов. Значение электротехнических материалов в развитии и совершенствовании современного электромашиностроения.

Роль русских и советских учёных в создании и совершенствовании современных электротехнических материалов.

Предмет дисциплины «Электротехническое и конструкционное материаловедение». Классификация электротехнических материалов.

Вопросы для самопроверки

1. Какое значение имеют электротехнические материалы в развитии электромашиностроения?
2. Перечислите основные классы электротехнических материалов по свойствам, которыми обладают по отношению к электромагнитному полю.
3. Каковы перспективы развития производства электротехнических материалов?

1.4.2. Диэлектрики

Понятие о диэлектриках. Поляризация диэлектриков и основные виды поляризации.

Классификация диэлектриков. Понятие о диэлектрической проницаемости, абсолютная и относительная диэлектрические проницаемости. Зависимость величины диэлектрической проницаемости от внешних факторов.

Понятие о электропроводности диэлектриков. Удельные объёмное и поверхностное сопротивления и методика их определения.

Диэлектрические потери. Угол диэлектрических потерь. Схемы замещения диэлектриков для учёта диэлектрических потерь. Виды диэлектрических потерь.

Понятие о электрическом пробое диэлектриков. Пробивное напряжение и электрическая прочность. Пробой газообразных диэлектриков. Виды пробоев жидких и твёрдых диэлектриков.

Физико-механические свойства диэлектриков. Основные механические свойства диэлектриков. Нагревостойкость. Классы нагревостойкости. Температура воспламенения и температура вспышки. Морозостойкость и

тропикостойкость. Гигроскопичность и влагопроницаемость. Химические и радиационные свойства.

Вопросы для самопроверки

1. Какие вещества называются диэлектриками?
2. По каким признакам классифицируются диэлектрики?
3. Какой процесс называется поляризацией диэлектриков?
4. Как происходит электронная поляризация?
5. Как зависит диэлектрическая проницаемость от температуры и частоты электрического поля при электронной поляризации?
6. Как происходит ионная поляризация, и в каких веществах она наблюдается?
7. Как происходит дипольная поляризация?
8. Как зависит величина диэлектрической проницаемости от температуры и частоты электрического поля?
9. Как происходит ионно-релаксационная, электронно-релаксационная и миграционная (структурная) поляризации?
10. Как осуществляется спонтанная поляризация и для каких диэлектриков она характерна?
11. На какие группы подразделяются диэлектрики в соответствии с видами поляризации, которыми они обладают?
12. Как зависит диэлектрическая проницаемость газообразных диэлектриков от давления и температуры, величины напряжённости и частоты внешнего электрического поля?
13. Как зависит диэлектрическая проницаемость жидких диэлектриков от температуры, величины напряженности и частоты электрического поля?
14. Как зависит диэлектрическая проницаемость твёрдых диэлектриков от температуры, величины напряженности и частоты электрического поля?
15. Как определяется диэлектрическая проницаемость сложных диэлектриков?
16. Назовите причины возникновения электрического тока в диэлектрике под воздействием внешнего электрического поля.
17. Что такое объёмное и поверхностное удельные сопротивления и как они определяются?
18. Как зависит электропроводность газообразных диэлектриков от напряжения и почему?
19. Чем обуславливается электропроводность твёрдых диэлектриков и как она зависит от температуры и напряжённости электрического поля?
20. Чем обуславливается электропроводность жидких диэлектриков, как она зависит от температуры и напряжённости электрического поля?
21. Какие потери называются диэлектрическими?
22. Какой угол называется углом диэлектрических потерь?

23. Нарисуйте схемы замещения диэлектрика и соответствующие им векторные диаграммы для учёта величины диэлектрических потерь.
24. Установите связь между параметрами параллельной и последовательной схем замещения диэлектрика с потерями.
25. Какие виды диэлектрических потерь существуют в диэлектриках?
26. Какое явление называется электрическим пробоем диэлектриков?
27. Каким образом происходит пробой газообразных диэлектриков?
28. От каких факторов зависит электрическая прочность газообразных диэлектриков?
29. Объясните, как осуществляется электрический пробой жидких диэлектриков с высокой степенью очистки?
30. Как осуществляется электрический пробой технически чистых диэлектриков?
31. Назовите виды пробоев твёрдых диэлектриков.
32. Как происходит электрический, электротепловой и электрохимический пробой?
33. Что такое гигроскопичность диэлектрика и как она влияет на его электрические свойства?
34. Перечислите основные механические свойства диэлектриков.
35. Назовите основные параметры, с помощью которых характеризуются тепловые свойства диэлектриков.
36. Перечислите классы нагревостойкости диэлектриков и дайте краткую характеристику каждого из них.

1.4.3. Изоляционные материалы

Газообразные изоляционные материалы. Сравнительные характеристики основных газообразных изоляционных материалов и области их применения.

Жидкие изоляционные материалы. Нефтяные масла. Трансформаторное масло, его основные характеристики и свойства, старение и регенерация, методы испытаний и области применения.

Синтетические жидкие диэлектрики, сравнительные характеристики и области применения. Компаунды.

Полимерные изоляционные материалы. Волокнистые изоляционные материалы и слоистые пластики.

Слюда и материалы на основе слюды. Керамика и стекло.

Вопросы для самопроверки

1. Какие из газообразных изоляционных материалов нашли наибольшее практическое применение?
2. Произведите сравнительный анализ свойств газообразных изоляционных материалов.
3. В чём заключается старение трансформаторного масла и как оно восстанавливается?

4. Какими параметрами характеризуется трансформаторное масло как электроизоляционный материал?
5. Перечислите основные синтетические жидкие диэлектрики, используемые на практике, их основные свойства и области применения.
6. Какие органические высокомолекулярные изоляционные материалы, используемые на практике, вам известны?
7. Какими свойствами обладают компаунды и основные области их применения?

1.4.4. Магнитные материалы

Природа магнетизма. Условия возникновения ферромагнитных свойств у веществ. Классификация веществ по магнитным свойствам.

Строение ферромагнетиков. Явление магнитной анизотропии и магнитострикции. Использование этих явлений в технике.

Основные характеристики магнитных материалов. Петля гистерезиса и основная кривая намагничивания. Остаточная индукция и коэрцитивная сила, индукция технического насыщения.

Относительная и абсолютная магнитные проницаемости. Потери на гистерезис и вихревые токи при перемагничивании в переменных магнитных полях. Явление вытеснения магнитного поля и его последствия.

Магнитомягкие, магнитотвёрдые материалы и магнитные материалы специального назначения.

Разновидности магнитных материалов. Листовые электротехнические стали и пермаллой, основные характеристики и применение.

Вопросы для самопроверки

1. Какие элементарные круговые точки существуют в атоме?
2. Какой круговой ток создаёт наибольший магнитный момент в атоме?
3. Чем объяснить то, что не у всех химических элементов атомы обладают собственным магнитным моментом?
4. Как называются области в ферромагнетиках, в пределах которых магнитные моменты атомов ориентированы параллельно?
5. Как происходит намагничивание ферромагнетиков?
6. Какое явление в ферромагнетиках называется магнитной анизотропией?
7. Где и как учитывается явление магнитной анизотропии?
8. В чём заключается явление магнитострикции и где оно используется?
9. Чем отличается основная кривая намагниченности от петли гистерезиса?
10. Назовите основные характеристики ферромагнитных материалов.

11. Как зависит величина магнитной проницаемости от напряжённости магнитного поля?
12. Как зависит магнитная проницаемость от частоты переменного магнитного поля?
13. Как расшифровать обозначения марок электротехнических сталей?
14. Назовите основные характеристики листовых электротехнических сталей и области их применения.
15. Что представляют собой сплавы пермаллой?
16. В чём преимущество холоднокатаных сталей перед горячекатаными?
17. Какие основные виды магнитотвёрдых материалов используется на практике?
18. Какие материалы специального назначения используются на практике?
19. Что представляют собой ферриты и в чём их преимущество перед другими видами магнитных материалов?

1.4.5. Полупроводники

Понятие о полупроводниках. Классификация полупроводников. Понятия о видах электропроводности полупроводников.

Вопросы для самопроверки

1. Какие вещества называются полупроводниками?
2. Какие виды электропроводности свойственны собственным полупроводникам?
3. Как получить полупроводник с основной электронной электропроводностью?
4. Как получить полупроводник с основной дырочной электропроводностью?
5. Как зависит удельная электропроводность полупроводников от температуры?
6. Как влияет механическая деформация на электропроводность полупроводника?
7. Как зависит электропроводность полупроводников от частоты и интенсивности световой энергии?
8. Как влияет напряжённость электрического поля на электропроводность полупроводника?

1.4.6. Проводники

Понятие о проводниках природа электропроводности проводников. Основные характеристики. Классификация проводниковых материалов. Понятие о сверхпроводимости проводников.

Вопросы для самопроверки

1. Какой механизм электропроводности свойственен металлам?
2. Какой механизм электропроводности свойственен электролитам?
3. В чём разница в объяснении механизма электропроводности с позиций классической электронной теории строения металлов и кантовой механики?

4. Какими параметрами характеризуются свойства проводников?
5. Чем объяснить зависимость удельной электропроводности металлов от температуры?
6. Почему удельное сопротивление металла зависит от его деформации?
7. Какие материалы относятся к материалам высокой проводимости?
8. Дайте сравнительную характеристику меди и алюминия.
9. Какие сплавы высокого сопротивления применяются в технике?
10. Что такое явление сверхпроводимости?
11. Каким материалам и при каких условиях свойственно явление сверхпроводимости?

1.4.7. Примерный перечень лабораторных работ

1. Определение электрической прочности газообразных и твёрдых диэлектриков.
2. Определение динамических характеристик ферромагнетиков при постоянной частоте магнитного поля.
3. Определение динамических характеристик ферромагнетиков при изменяющейся частоте магнитного поля.

Часть 2

ДИЭЛЕКТРИКИ

2.1. Основные сведения о пробое диэлектриков

Важнейшей областью использования диэлектриков в технических целях является применение их в качестве изоляционных материалов, предназначенных для предотвращения протекания электрического тока по путям, не предусмотренным электрической схемой установки. Такое использование диэлектриков связано с их исключительно малой электропроводностью.

Так, удельная объемная электропроводность этих материалов при комнатной температуре не превышает 10^{-8} см/м, а удельное объемное сопротивление соответственно больше 10^8 Ом·м.

Такое значение электропроводности и удельного объемного сопротивления сохраняется только для определенного напряжения. Превышение этого напряжения приводит к резкому (скачкообразному) возрастанию электропроводности и уменьшению сопротивления диэлектрика.

Потеря диэлектриком изоляционных свойств под воздействием внешнего электрического поля называется **пробоем**.

Напряжение, при котором в диэлектрике возникает электрический пробой, называется **пробивным** или **напряжением пробоя**.

Пробивное напряжение обозначается $U_{пр}$. Единицей измерения пробивного напряжения в системе СИ является вольт (В). Допускается использовать в качестве единицы измерения пробивного напряжения киловольт (кВ).

Значение пробивного напряжения зависит от химического состава, структуры строения, толщины диэлектрика и воздействия ряда других факторов.

Другой важнейшей характеристикой способности диэлектриков выдерживать воздействие высоких напряжений без потери изоляционных свойств является электрическая прочность ($E_{пр}$). Под электрической прочностью понимается отношение пробивного напряжения диэлектрика к его толщине:

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{h},$$

где h – толщина диэлектрика.

Единицей измерения электрической прочности в системе СИ является В/м. В связи с тем, что использование этой единицы на практике неудобно из-за малой толщины изоляции в различных электромеханических установках и больших значений пробивных напряжений, ГОСТом допускается применение

внесистемной единицы измерения, равной кВ/мм. Соотношение между этими единицами – $\text{кВ/мм} = 10^6 \text{ В/м}$.

Если на диэлектрик воздействует внешнее однородное электрическое поле, то электрическая прочность представляет собой напряженность этого поля, при которой происходит пробой.

В зависимости от механизма развития и причин возникновения различают следующие виды пробоев: электрический, тепловой и электрохимический.

Электрический пробой связан с развитием процессов ударной и фотонной ионизации, возникающих в сильных электрических полях и приводящих к быстрому росту концентрации свободных носителей электрических зарядов к скачкообразному увеличению электрического тока в месте пробоя при превышении значения напряженности электрического поля, равного электрической прочности диэлектрика.

Тепловой пробой возникает под воздействием тепловой энергии, выделяющейся в диэлектриках за счет диэлектрических потерь или поступающей от посторонних источников тепловой энергии. Тепловая энергия вызывает уменьшение активного сопротивления диэлектриков и возрастание активного потока, приводящих к дальнейшему увеличению температуры диэлектриков с последующим их термическим разрушением.

Электрохимический пробой возникает при длительной эксплуатации диэлектриков в электрических полях и связан с изменением химического состава в результате протекающих в диэлектриках электрохимических процессов.

Более подробно каждый из видов пробоя диэлектриков рассмотрен в последующих параграфах.

2.2. Пробой газообразных диэлектриков

В газообразных диэлектриках пробой является электрическим и связан с развитием процессов ударной и фотонной ионизации под воздействием сильных электрических полей.

В любом газообразном диэлектрике содержится малое количество положительных и отрицательных ионов и электронов, находящихся в хаотическом тепловом движении. Под воздействием электрического поля эти частицы начинают перемещаться либо в направлении напряженности поля (положительные ионы), либо в направлении, противоположном ей (электроны, отрицательные ионы).

При этом каждая из частиц получает добавочную энергию за счет электрического поля

$$W_{\text{ч}} = g \cdot U_{\lambda}, \quad (2.1)$$

где g – электрический заряд напряженной частицы; U_λ – разность потенциалов на длине свободного пробега заряженной частицы.

В однородном электрическом поле

$$U_\lambda = E \cdot \lambda, \quad (2.2)$$

где E – напряженность однородного электрического поля; λ – длина свободного пробега частицы.

Таким образом, в однородном электрическом поле добавочная энергия, приобретенная частицей в результате воздействия электрического поля:

$$W_q = g \cdot E \cdot \lambda. \quad (2.3)$$

В конце пути свободного пробега заряженная частица сталкивается с нейтральной молекулой. Если при этом энергия заряженной частицы оказывается больше энергии ионизации нейтральной молекулы газообразного диэлектрика, то последняя расщепляется на электрон и положительно заряженный ион. Этот процесс получил название процесса ударной ионизации.

Таким образом, условие возникновения ударной ионизации описывается уравнением

$$W_q \geq W_{\text{и}}. \quad (2.4)$$

С учетом уравнений (2.2) и (2.3) получим:

$$E_{\text{н}} \cdot g \cdot \lambda \geq W_{\text{и}},$$

а

$$U_\lambda = E_{\text{н}} \cdot \lambda \geq W_{\text{и}}, \quad (2.5)$$

где U_λ – ионизационный потенциал газообразного диэлектрика; $E_{\text{н}}$ – начальная напряженность поля.

Ионизационный потенциал характеризует энергию ионизации диэлектрика. У различных газообразных диэлектриков он лежит в диапазоне от 4 до 25 В, что соответствует энергии ионизации от 4 до 25 эВ.

Так как λ и g для каждого из газообразных диэлектриков постоянны, то ударная ионизация начинается при определенной напряженности поля, называемой начальной напряженностью.

В ряде случаев столкновение заряженной частицы с нейтральной молекулой может не ионизировать последнюю, а принести ее в возбужденное состояние. Через определенный промежуток времени возбужденная молекула испускает фотон, отдавая при этом избыточную энергию. Фотон поглощается другой нейтральной молекулой, которая в этом случае ионизируется, расщепляясь на электрон и положительно заряженный ион. Такая ионизация называется фотонной. Фотонная ионизация приводит к быстрому развитию канала пробоя в газообразном промежутке.

Развитие процессов ударной и фотонной ионизации при напряженности электрического поля большей, чем начальная, приводит к резкому возрастанию количества свободных носителей электрических зарядов и возникновению двух встречных источников разноименно заряженных частиц в канале пробоя.

В результате пробоя пространство, занимаемое каналом пробоя, заполнено движущимися заряженными частицами газа. Такое состояние газообразного диэлектрика получило название газоразрядной плазмы.

За счет фотонной ионизации пробой газов осуществляется практически мгновенно.

Электрическая прочность газообразного диэлектрика зависит от длительности воздействия электрического поля. При кратковременном воздействии напряжение пробоя диэлектрика, выше чем при длительном воздействии. Повышение пробивного напряжения характеризуется коэффициентом импульса

$$\beta = \frac{U_{\text{пр}}}{U_{\text{пр}50}}, \quad (2.6)$$

где $U_{\text{пр}}$ – пробивное напряжение при данной длительности импульса; $U_{\text{пр}50}$ – пробивное напряжение при постоянном или переменном напряжении частотой 50 Гц.

Значения коэффициента импульса находятся в диапазоне от 1 до 1,5.

Электрическая прочность газообразных диэлектриков зависит от расстояния между электродами или толщины диэлектрика. Зависимость $E_{\text{пр}}=f(h)$ представлена на рисунке 2.1.

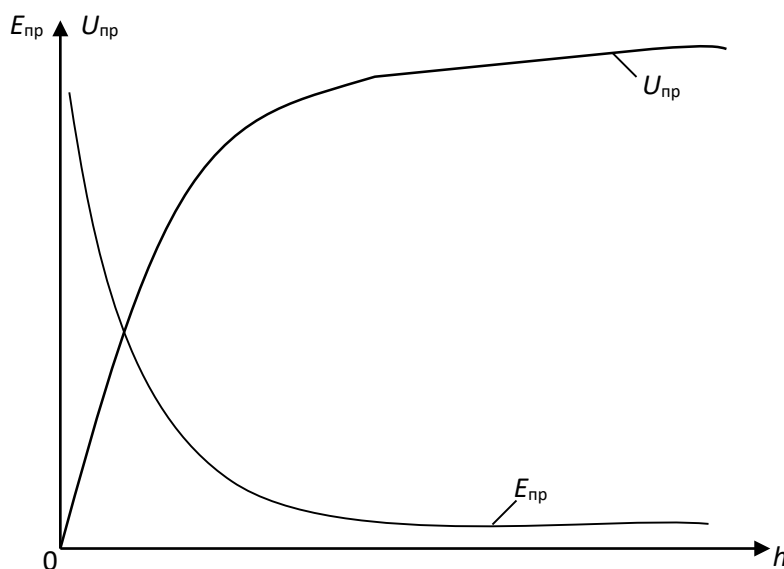


Рис. 2.1. Зависимость электрической прочности и пробивного напряжения газообразного диэлектрика от расстояния между электродами

Из рис. 2.1 видно, что с ростом толщины диэлектрика его электрическая прочность уменьшается, а пробивное напряжение увеличивается. Это объясняется тем, что при малых расстояниях между электродами затрудняется возникновение процесса ударной ионизации. Это видно из анализа уравнения (2.5).

Решив уравнение (2.5) относительно E_n , получим

$$E_n = \frac{W_n}{g \cdot \lambda}.$$

При малых расстояниях между электродами, когда $h \geq \lambda$, можно записать

$$E_n = \frac{W_n}{g \cdot h}. \quad (2.7)$$

Из уравнения (2.7) видим, что чем меньше толщина газообразного диэлектрика, тем больше начальная напряженность электрического поля, при которой энергия движущейся заряженной частицы обеспечивает ионизацию молекулы газообразного диэлектрика и возникновение процессов ударной и фотонной ионизации.

Электрическая прочность газообразного диэлектрика зависит также и от давления газа. Эта зависимость представлена на рисунке 2.2.

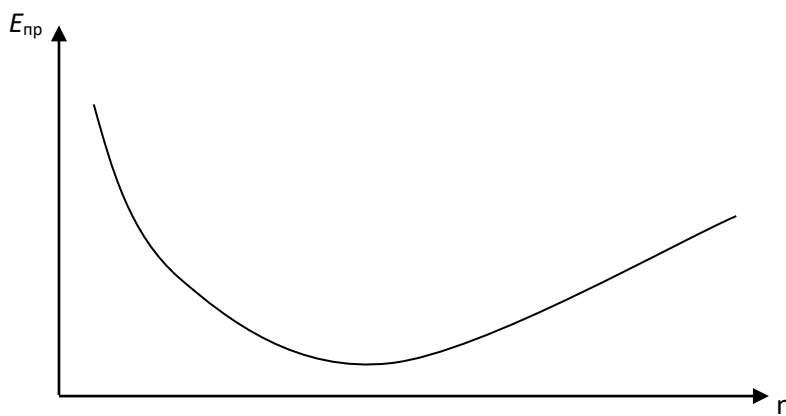


Рис. 2.2. Зависимость электрической прочности газа от давления

Как видно из рис. 2.2, при малых значениях давления наблюдается уменьшение электрической прочности с ростом давления. Такое явление объясняется тем, что при малых давлениях вероятность столкновения заряженной частицы с нейтральной молекулой незначительная, и затрудняется развитие процессов ударной и фотонной ионизации. С ростом давления плотность молекул газа увеличивается, что приводит к возрастанию вероятности столкновений заряженных частиц с молекулами газа и облегчает развитие процессов ударной ионизации. При сверхвысоких давлениях существенно уменьшается длина свободного пробега заряженной частицы, что, согласно уравнению (2.7), приводит к росту начальной напряженности поля.

Электрическая прочность газообразного диэлектрика существенно зависит от однородности электрического поля (рис. 2.3).

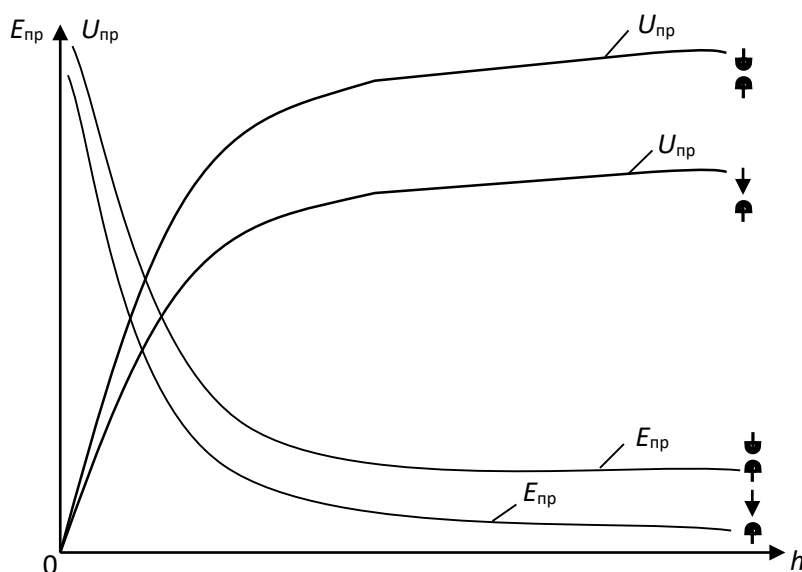


Рис. 2.3. Зависимости электрической прочности и пробивного напряжения газообразного диэлектрика от расстояния между электродами в однородном и неоднородном электрических полях

В однородных электрических полях, возникающих между плоскими электродами с закругленными краями, либо между сферическими электродами большого диаметра, электрическая прочность значительно выше, чем в неоднородных электрических полях между электродами типа «игла – игла», «полусфера – игла», «плоскость – игла» и т. п. Неоднородное электрическое поле возникает также между двумя полусферами, когда расстояние между ними больше радиуса сферы.

Меньшее значение электрической прочности газообразных диэлектриков в неоднородных электрических полях по сравнению с электрической прочностью в однородных полях объясняется тем, что при одной и той же разности потенциалов между электродами напряженность поля в точках, расположенных по кратчайшему расстоянию между двумя электродами, в неоднородных полях значительно выше, чем напряженность однородного электрического поля. Следовательно и электрический пробой газообразного диэлектрика в неоднородном электрическом поле произойдет при меньшем напряжении, приложенном к электродам, чем в однородном поле.

По разному развивается электрический пробой в однородных и неоднородных электрических полях.

В однородном электрическом поле при определенном значении напряжения, зависящем от температуры, давления газа и расстояния между

электродами возникает искровой разряд, переходящий в дуговой при дальнейшем росте напряжения.

В неоднородных электрических полях вначале возникает частичный разряд в местах, где напряженность достигает максимальных значений (коронный разряд). При дальнейшем возрастании напряжения коронный разряд переходит в искровой, а затем и в дуговой разряды.

Электрическая прочность газообразного диэлектрика зависит от полярности электродов типа «игла – плоскость», «игла – сфера».

При положительной полярности иглы пробой происходит при меньшем напряжении, чем при обратной полярности. Это явление объясняется тем, что ионизация газа начинается в районе кончика иглы, независимо от ее полярности, так как именно в этой области напряженность поля максимальная. При положительной полярности иглы у ее кончика возникает положительный объемный заряд из положительно заряженных ионов газа, который как бы является продолжением иглы, способствуя уменьшению длины газообразного промежутка и соответствующему уменьшению пробивного напряжения.

При отрицательной полярности иглы образовавшийся объемный положительный заряд как бы экранизирует иглу, препятствуя перемещению электронов от иглы к поверхности положительно заряженной плоскости или сферы. Наличие экрана из положительно заряженных ионов около кончика иглы и приводит к возрастанию пробивного напряжения при отрицательной полярности иглы, по сравнению с пробивным напряжением при обратной полярности иглы.

2.3. Пробой твердых диэлектриков

В твердых диэлектриках могут возникать четыре вида пробоев:

- электрический пробой макроскопически однородных твердых диэлектриков;
- электрический пробой макроскопически неоднородных твердых диэлектриков;
- электротепловой (тепловой) пробой;
- электрохимический пробой.

Электрический пробой макроскопически однородных твердых диэлектриков развивается аналогично электрическому пробую в газообразных диэлектриках в результате осуществления процесса ударной ионизации, когда исключено влияние электропроводности и диэлектрических потерь, обуславливающих разогрев диэлектрика.

В связи с этим, зависимости электрической прочности и пробивного напряжения твердых диэлектриков от толщины и конфигураций электродов

аналогичны таким же зависимостям для газообразных диэлектриков (рис. 2.1, рис. 2.3).

Электрический пробой неоднородных диэлектриков характерен для технических диэлектриков, в структуре которых имеются поры и капилляры, заполненные газообразным диэлектриком. Чаще всего таким газообразным диэлектриком является воздух. Так как электрическая прочность воздуха значительно меньше электрической прочности твердых диэлектриков, то наличие капилляров и пор в структуре твердых диэлектриков обуславливает значительную меньшую электрическую прочность неоднородных диэлектриков сравнению с однородными.

С ростом толщины неоднородного твердого диэлектрика наблюдается уменьшение его электрической прочности, так как возрастает количество газовых включений.

Электрическая прочность неоднородных твердых диэлектриков зависит от однородности и неоднородности электрического поля. Но, в отличие от газообразных и однородных твердых диэлектриков, электрическая прочность неоднородных твердых диэлектриков может быть в неоднородном поле больше, чем в однородном. Это связано с тем, что при большей площади электродов, между которыми создается однородное поле, возрастает количество слабых мест (пор, капилляров, трещин и т. д.), приводящих к снижению электрической прочности твердого диэлектрика.

Электротепловой (тепловой) пробой связан с разогревом материала в электрическом поле за счет возрастания сквозной электропроводности и диэлектрических потерь, приводящих к потере изоляционных свойств материала. Пробивное напряжение при электротепловом пробое зависит от частоты поля, условий охлаждения, температуры окружающей среды и т. п.

Установившийся температурный режим возникает тогда, когда выделение тепла в изоляционном материале равняется теплоотдаче в окружающую среду. Этот режим описывается следующим уравнением

$$U^2 \cdot \omega \cdot c \cdot \operatorname{tg} \delta = \sigma \cdot S (t_{\text{раб}} - t_0), \quad (2.8)$$

где U – напряжение на электродах; ω – угловая частота; c – емкость изоляционного материала; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь изоляционного материала; σ – коэффициент теплоотдачи; S – поверхность изоляционного материала; $t_{\text{раб}}$ – температура изоляционного материала; t_0 – температура окружающей среды.

На рисунке 2.4 построены зависимости мощности диэлектрических потерь P_a и мощности теплоотдачи P_t от температуры.

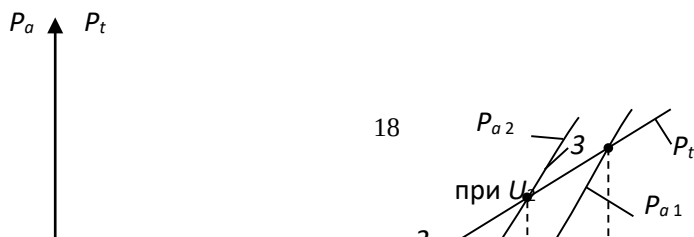


Рис. 2.4. Зависимость мощности диэлектрических потерь и мощности теплоотдачи изоляционного материала от температуры

Как видно из рис. 2.4, зависимость $P_{a1}=f(t)$ имеет две точки пересечения с прямой $P_t=f(t)$ и следовательно, два установившихся режима при $t_{1\text{раб}}$ и $t_{1\text{кр}}$. Учитывая, что в условиях эксплуатации не исключается дополнительный разогрев изоляционного материала за счет посторонних источников тепловой энергии, рабочая температура может случайно возрасти. Если с учетом возможного возрастания $t_{1\text{раб}} < t_{1\text{кр}}$, то тепловой пробой не произойдет, так как количество тепла, выделяемое внутри диэлектрика, возрастает медленнее, чем увеличивается теплоотдача. Если за счет дополнительного нагрева установится соотношение $t_{1\text{раб}} > t_{1\text{кр}}$, то количество тепловой энергии, выделяемой в изоляционном материале, превысит теплоотдачу, и температура будет расти до полного разрушения диэлектрика. С ростом напряжения зависимость $P_a=f(t)$ смещается вверх (см. кривую 3, полученную при $U_2 > U_1$). При тех же самых условиях охлаждения повышение напряжения приводит к росту рабочей температуры ($t_{2\text{раб}} > t_{1\text{раб}}$) и уменьшению критической температуры ($t_{1\text{кр}} > t_{2\text{кр}}$).

Таким образом, как видно из рис. 2.4, увеличение напряжения приводит к возрастанию рабочей температуры за счет роста количества тепла, выделяемого в материале.

Выделение тепловой энергии вследствие диэлектрических потерь приводит к увеличению электрической прочности диэлектрика. На рисунке 2.5 приведены зависимости электрической прочности и пробивного напряжения твердого диэлектрика от толщины при электрическом и электротепловом пробоях.

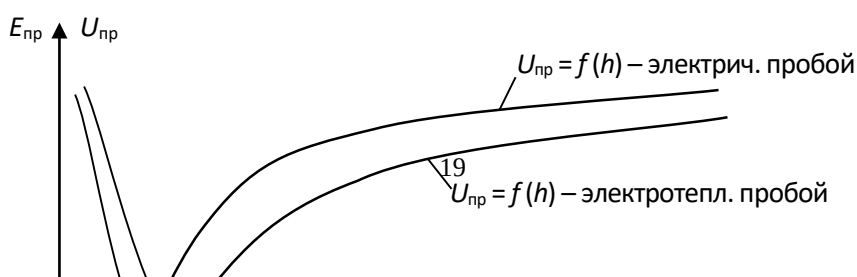


Рис. 2.5. Зависимости электрической прочности и пробивного напряжения от толщины диэлектрика

Как видно из рис. 2.5, электрическая прочность изоляционного материала при электротепловом пробое меньше, чем при чисто электрическом пробое.

Уменьшение электрической прочности при электротепловом пробое связано с одной стороны с разрушением структуры строения изоляционного материала (растрескивание, обугливание и т. д.), когда рабочая температура превышает критическую. С другой стороны, электрическая прочность при электротепловом пробое меньше, чем при электрическом даже в том случае, когда рабочая температура не превышает критическую. Такое явление можно объяснить следующим образом: с ростом температуры изоляционного материала увеличивается кинетическая энергия теплового хаотического движения заряженных частиц и нейтральных молекул твердого диэлектрика. Возрастание энергии теплового хаотического движения молекул приводит к тому, что полю необходимо сообщить меньшую дополнительную энергию движущихся заряженных частиц, чтобы последняя могла ионизировать нейтральную молекулу при столкновении с ней. И, следовательно, выполнение условия развития ударной ионизации наступает при меньшем напряжении, подаваемом на электроды.

2.4. Лабораторная работа № 1. Определение электрической прочности твердых и газообразных диэлектриков. Цель работы

Целью лабораторной работы является научить студентов определять электрическую прочность твердых и газообразных диэлектриков и выявлять зависимости электрической прочности от толщины диэлектрика и конфигурации электродов, формирование навыков использования теоретических сведений к объяснению результатов эксперимента.

2.5. Объект исследования

1. Образцы твердых диэлектриков. Материал, размеры образцов и их толщины задаются преподавателем.
2. Воздух. Длины воздушных зазоров задаются преподавателем.

2.6. Средства измерения

1. Испытательная высоковольтная установка с максимальным напряжением до 10 кВ. Принципиальная электрическая схема установки приведена на рис. 2.6.
2. Вольтметр переменного тока с пределом измерения до 150 В.
3. Микрометр типа МК с пределом измерения 0 – 25 мм. Цена деления микрометра – 0,1 мм.
4. Штангенциркуль. Цена деления – 0,1 мм.

2.7. Рабочее задание

1. Испытать на электрический пробой образцы твердого диэлектрика различной толщины, определяя пробивное напряжение каждого из них. Число образцов и измерений определяет преподаватель.
2. Рассчитать электрическую прочность каждого образца.
3. Произвести электротепловой пробой аналогичных по химическому составу и толщине образцов твердого диэлектрика, определяя пробивное напряжение каждого образца. Количество образцов и измерений такое же, как и при испытании на электрический пробой.
4. Рассчитать электрическую прочность каждого образца при электротепловом пробое.
5. Построить для одних и тех же образцов:
 - зависимости $U_{пр}=f(h)$ при электрическом и электротепловом пробоях в одних осях координат;
 - зависимости $E_{пр}=f(h)$ при электрическом и электротепловом пробоях в одних осях координат.
6. Осуществить электрический пробой воздуха при различных толщинах воздушного зазора h , определяя каждый раз значение пробивного напряжения. Электрический пробой произвести для двух сочетаний электродов с различной конфигурацией, заданных преподавателем.

7. Рассчитать электрическую прочность воздуха для каждого пробоя.
8. Построить:
 - зависимости $U_{пр}=f(h)$ для каждого из сочетаний электродов в одних осях координат;
 - зависимости $E_{пр}=f(h)$ для каждого из сочетаний электродов в одних осях координат.
9. Сделать выводы по работе.

2.8. Методические указания по выполнению рабочего задания

2.8.1. Устройство и принцип действия лабораторной установки

Принципиальная электрическая схема лабораторной установки для определения пробивного напряжения и электрической прочности твердых и газообразных диэлектриков приведена на рис. 2.6.

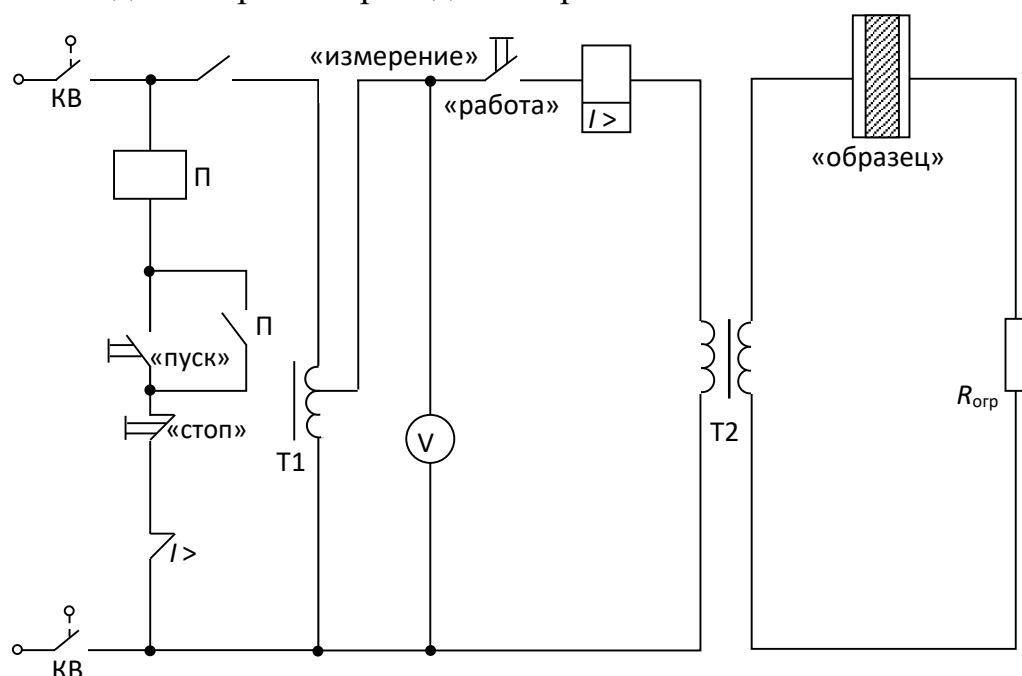


Рис. 2.6. Принципиальная электрическая схема установки

В состав установки входят:

- линейный автотрансформатор Т1, предназначенный для регулирования напряжения, подаваемого на испытательный образец;
- высоковольтный трансформатор Т2 с максимальным напряжением вторичной обмотки $U_{2max}=10$ кВ и коэффициентом $K=10$;
- сопротивление $R_{огр}$, предназначенное для ограничения тока в обмотке высокого напряжения при возникновении пробоя образца;
- электромагнитный пускатель: кнопки «пуск» и «стоп»;

- сигнальная лампа «напряжение подано»;
- переключатель режима работы установки «работа – измерение»;
- многопредельный вольтметр.

В нижней части лабораторной установки находится высоковольтный трансформатор и токоограничивающее сопротивление. Эта часть установки закрыта металлическим заземленным экраном, исключающим возможность попадания работающего на установке под высокое напряжение.

На верхней, горизонтально расположенной части установки находятся линейный автотрансформатор, вольтметр, переключатель режима работы и высоковольтная камера со сменными электродами.

Принцип действия лабораторной установки заключается в следующем. При закрытой дверце высоковольтной камеры контакты концевых выключателей КВ замкнуты и электрическая цепь установки подготовлена к работе.

При нажатии кнопки «пуск», расположенной в левом верхнем углу стенда, срабатывает электромагнитный пускатель П и через его замкнутые контакты напряжение подается на автотрансформатор Т1. Одновременно в камере высокого напряжения загорается сигнальная лампа «напряжение подано». Вторая пара контактов пускателя блокирует кнопку «пуск». Напряжение с выхода автотрансформатора поступает на обмотку низкого напряжения высоковольтного трансформатора, если переключатель режима работы установлен в положении «работа». Это напряжение измеряется многопредельным вольтметром переменного тока. На обмотке высокого напряжения трансформатора создается напряжение, значение которого может быть вычислено по формуле

$$U_2 = K \cdot U_1. \quad (2.9)$$

Когда напряжение U_2 достигает значения, равного напряжению пробоя $U_{пр}$, происходит пробой образца, и в цепи вторичной обмотки возрастает ток, амплитуда которого ограничивается сопротивлением $R_{огр}$. Возрастание тока вторичной обмотки вызывает соответствующее увеличение тока первичной обмотки трансформатора, в результате которого срабатывает реле максимального тока $I >$. Контакты этого реле размыкаются, разрывая цепь питания обмотки электромагнитного пускателя. Контакты пускателя размыкаются и отключают стенд от сети.

Обычно пробой образца происходит внезапно, что затрудняет отсчет по вольтметру напряжения, при котором произошел пробой. Поэтому для облегчения отсчета напряжения пробоя предусмотрена возможность работы установки в режиме «измерение». Для перевода установки в этот режим переключатель режима работы устанавливается в положение «измерение». В

этом режиме высоковольтный трансформатор отключается от выхода автотрансформатора. Если положение рукояти автотрансформатора, регулирующей его выходное напряжение, сохранить таким же, как и в момент пробоя, то после нажатия на кнопку «пуск» вольтметр покажет то же напряжение, что было установлено при пробое.

2.8.2. Методика экспериментального определения пробивного напряжения и электрической прочности твердых диэлектриков при электрическом пробое

1. Перед началом эксперимента необходимо проверить правильность подключения элементов установки (рис. 2.7), предварительно установив рукоятку автотрансформатора в нулевое положение и открыв дверку камеры высокого напряжения. Лампа «напряжение подано» не должна гореть.

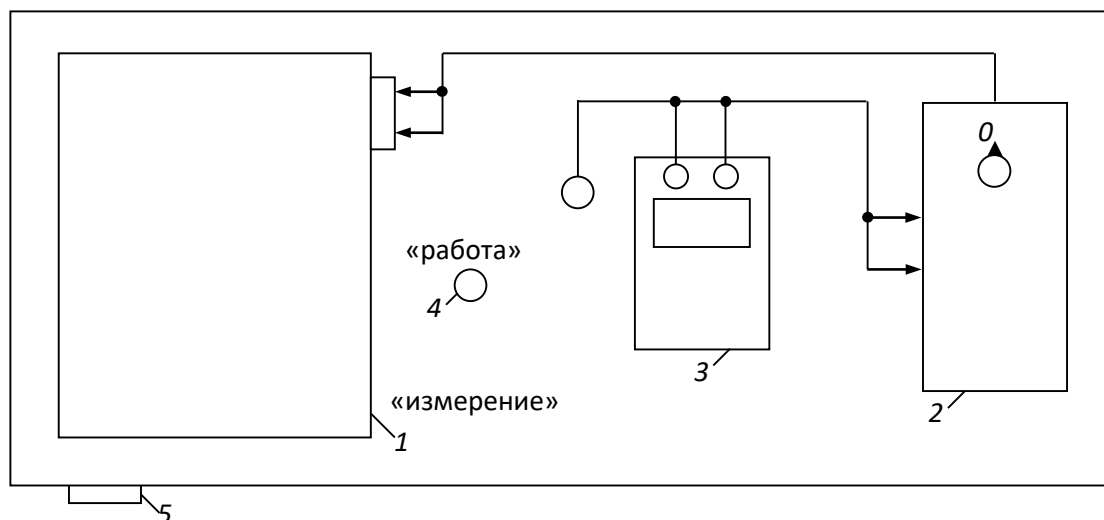


Рис. 7. Схема соединения элементов лабораторной установки:

1 – высоковольтная камера; 2 – линейный автотрансформатор; 3 – вольтметр;
переключатель режима работы установки; 5 – кнопки «пуск» и «стоп»

4 –

2. Установить по указанию преподавателя сменные электроды.

3. Измерить микрометром толщину испытываемого образца диэлектрика. Рекомендуется начинать эксперимент с образца наибольшей величины. Данные измерений записать в таблицу 2.1.

Таблица 2.1

Экспериментальное определение напряжение пробоя и электрической прочности твердых диэлектриков при электрическом пробое

№ п/п	h , мм	U_1 , В	$U_{пр}$, кВ	$E_{пр}$, кВ/мм	Конфигурация электродов

Примечание: высота столбцов таблицы должна быть рассчитана для записи результатов пробоя 7 – 8 образцов.

4. Разместить образец между электродами в высоковольтной камере. Для этого необходимо отвернуть стопорный винт верхнего электрода до тех пор, пока последний не начнет свободно перемещаться. Поднять верхний электрод и поместить образец в образовавшийся зазор. Опустить верхний электрод на образец и повернуть стопорный винт в обратном направлении до упора.

5. Закрывать крышку камеры высокого напряжения.

6. Установить переключатель режима работы в положение «работа».

7. Нажать кнопку «пуск». При этом загорается лампа «напряжение подано».

8. Плавно вращая рукоятку автотрансформатора, увеличивать напряжение, подаваемое на образец, до тех пор, пока не произойдет автоматическое отключение напряжения, свидетельствующее о пробое образца. Сигнальная лампа «напряжение подано» должна погаснуть.

9. Переключатель режима работы установить в положение «измерение».

10. Нажать на кнопку «пуск». Сигнальная лампа «напряжение подано» должна загореться.

11. По вольтметру отсчитать напряжение U_1 , при котором произошел пробой диэлектрика и записать в табл. 2.1.

12. Нажать кнопку «стоп». Сигнальная лампа «напряжение подано» должна погаснуть.

13. Установить рукоятку линейного автотрансформатора в нулевое положение, открыть дверцу камеры высокого напряжения и убрать пробитый образец.

14. Рассчитать пробивное напряжение и электрическую прочность образца по формуле

$$U_{пр} = \frac{K \cdot U_1}{1000}; \quad (2.10)$$

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{h}, \quad (2.11)$$

где U_1 – действующее значение выходного напряжения автотрансформатора, В; $U_{пр}$ – действующее значение напряжения пробоя образца, кВ; $K=100$ – коэффициент трансформации высоковольтного трансформатора; $E_{пр}$ – электрическая прочность образца, кВ/мм.

Рассчитанные значения $U_{пр}$ и $E_{пр}$ записать в таблицу 2.1.

2.8.3. Методика экспериментального определения электрической прочности твердых диэлектриков при электротепловом пробое

1. Электротепловой пробой производится на образцах диэлектриков, аналогичных по химическому составу и геометрическим размерам образцам, использованным при электрическом пробое. Количество испытываемых образцов и их толщины задаются преподавателем.

2. Перед началом испытаний необходимо рассчитать значения начального напряжения $U_{\text{нач}}$ и интервал, через который будет изменяться напряжение установки ΔU по следующим формулам:

$$U_{\text{нач}} = 0,6 \cdot U_{\text{пр}} \cdot 1000; \quad (2.12)$$

$$\Delta U = 1000 \cdot U_{\text{пр}} \cdot \frac{(1-0,6)}{6 \div 7} = \frac{0,4}{6 \div 7} \cdot U_{\text{пр}} \cdot 1000, \quad (2.13)$$

где $U_{\text{пр}}$ – пробивное напряжение образца, полученное при электрическом пробое, кВ; ΔU – интервал, через который изменяется напряжение, приложенное к образцу при электротепловом пробое, В.

3. Выполнить пункты 3 – 7 из 2.8.2. данных методических указаний.

4. Плавнo вращая рукоятку автотрансформатора, установить напряжение, подаваемое на образец, равным ____.

5. Выдержать образец под действием напряжения $U_{\text{нач}}$ и в течение интервала времени, указанного преподавателем.

6. Вращая рукоятку автотрансформатора увеличить напряжение на образец на ΔU .

7. Выдержать образец под действием напряжения в течение указанного преподавателем интервала времени.

8. Повторить операции, перечисленные в пунктах 6 и 7, до тех пор пока не произойдет пробой образца.

9. Измерить пробивное напряжение в соответствии с пунктами 9 – 13 из методики 2.8.2.

10. Рассчитать пробивное напряжение и электрическую прочность образца при электротепловом пробое по формулам (2.10) и (2.11). Данные измерений и расчётов записываются в таблицу 2.2. Пример заполнения таблицы приведен ниже.

Таблица 2.2

Экспериментальное определение напряжения пробоя и электрической прочности твердых диэлектриков при электротепловом пробое

№ п/п	h , мм	$U_{\text{нач}}$, В	ΔU , В	U_1 , В	$U_{\text{пр}}$, кВ	$E_{\text{пр}}$, кВ/мм	Конфигурация электродов

11. Построить зависимости $U_{\text{пр}}=f(h)$ при электротепловом и электрическом пробоях в одних осях координат.

12. Построить зависимости $E_{\text{пр}}=f(h)$ при электротепловом и электрическом пробоях твердого диэлектрика в одних осях координат.

2.8.4. Методика экспериментального определения электрической прочности воздуха

1. Установить электроды заданной преподавателем конфигурации в высоковольтной камере стенда.

2. Установить необходимую толщину воздушного зазора между электродами. Для этого отвернуть стопорный винт верхнего электрода и разместить калиброванные пластины между электродами. Опустить верхний электрод на поверхность пластин и зафиксировать его положение с помощью стопорного винта. Убрать калиброванные пластины из камеры.

3. Осуществить электрический пробой воздуха в соответствии с пунктами 5 – 14 из 2.8.2. данных методических указаний. Электрический пробой воздуха произвести для двух сочетаний электродов различной формы в соответствии с указаниями преподавателя.

4. Построить зависимости $U_{пр}=f(h)$ для обоих сочетаний электродов в одних осях координат.

5. Построить зависимости $E_{пр}=f(h)$ для обоих сочетаний электродов в одних осях координат.

2.9. Контрольные вопросы

1. С помощью каких показателей характеризуется способность диэлектрика противостоять электрическому пробую?
2. Какая из величин (пробивное напряжение или электрическая прочность) более точно оценивает способность различных диэлектриков противостоять электрическому пробую?
3. Чем объяснить, что электрическая прочность пористых твердых диэлектриков ниже прочности однородных по структуре строения твердых диэлектриков?
4. Какими процессами обуславливается развитие электрического пробоя в газообразных диэлектриках?
5. В чем разница между электротепловым и чисто электрическим пробоем диэлектриков?
6. Какое явление называется пробоем диэлектриков?
7. В каком из электрических полей (однородном или неоднородном) электрическая прочность диэлектриков выше? Чем это можно объяснить?
8. По каким причинам электрическая прочность диэлектриков при тепловом пробое меньше, чем при электрическом?
9. Зависит ли электрическая прочность воздуха от полярности электродов при следующих сочетаниях электродов: игла – плоскость, игла – полусфера? Ответ аргументируйте.
10. Чем объяснить, что электрическая прочность воздуха при сочетании электродов игла плоскость или игла полусфера уменьшается в большем диапазоне, чем его прочность при сочетании электродов плоскость –

плоскость, полусфера – полусфера, с ростом толщины воздушного зазора?

11. Чем объяснить, что электрическая прочность диэлектриков уменьшается с ростом толщины?
12. При каких условиях в твердых диэлектриках может произойти электротепловой пробой?
13. Почему необходимо учитывать процесс старения электрической изоляции при определении рабочего напряжения различных электрических машин?
14. Как изменяется электрическая прочность газообразных диэлектриков с ростом давления и почему?
15. Влияет ли температура на электрическую прочность диэлектриков? Ответ аргументируйте.

Часть 3

МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

3.1. Основные характеристики магнитных веществ

Магнитное состояние вещества оценивается намагниченностью. Намагниченностью называется сумма элементарных магнитных моментов в единице объема вещества

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{V}, \quad (3.1)$$

где m_i – элементарный магнитный момент (спин электрона); V – объем образца.

Значение намагниченности зависит от напряженности магнитного поля H и связано с последней в соответствии с уравнением:

$$M = \chi \cdot H$$

где χ – магнитная восприимчивость вещества.

В системе СИ магнитная восприимчивость является безразмерной величиной.

Под воздействием напряженности магнитного поля в веществе создается магнитная индукция, зависимость которой от напряженности поля и намагниченности материала описывается уравнением

$$B = \mu_0 (H + \chi \cdot H), \quad (3.2)$$

где $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$ – магнитная постоянная вакуума, Гн/м.

В системе СИ индукция измеряется в теслах (Тл), а в системе СГС – в гауссах (Гс).

Связь между индукцией и напряженностью магнитного поля может быть также описана следующим уравнением:

$$B = \mu_a \cdot H = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H, \quad (3.3)$$

где μ_a – абсолютная магнитная проницаемость; μ_r – относительная магнитная проницаемость.

Абсолютная магнитная проницаемость имеет ту же размерность, что и магнитная постоянная вакуума, а относительная магнитная проницаемость является безразмерной величиной.

Абсолютная и относительная магнитная проницаемости связаны между собой соотношением

$$\mu_a = \mu_0 \cdot \mu_r. \quad (3.4)$$

Если учесть, что

$$\mu_a = \frac{B}{H}, \quad (3.5)$$

а

$$\mu_r = \frac{B}{H \cdot \mu_0},$$

становится ясным физический смысл относительной магнитной проницаемости. Она показывает, во сколько раз магнитная индукция в веществе больше, чем индукция в вакууме под воздействием намагничивающих полей одинаковой напряженности.

3.2. Физическая природа магнетизма

Известно, что элементарный замкнутый круговой электрический ток i создает магнитное поле, основной характеристикой которого является магнитный элемент

$$\underline{m} = i \cdot \underline{S},$$

где $\underline{S}$ – векторная величина площади, охватываемой током.

На уровне атома можно условно выделить три основные формы движения электрических зарядов, создающих элементарные магнитные моменты:

- движение электронов по круговой орбите вокруг ядра;
- вращение электронов вокруг собственной оси;
- вращение протонов ядра атома.

Наибольший магнитный момент создается за счет вращения электрона вокруг собственной оси. Этот магнитный момент получил название – спин электрона. Спины электронов могут принимать только вполне определенные дискретные значения, кратные постоянной Планка. Минимальное значение спина электрона превышает магнитный момент, создаваемый протоном, примерно в 650 раз.

Но не все электроны, создающие электронные оболочки атома, участвуют в создании магнитного момента атома. Рассмотрим, как создается результирующий магнитный момент атома вещества. Электроны в атомах вещества занимают различные энергетические уровни, которые принято изображать в виде ряда электронных оболочек. Количество оболочек в атоме химического элемента определяется номером периода таблицы Менделеева, в котором расположен данный элемент. Каждая из электронных оболочек состоит из ряда подоболочек, число которых колеблется от 1 до 4. Номер электронной оболочки индексируется цифрами от 1 до 7, а номер подоболочки буквами s, p, d, f . Пример обозначения оболочек и подоболочек приведен на рис. 3.1.

В подоболочках с индексом S могут находиться максимально 2, в подоболочках p – 6, в подоболочках d – 10 и в подоболочках f – 14 электронов.

Заполнение электронами оболочек и подоболочек у подавляющего большинства элементов подчиняются следующему правилу.

Прежде всего заполняются наиболее близко расположенные к ядру атома оболочки и подоболочки. Заполнение последующих электронных подоболочек начинается после того, как полностью заполнена предыдущая.

В полностью заполненных подоболочках половина количества электронов, заполнивших электронную подоболочку, вращаются в одном направлении, создавая спиновые моменты, направление которых условно принимается за *положительное*.

Другая половина электронов данной подоболочки вращается в противоположном направлении, создавая спиновые моменты, направление которых принимается за *отрицательное*.

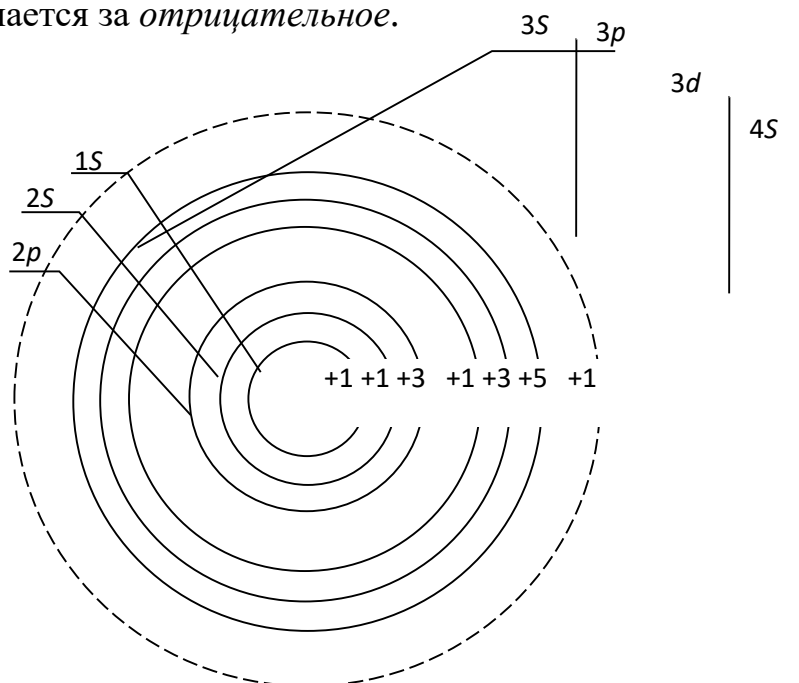


Рис. 3.1. Распределение электронов по оболочкам и подоболочкам в атоме железа

Так как количество положительных и отрицательных спинов в полностью заполненной электронной подоболочке одинаково, то они взаимокompенсируются.

Следовательно, атомы элементов, электронные оболочки и подоболочки которых полностью заполнены электронами, не имеют собственных магнитных моментов, а сами вещества слабо намагничиваются в магнитном поле.

Но у ряда химических элементов такой порядок заполнения электронами оболочек и подоболочек нарушается.

Как видно из рис. 3.1, у атома железа не заполнена полностью подболочка $3d$, на которой находится всего 6 электронов вместо 10, а уже заполнена следующая, валентная для железа, подболочка $4s$.

Пять из шести электронов подболочки $3d$ вращаются в одном направлении, создавая положительные спины электронов. Шестой электрон вращается в направлении обратном, создавая противоположно направленный спин – отрицательный.

Таким образом в подболочке $3d$ атома железа существует 4 нескомпенсированных спинов электронов, которые, суммируясь, вызывают появление магнитного момента у атома.

Наличие нескомпенсированных спинов электронов в различных подболочках наблюдается и у атомов ряда других элементов: кобальта, никеля, марганца и др.

Электроны, находящиеся в наружной валентной подболочке, служить источником магнитных моментов не могут, т. к. при образовании молекул и кристаллов их магнитные моменты компенсируются спинами валентных электронов соседних атомов.

Учитывая вышеизложенное, можно сформулировать первое условие возникновения ферромагнетизма у веществ.

Для того чтобы вещество хорошо намагничивалось и в нем создавалась большая магнитная индукция, необходимо, чтобы у атомов этого вещества существовали нескомпенсированные спины электронов в подболочках, предшествующих валентной.

Однако выполнения только одного этого условия недостаточно для того, чтобы вещество являлось ферромагнетиком. Связано это с тем, что в любом объеме вещества, с которым приходится иметь дело на практике, содержится большое количество атомов. Электроны атомов образуют многоэлектронный коллектив.

Между атомами происходит постоянный обмен электронами. При обмене между электронами соседних атомов возникает сильное электростатическое взаимодействие. Данное взаимодействие получило название «обменного», а энергия этого взаимодействия называется «обменной энергией».

Такое электростатическое взаимодействие электронов соседних атомов способно ориентировать нескомпенсированные спины электронов определенным образом. Направление ориентации спинов электронов соседних атомов определяется значением обменной энергии.

График зависимости обменной энергии от отношения K приведен на рис. 3.2.

Известно, что обменная энергия зависит от отношения

$$k = \frac{a}{r},$$

где a – расстояние между центрами соседних атомов; r – радиус электронной подболочки с некомпенсированными спинами электронов.

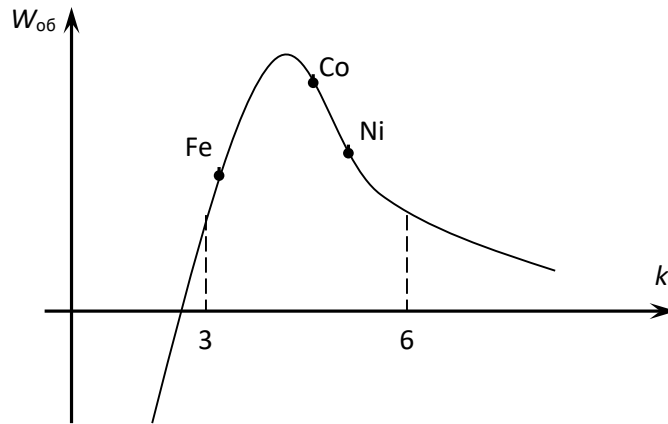


Рис. 2.2. Зависимость «обменной» энергии от геометрических размеров кристаллической решетки вещества

При $k > 3$ обменная энергия положительна, но настолько мала, что спины электронов соседних атомов ориентируются хаотично, вещества с такой ориентацией спинов намагничиваются слабо и относятся к классу парамагнетиков. С уменьшением k значение обменной энергии возрастает, что заставляет спиновые моменты соседних атомов ориентироваться параллельно друг другу. Это приводит к тому, что спиновые моменты атомов складываются и возникает самопроизвольное намагниченное состояние вещества. При $k = 3,5$ обменная энергия достигает максимума и при дальнейшем сближении атомов начинает убывать. Когда $k < 3$, обменная энергия становится отрицательной. При отрицательной обменной энергии энергетически выгодным становится взаимопротивоположная ориентация спинов электронов соседних атомов, приводящая к их взаимной компенсации. Вещества с отрицательной обменной энергией называются антиферромагнетиками.

Таким образом, второе условие возникновения ферромагнетизма в веществе заключается в том, что оно должно обладать достаточно большей положительной обменной энергией, т. е. отношение k должно находиться в диапазоне $3 < k < 6$.

При выполнении обоих условий в веществе возникает внутреннее магнитное поле, характеризуемое намагниченностью M , определяемой в соответствии с уравнением (3.1).

3.3. Классификация веществ по магнитным свойствам

В 3.2. показано, что магнитные свойства веществ зависят от наличия или отсутствия нескомпенсированных спиновых моментов в электронных подболочках атомов и от длины межуатомных расстояний между соседними атомами (отношение k).

По способности намагничиваться под воздействием магнитного поля все вещества подразделяются на следующие большие группы: диамагнетики, парамагнетики, магнетики.

Магнетики, в свою очередь, подразделяются на ферромагнетики, ферримагнетики и антиферромагнетики. Краткая характеристика каждой из групп материалов приведена в табл. 3.1.

Таблица 3.1.

Классификация веществ по магнитным свойствам

Группа	Ориентация спиновых электронов соседних атомов	Краткая характеристика свойств
Диамагнетики	нескомпенсированные спины электронов, отсутствуют	при отсутствии намагничивающего поля ($H=0$), намагниченность $M=0$. При $H \neq 0$ появляются индуцированные магнитные моменты и $M \neq 0$. Отсюда $\chi = -10^{-6}$, а $\mu_r < 1$. Магнитная проницаемость μ_r не зависит от напряженности поля
Парамагнетики	ориентация спиновых моментов соседних атомов хаотичная	при $H=0$, у атомов существуют собственные магнитные моменты m , но намагниченность $M=0$, из-за хаотической ориентации спиновых моментов, $10^{-6} < \chi < 10^{-3}$. Магнитная проницаемость $\mu_r > 1$, но не значительно и не зависит от напряженности магнитного поля

Продолжение табл. 3.1

Группа	Ориентация спиновых электронов соседних атомов	Краткая характеристика свойств
Ферромагнетики	ориентация спиновых моментов параллельная	при $H=0$, у атомов существуют собственные магнитные моменты m , возникают области с самопроизвольной намагниченностью ($M \neq 0$). Но в целом намагниченность всего атома вещества равна 0. $\chi = 10^5 \dots 10^7$. Магнитная проницаемость $\mu_r \gg 1$ и ее значение зависит от напряженности магнитного поля
Ферримагнетики (ферриты)	антипараллельная ориентация магнитных моментов разного значения	материалы, получаемые спеканием оксидов железа, никеля, цинка, марганца и других металлов, являются

		нескомпенсированными антиферромагнетиками. При $H=0$ существуют области самопроизвольного намагничивания с $M \neq 0$. В целом вещество остается ненамагниченным. Магнитная проницаемость $\mu_r \gg 1$ и зависит от напряженности поля
Антиферромагнетики	антипараллельная ориентация спиновых моментов соседних атомов	атомы имеют собственные магнитные моменты, одинаковые по значению и противоположно направленные. При $H=0$, намагниченность $M=0$, т. к. эти вещества обладают отрицательной обменной энергией. Легированием других веществ могут быть превращены в ферромагнетики.

Из таблицы видно, что наиболее высокими свойствами обладают ферромагнетики и ферримагнетики, в которых можно создавать значительно большие магнитные индукции, чем в других материалах, из-за наличия у них самопроизвольной намагниченности.

3.4. Строение ферромагнетиков

Все процессы намагничивания и перемангничивания обусловлены магнитным взаимодействием атомов. Это взаимодействие приводит к тому, что при отсутствии внешнего магнитного поля ферромагнитные тела разбиваются на области с самопроизвольным намагничиванием, называемые *доменами*.

Объем домена колеблется в пределах $10^{-1} \div 10^{-6} \text{ см}^3$. Каждый из доменов намагничен до насыщения в направлении, отличном от направления намагниченности соседних доменов. Насыщенное магнитное состояние домена оценивается намагниченностью насыщения M_S , которая определяется из следующего уравнения:

$$M_S = \lim_{V \rightarrow 0} \left(\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{V} \right). \quad (3.6)$$

Направление намагниченности каждого из доменов устанавливается таким, чтобы магнитные моменты их взаимокompенсировались, и намагниченность ферромагнетика в целом равнялась нулю при отсутствии внешнего намагничивающего поля.

Рассмотрим подробнее, почему это происходит. Допустим, что ферромагнетик имеет однодоменную структуру, при которой магнитные моменты атомов ориентированы параллельно.

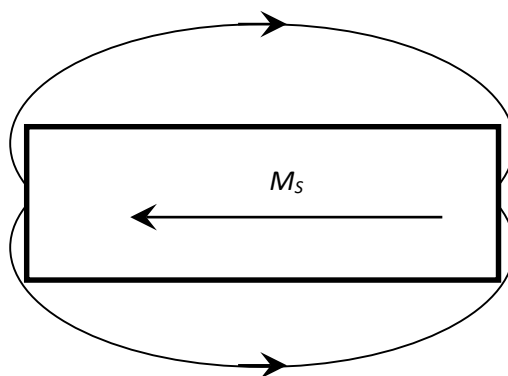


Рис. 3.3. Однодоменная структура строения ферромагнетика

При такой структуре строения (рис. 3.3.) силовые линии магнитного поля замыкаются через окружающее образец воздушное пространство, и, следовательно, в нем возникает размагничивающее поле напряженностью:

$$H_p = -N \cdot M_S, \quad (3.7)$$

где N – коэффициент размагничивания, значение которого зависит от структуры строения, ферромагнетика (числа доменов).

В отсутствие внешнего магнитного поля свободная магнитостатическая энергия образца в собственном размагничивающем поле зависит от коэффициента размагничивания и может быть определена из уравнения

$$W_{ст} = -0,5N \cdot H_p \cdot M_S = 0,5N \cdot M_S^2. \quad (3.8)$$

Так как коэффициент размагничивания имеет наибольшее значение при однодоменной структуре строения, то и свободная магнитостатическая энергия максимальна именно при такой структуре строения.

Известно, что при отсутствии внешних источников энергии вещество стремится приобрести такую структуру строения, при которой его собственная энергия была бы минимальна. С этой точки зрения однодоменная структура строения для ферромагнетика является энергетически невыгодной, так как в этом случае он обладает максимальной свободной магнитостатической энергией.

Стремясь уменьшить значение магнитостатической энергии, ферромагнетик начинает самопроизвольно делиться на области со спонтанным намагничиванием.

Энергетически более выгодными являются структуры с двумя и четырьмя доменами, рис. 3.4.

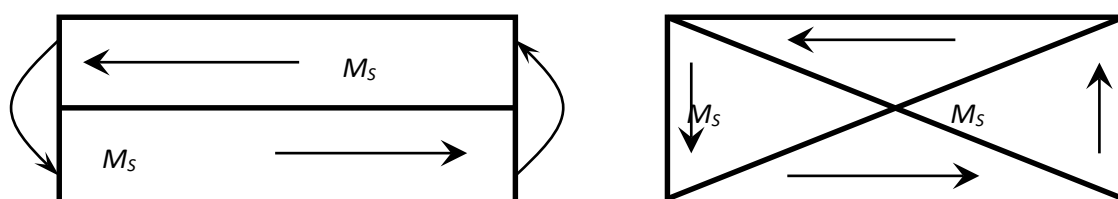


Рис. 3.4. Двухдоменная и четырехдоменная структура строения ферромагнетика

При двухдоменной структуре коэффициент размагничивания и, следовательно, свободная магнитостатическая энергия приблизительно в два раза меньше, чем при однодоменной.

Энергетически еще более выгодной является структура с четырьмя доменами. При самопроизвольном разбиении образца на 4 домена в каждом из них устанавливаются такие направления спонтанной намагниченности, при которых магнитный поток замыкается внутри образца и размагничивающее поле отсутствует, $H_p = 0$.

При переходе от домена к домену направление намагниченности изменяется плавно в пределах слоя, расположенного между соседними доменами. Этот слой получил название стенки, или границы (рис. 3.5).

В пределах границы происходит постепенный поворот спинов от одного направления намагниченности к другому. Толщина стенок соответствует определенному значению общей свободной энергии стенки, которая складывается из обменной энергии, магнитоупругой энергии и энергии магнитной анизотропии.

Спонтанное деление образца ферромагнетика на домены приводит к уменьшению свободной магнитостатической энергии образца. Но одновременно возрастает количество стенок между доменами, что приводит к увеличению свободной энергии, равной сумме свободных энергий всех стенок.

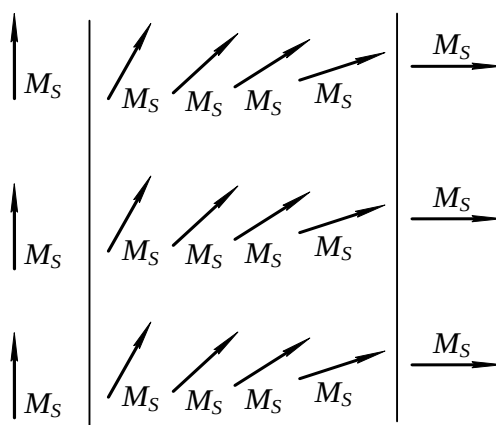


Рис. 3.5. Схема поворота спинов атома в пределах границы домена

Деление ферромагнетика на домены будет продолжаться до тех пор, пока затраты энергии на создание нового домена, равные свободной энергии стенки, не сравняются с уменьшением магнитостатической энергии. Дальнейшее деление ферромагнетика на домены становится энергетически невыгодным.

Доменная структура строения ферромагнетика сохраняется только до определенной температуры, называемой температурой Кюри, или точкой Кюри.

Точка Кюри соответствует равенству кинетической энергии теплового движения и обменной энергии. Поэтому у разных ферромагнетиков точка Кюри различна. Так, у железа она равна 770°C , у никеля – 358°C , у кобальта – 1127°C .

При температуре выше, чем точка Кюри, кинетическая энергия теплового движения становится достаточной для преодоления ориентирующего действия обменной энергии, и состояние самопроизвольной намагниченности доменов нарушается. Ферромагнетик превращается в парамагнетик.

3.5. Явления магнитной анизотропии и магнитострикции

Практически все ферромагнетики состоят из большого числа кристаллов. Кристаллы различных материалов имеют разные пространственные кристаллические решетки, в узлах которых находятся атомы вещества. Так, кристалл железа представляет собой куб, в вершинах и в центре которого располагаются атомы железа (рис. 3.6, а).

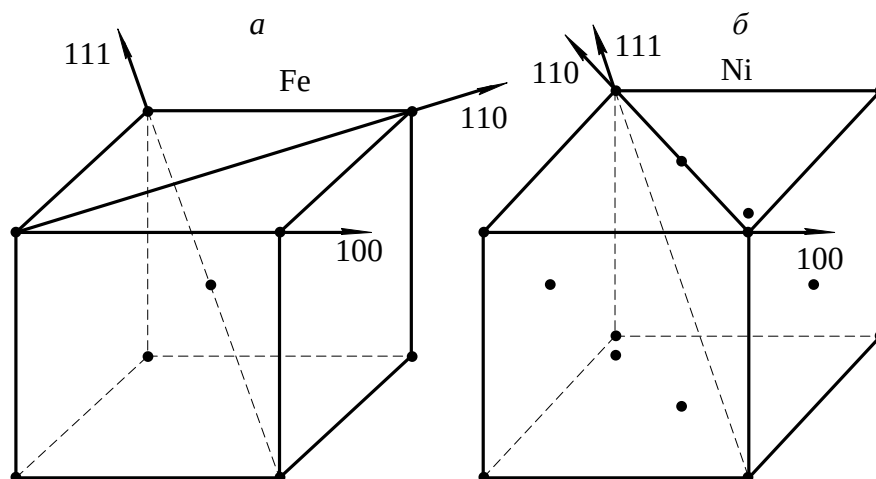


Рис. 3.6. Основные кристаллографические направления железа и никеля

В кристаллах железа различают три основных кристаллографических направления:

- 100 – направление по ребру куба;
- 110 – направление по диагонали грани куба;
- 111 – направление по диагонали грани самого куба.

Если ферромагнетик намагничивать по различным кристаллографическим направлениям, то состояние насыщения будет достигаться при разных значениях напряженности магнитного поля.

Состояние магнитного насыщения железа достигается при наименьшей напряженности намагничивающего поля, если намагничивание производится по направлению 100, т. е. по ребру куба. И наоборот, насыщение железа происходит

при максимальной напряженности намагничивающего поля, если намагничивание производится по кристаллографической оси 111.

Направление 100 называется *осью легкого намагничивания*, направление 111 – *осью трудного намагничивания*.

Если железо намагничивать по кристаллографическому направлению 110, то насыщение материала достигается при меньшей напряженности намагничивающего поля, чем при намагничивании по оси 111 и большей, чем при намагничивании по кристаллографическому направлению 100. Кристаллографическое направление 110 называется *осью среднего намагничивания*. Кривые намагничивания для разных направлений железа приведены на рисунке 3.7.

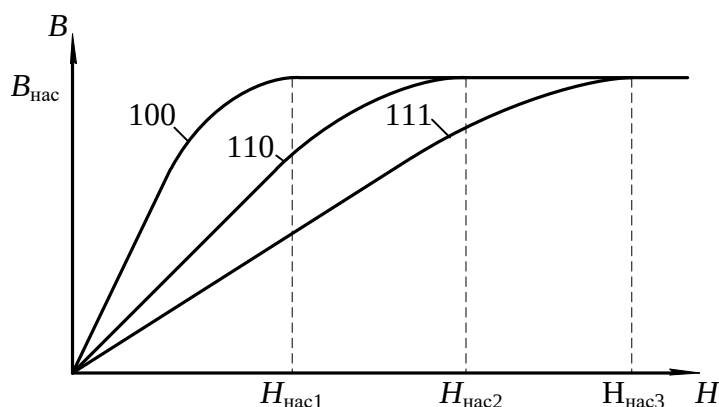


Рис. 3.7. Кривые намагничивания для разных направлений железа

В отличие от железа, у кристалла никеля атомы располагаются в вершинах и в центрах каждой грани куба. Такое расположение атомов в кристалле никеля приводит к изменению осей легкого и трудного намагничивания. У никеля осью легкого намагничивания является направление 111, а осью трудного намагничивания – кристаллографическое направление 100 (рис. 3.6, б). Направление среднего намагничивания у никеля остается таким же, что и у железа – 110.

Различие магнитных свойств у ферромагнетиков при намагничивании по различным кристаллографическим направлениям называется *магнитной анизотропией*.

Явление магнитной анизотропии учитывается при изготовлении холоднокатаных анизотропных текстурованных электротехнических сталей. У таких сталей оси легкого намагничивания всех кристаллов совпадают с направлением прокатки. Применение анизотропных холоднокатаных сталей позволяет уменьшить вес электрических машин примерно на одну треть, по сравнению с электрическими машинами такой же мощности, в которых используется изотропная горячекатаная сталь.

Намагничивание ферромагнетиков сопровождается изменением линейных размеров образца за счет магнитного взаимодействия электронов, вызывающего изменение расстояний и деформацию кристаллической решетки. Это явление называется *магнитострикцией*. Относительное изменение линейных размеров ферромагнетика при намагничивании оценивается коэффициентом магнитострикции:

$$\lambda = \pm \frac{\Delta l}{l},$$

где Δl – удлинение образца ферромагнетика при намагничивании; l – исходная длина образца до намагничивания.

Значение и знак коэффициента магнитострикции зависят от направления намагничивания и вида ферромагнетика.

Так, при намагничивании кристалла железа по оси легкого намагничивания происходит его удлинение вдоль этой оси и, следовательно, коэффициент магнитострикции является положительным.

Если же железо намагничивать по оси трудного намагничивания, то происходит укорочение образца вдоль данной оси, т. е. коэффициент магнитострикции отрицателен.

В отличие от железа, у кристаллов никеля коэффициент магнитострикции отрицателен при намагничивании по оси легкого намагничивания 111, и положителен, если намагничивать кристалл по оси трудного намагничивания.

Удлинение или сжатие ферромагнетика в направлении намагничивающего поля сопровождается сжатием или удлинением, соответственно, в поперечном направлении.

Явление магнитострикции обнаруживается и во влиянии внешних механических воздействий на магнитные свойства ферромагнетиков.

Растяжение ферромагнетика внешними механическими силами вызывает облегчение, а сжатие – затруднение процесса намагничивания, если у ферромагнетика положительный коэффициент магнитострикции. Для материалов с отрицательным коэффициентом магнитострикции сжатие приводит к облегчению, а растяжение – к затруднению процесса намагничивания. Явление магнитострикции широко используется в технике. Например, в области ультразвуковой локации магнитострикционные материалы широко используются как источники ультразвука.

Явление магнитострикции, свойственное магнитным материалам, приводит к тому, что линейные размеры магнитопроводов машин переменного тока колеблются с частотой, равной частоте переменного магнитного поля. Это приводит к возникновению дополнительных механических напряжений в местах

крепления магнитопровода к корпусу электрической машины и появлению шума, что является нежелательным.

3.6. Намагничивание ферромагнетика

Если размагниченный ферромагнетик поместить в магнитное поле, то под воздействием напряженности поля начинается перераспределение магнитных моментов доменов, в результате которого появляется намагниченность ферромагнетика в направлении напряженности намагничивающегося поля.

Внутри ферромагнетика создается магнитная индукция, значение которой определяется намагниченностью ферромагнетика и напряженностью H намагничивающегося поля:

$$B = \mu_0(H + M). \quad (3.9)$$

В ферромагнетиках внутренняя намагниченность значительно больше напряженности намагничивающегося поля ($H > M$). В связи с этим значение магнитной индукции, в основном, определяется внутренней намагниченностью ферромагнетика, а не напряженностью внешнего поля.

Рассмотрим подробнее процесс намагничивания ферромагнетика. На рис. 3.8. приведена основная кривая намагничивания.

Выделим на этой кривой участки, в пределах которых возрастание магнитной индукции обуславливается различными процессами.

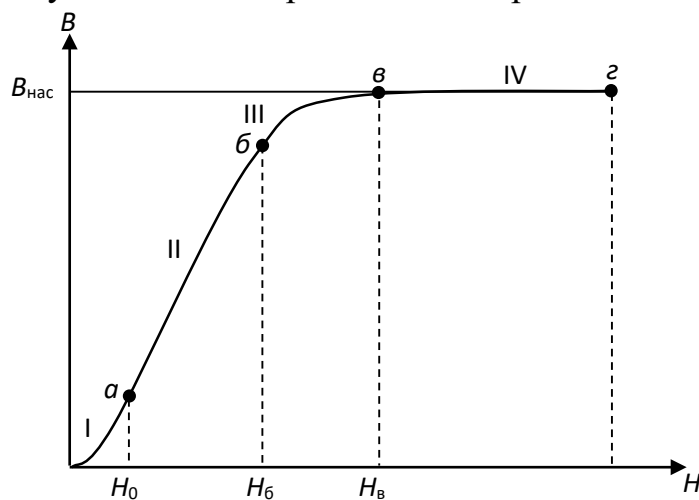


Рис. 3.8. Основная кривая намагничивания ферромагнетика

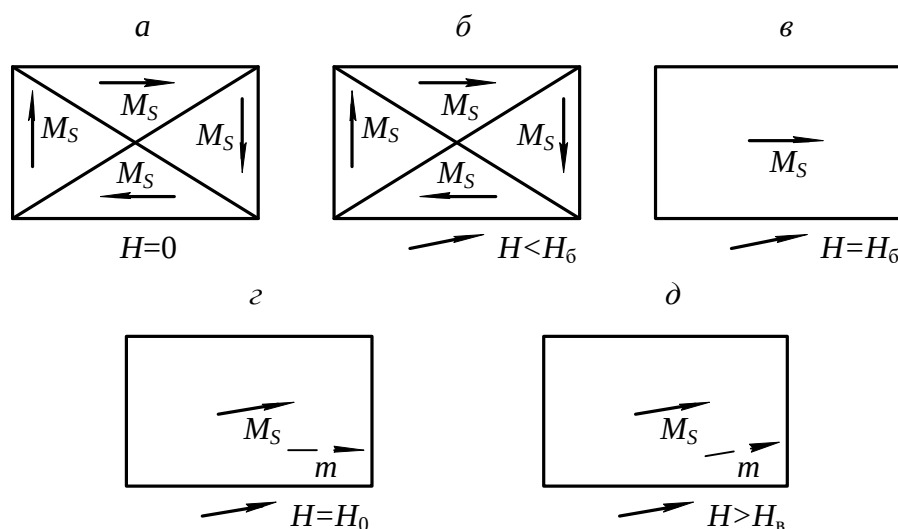


Рис. 3.9. Схема намагничивания ферромагнетика

Из параграфа 3.4. известно, что размагниченный образец ферромагнитного материала при отсутствии магнитного поля ($H = 0$) самопроизвольно разбивается на домены, направление намагниченности каждого из которых такое, что суммарная намагниченность образца в целом равна 0 (рис. 3.9, а).

Намагничиваем образец, плавно увеличивая напряженность магнитного поля. В диапазоне изменения напряженности H от 0 до H_a происходит рост объема (смещение границ) тех доменов, у которых направление собственной намагниченности наиболее близко к направлению напряженности внешнего намагничивающего поля (рис. 3.9, б). Процесс роста домена в этом диапазоне осуществляется вполне упруго и без потерь энергии. Если напряженность поля опять уменьшить до 0, то ферромагнетик вернется в исходное размагниченное состояние (см. рис. 3.9, а).

При возрастании напряженности в диапазоне $H_a < H < H_b$ магнитная индукция за счет продолжающегося смягчения границ доменов с наименьшим углом между собственностью и напряженностью намагничивающегося поля (рис. 3.9, б). Только этот процесс приобретает необратимый характер и связан с потерями энергии. Необратимость процесса на участке II кривой намагничивания (см. рис. 3.8) обусловлена тем, что неоднородные внутренние напряжения, инородные включения, пустоты и дефекты, всегда имеющиеся в материале, препятствуют смещению границ доменов. Наличие препятствий приводит к тому, что при плавном повышении напряженности поля индукция в ферромагнетике изменяется скачкообразно. Скачкообразное изменение индукции вызывает появление микроскопических вихревых токов, при протекании которых происходит нагрев образца, т.е. в материале возникают потери энергии на намагничивание.

Чтобы размагнитить образец после того, как напряженность поля возросла до $H > H_a$, необходимо изменить направление напряженности поля на обратное и опять затратить энергию. Когда напряженность поля $H = H_6$, ферромагнетик приобретает однодоменную структуру строения (рис. 3.9, в), но направление намагниченности отлично от направления напряженности намагничивающегося поля.

Дальнейшее повышение напряженности поля вызывает рост магнитной индукции в образце за счет процесса ориентации магнитных моментов в направлении поля (поворот моментов). Когда направление магнитных моментов домена совпадает с направлением напряженности намагничивающегося поля, рост магнитной индукции практически прекратится с ростом напряженности поля (рис. 3.9, г).

Такое состояние ферромагнетика называется техническим насыщением. Напряженность поля в точке «в» кривой намагничивания обозначается H_s и называется *напряженностью насыщения*.

С дальнейшим ростом напряженности поля ($H > H_s$) наблюдается медленное и весьма незначительное повышение намагниченности за счет парапроцесса, заключающегося в дополнительной ориентации спиновых моментов электронов, направление которых отлично от направления поля из-за теплового движения частиц.

3.7. Свойства ферромагнитных материалов в квазипостоянных магнитных полях

Квазипостоянным магнитным полем называется такое переменное поле, напряженность которого изменяется с частотой, близкой к 0, и амплитудой, равной H_m .

Если предварительно размагниченный образец поместить в квазипостоянное магнитное поле, то при возрастании напряженности поля от 0 до $+H_m$ индукция в образце увеличивается в соответствии с основной кривой намагничивания (участок *OA*, рис. 3.10).

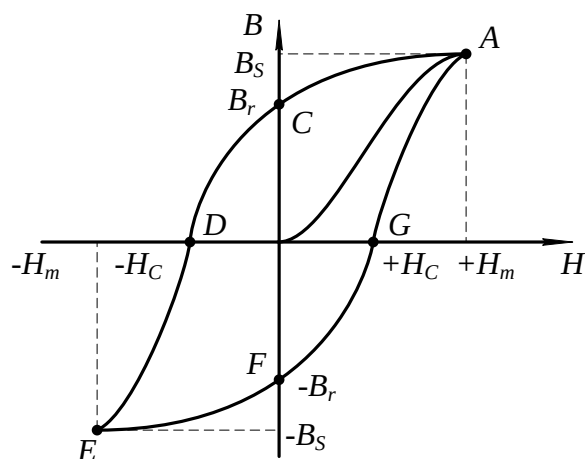


Рис. 3.10. Петля гистерезиса ферромагнетика

После того, как напряженность намагничивающего поля достигнет значения, равного амплитудному, она начинает уменьшаться до 0, вызывая снижение магнитной индукции за счет обратного поворота магнитного момента домена в направлении ближайшей оси легкого намагничивания. Когда напряженность поля станет равной 0, в ферромагнетике сохранится остаточная магнитная индукция B_r (участок AC, см. рис. 3.10). В дальнейшем напряженность намагничивающего поля изменяет свое направление на обратное и становится «отрицательной», вызывая дальнейшее уменьшение магнитной индукции (участок CD, см. рис. 3.10). На этом участке происходит необратимое разделение однодоменной структуры ферромагнетика на ряд доменов с различными направлениями собственных магнитных моментов. Когда напряженность поля H становится равной $-H_C$ (коэрцитивная сила), ферромагнетик приобретает структуру, аналогичную структуре строения до начала намагничивания, а индукция образца становится равной нулю (точка D, см. рис. 3.10).

На участке DE напряженность поля изменяется в пределах от $-H_C$ до $-H_m$. Магнитная индукция в образце возрастает за счет смещения границ доменов и последующей ориентации векторов намагниченности в направлении действия поля.

Достигнув амплитудного значения, напряженность магнитного поля начинает изменяться от $-H_m$ до 0.

Индукция в образце уменьшается до значения, равного остаточной магнитной индукции (участок EF) за счет процесса, аналогичного процессу размагничивания ферромагнетика на участке AC.

При изменении напряженности поля от 0 до $+H_C$ (участок FG) продолжается процесс размагничивания образца аналогично размагничиванию на участке CD. Когда $H = H_C$, индукция в образце равна 0.

Дальнейшее возрастание напряженности поля до амплитудного значения приводит к намагничиванию образца и возрастанию индукции.

Таким образом, зависимость магнитной индукции от напряженности квазипостоянного поля за полный цикл перемагничивания представляет петлю, называемую *петлей гистерезиса*.

Площадь петли гистерезиса пропорциональна потерям на гистерезис.

Если после каждого цикла перемагничивания увеличивать амплитуду напряженности квазипостоянного магнитного поля, то получится семейство петель гистерезиса. Причем большему значению амплитуды напряженности поля будет соответствовать петля с большей амплитудой магнитной индукции и площадью петли (рис. 3.11). Когда напряженность поля достигает значения, при котором наступает насыщение ферромагнетика, площадь петли гистерезиса максимальна. При дальнейшем возрастании амплитуды напряженности площадь петли остается постоянной, а в концах петли появляются прямолинейные участки со слабым возрастанием магнитной индукции.

Петля с наибольшей площадью называется *предельной петлей гистерезиса*.

По предельной петле гистерезиса определяются основные характеристики магнитных материалов, значения которых приводятся в справочниках; индукция технического насыщения, B_s ; напряженность поля, при которой достигается насыщение ферромагнетика, H_s ; остаточная индукция, B_r ; коэрцитивная сила, H_c .

Если через вершины семейства петель гистерезиса провести линию, то полученная кривая $B_m = f(H_m)$ представляет собой основную кривую намагничивания.

По основной кривой намагничивания определяются абсолютная и относительная магнитные проницаемости:

$$\mu_a = \frac{B_m}{H_m}; \quad (3.10)$$

$$\mu_r = \frac{B_m}{(\mu_0 \cdot H_m)}, \quad (3.11)$$

где μ_a – абсолютная магнитная проницаемость.

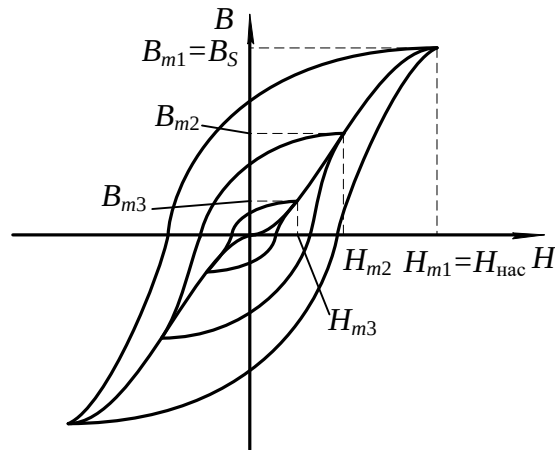


Рис. 3.11. Семейство петель гистерезиса

Определяя значение относительной магнитной проницаемости для каждого значения напряженности намагничивающего поля по основной кривой намагничивания, можно получить зависимость $\mu_r = f(H_m)$, (рис. 3.12).

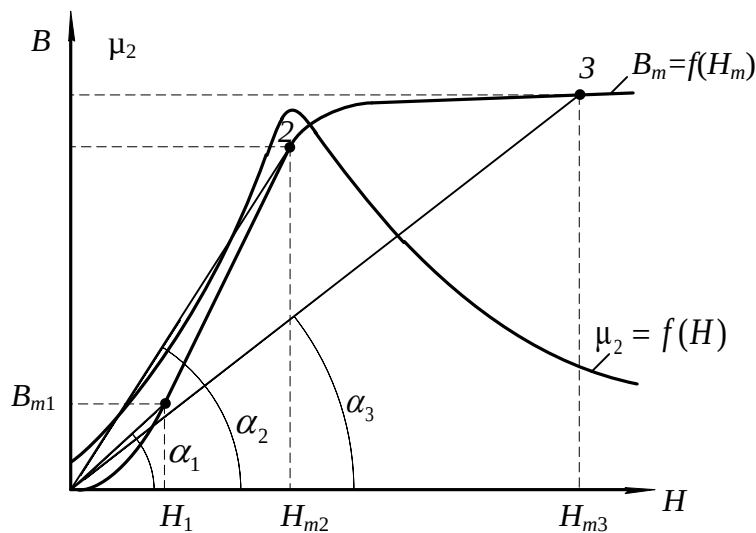


Рис. 3.12. Зависимость относительной магнитной проницаемости от напряженности поля

Как видно из рис. 3.12, относительная магнитная проницаемость с ростом напряженности поля вначале возрастает от $\mu_{нач}$ до μ_{max} , а затем уменьшается. Неоднозначный характер изменения μ_r связан с видом основной кривой намагничивания. Покажем это на примере. Допустим, что необходимо определить проницаемость материала μ_r в точках 1, 2 и 3.

Тогда, в соответствии с формулой (3.11):

$$\mu_{r1} = \frac{B_1}{(\mu_0 \cdot H_1)};$$

$$\mu_{r2} = \frac{B_2}{(\mu_0 \cdot H_2)};$$

$$\mu_{r3} = \frac{B_3}{(\mu_0 \cdot H_3)}.$$

B_1 и H_1 , B_2 и H_2 , B_3 и H_3 с учетом масштабов по индукции и напряженности представляют собой катеты прямоугольных треугольников с вершинами O_{11} , O_{22} и O_{33} соответственно, а отношения B_1/H_1 , B_2/H_2 , B_3/H_3 являются тангенсами углов наклона, образованных прямыми, проведенными из начала координат в точки 1, 2, 3, на кривой намагничивания.

Вследствие переменной крутизны основной кривой намагничивания, угол наклона этих прямых сначала возрастает, затем, когда ферромагнетик входит в состояние насыщения, уменьшается с ростом напряженности намагничивающего поля. Максимальное значение магнитной проницаемости μ_r достигается в той точке кривой намагничивания, в которой прямая, соединяющая эту точку с началом координат, является касательной к кривой намагничивания. Значение магнитной проницаемости в этой точке обозначается $\mu_{r \max}$ и обычно находится в начале участка б – в кривой намагничивания (см. рис. 3.8).

Определение магнитной проницаемости μ_r при напряженности поля $H = 0$ в соответствии с уравнением (3.11) лишено смысла, так как значение относительной магнитной проницаемости в этом случае неопределенно. В связи с этим введено понятие *начальной магнитной проницаемости* $\mu_{r \text{ нач}}$.

З а н а ч а л ь н у ю м а г н и т н у ю п р о н и ц а е м о с т ь принимается предельное значение отношения индукции, деленной на магнитную постоянную, к напряженности при стремлении напряженности магнитного поля к нулю:

$$\mu_{r \text{ нач}} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{H}. \quad (3.12)$$

Практически начальная магнитная проницаемость $\mu_{r \text{ нач}}$ определяется при напряженности поля $H \leq 0,1$ А/м.

Значения начальной $\mu_{r \text{ нач}}$ и максимальной $\mu_{r \max}$ магнитных проницаемостей для каждого магнитного материала приводятся в справочниках.

3.8. Дифференциальная магнитная проницаемость

Неоднозначность зависимости магнитной индукции от напряженности поля существенно усложняет расчет и анализ цепей, содержащих магнитные элементы. С целью упрощения, расчеты и анализ электромагнитных цепей часто ведутся по основной кривой намагничивания $B=f(H)$, что в ряде случаев приводит к существенным ошибкам. Особенно это касается тех ферромагнитных устройств, форма и значение выходного напряжения которых зависят от того, как и в каких пределах изменяется на напряженность магнитного поля. Для таких устройств введена еще одна характеристика магнитного материала – дифференциальная магнитная проницаемость:

$$\mu_{rg} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{dB}{dH}, \quad (3.13)$$

где $\frac{dB}{dH}$ – производная от магнитной индукции по напряженности поля в заданной точке петли гистерезиса.

Если определить μ_{rg} в каждой точке петли гистерезиса, то можно получить зависимость $\mu_{rg}=f(H)$, представленную на рис. 3.13.

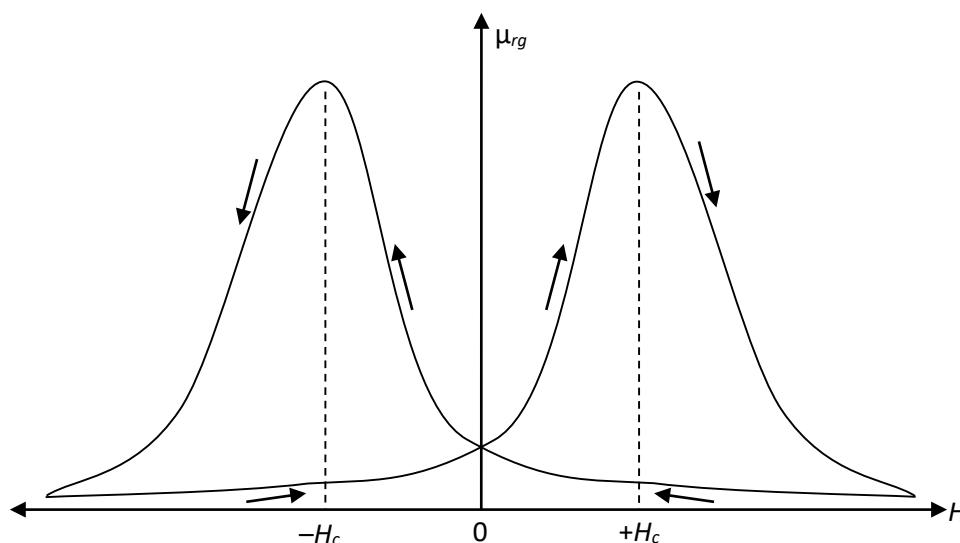


Рис. 3.13. Зависимость дифференциальной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля

Полученная зависимость $\mu_{rg}=f(H)$ за полный цикл перемагничивания представляет собой замкнутую петлю с двумя максимумами. Максимальные значения μ_{rg} достигаются при напряженностях магнитного поля, приблизительно равных коэффициентной силе $H=\pm H_c$. Минимальные значения μ_{rg} соответствуют вершинам предельной петли гистерезиса.

В диапазоне напряженности от 0 до $+H_c$ дифференциальная магнитная проницаемость возрастает до $\mu_{rg\max}$, т. к. возрастает производная от индукции по напряженности (крутизна петли гистерезиса) $\frac{dB}{dH}$ (участок FG , рис. 3.10).

При изменении напряженности поля от $+H_c$ до $+H_m$ μ_{rg} уменьшается из-за уменьшения крутизны петли гистерезиса (участок GA рис. 3.10).

Последующее уменьшение H от $+H_m$ до 0, вызывает медленное возрастание дифференциальной магнитной проницаемости, т. к. крутизна петли гистерезиса на участке AC (рис. 3.10) медленно растет.

Характер зависимости $\mu_{rg}=f(H)$ при отрицательных значениях напряженности аналогичен характеру этой же зависимости при положительных значениях напряженности.

3.9. Свойства ферромагнетиков в переменных магнитных полях

3.9.1. Динамическая петля намагничивания

Когда на магнитный материал воздействует переменное магнитное поле, напряженность которого изменяется с частотой f , то он периодически перемагничивается с той же самой частотой. При таком циклическом перемагничивании зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля представляет собой петлю, которая называется *динамической петлей намагничивания*.

Площадь динамической петли намагничивания больше площади петли гистерезиса, полученной при той же амплитуде напряженности поля. Это объясняется тем, что потери на перемагничивание в переменных магнитных полях больше, чем в квазипостоянных. Если изменять амплитуду напряженности переменного магнитного поля, то можно получить семейство динамических петель намагничивания (рис. 3.14).

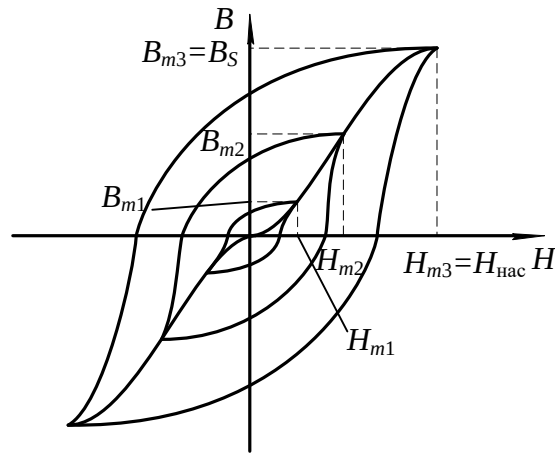


Рис. 3.14. Семейство динамических петель намагничивания

Как видно из рис. 3.14, с увеличением амплитуды напряженности магнитного поля растут амплитуда магнитной индукции и площадь динамической петли намагничивания. После того, как амплитуда напряженности поля достигает значения, при котором наступает насыщение магнитного материала, возрастание индукции и площади петли прекращается, а в вершинах петли появляются линейные участки, практически параллельные оси напряженности поля.

Петля с наибольшей площадью называется *предельной динамической петлей намагничивания*.

Если через вершины семейства динамических петель намагничивания провести линию, то полученная зависимость $B_m = f(H_m)$ называется *основной динамической кривой намагничивания*.

По предельной динамической петле намагничивания и динамической кривой намагничивания определяются основные характеристики магнитных материалов в переменном магнитном поле аналогично определению характеристик этих материалов в квазипостоянном магнитном поле.

3.9.2. Эффект вытеснения магнитного поля при перемагничивании ферромагнетиков в переменном поле

Перемагничивание в переменном магнитном поле приводит к появлению в магнитных материалах вихревых токов, протекание которых вызывает появление эффекта вытеснения магнитного поля из центра к периферии образца.

Рассмотрим подробнее это явление.

Пусть имеется образец магнитного материала площадью сечения S (рис. 3.15).

Можно разбить сечение такого образца на ряд элементарных замкнутых контуров толщиной Δh . Переменный магнитный поток, сцепляясь с каждым из элементарных витков, наводит в них ЭДС.

Под воздействием наведенной ЭДС в каждом из витков начнет протекать макроскопический вихревой ток, который создает свою магнитодвижущую силу $F_{\text{вт}}$, направленную противоположно основной магнитодвижущей силе, создающей переменный магнитный поток в образце. Таким образом, в переменном магнитном поле на магнитный материал воздействуют две магнитодвижущие силы, направленные встречно друг другу. В результате возникает результирующая магнитодвижущая сила (МДС), которая может быть определена как разность двух магнитодвижущих сил:

$$F_p = F - F_{\text{вт}},$$

где F_p – результирующая МДС; F – основная МДС, создаваемая намагничивающим током; $F_{\text{вт}}$ – МДС вихревого тока.

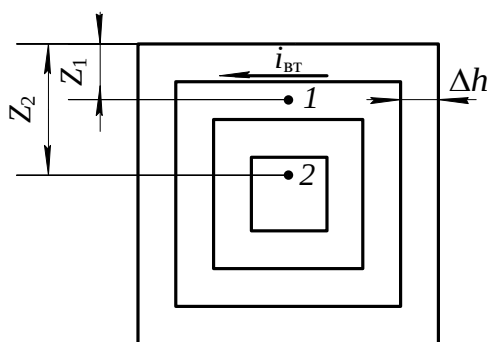


Рис. 3.15. К объяснению эффекта вытеснения

Известно, что значение магнитодвижущей силы вихревого тока в какой-либо точке сечения образца зависит от числа элементарных контуров, охватывающих данную точку. Поскольку точка 2 охвачена большим числом элементарных контуров с вихревыми токами, чем точка 1, то можно сделать вывод, что магнитодвижущая сила вихревого тока возрастает по мере удаления от поверхности образца к центру (рис. 3.16). Экспериментально установлено, что МДС вихревого тока зависит от расстояния до заданной точки от поверхности образца по экспоненциальному закону (кривые $F_{\text{вт}1}$ и $F_{\text{вт}2}$).

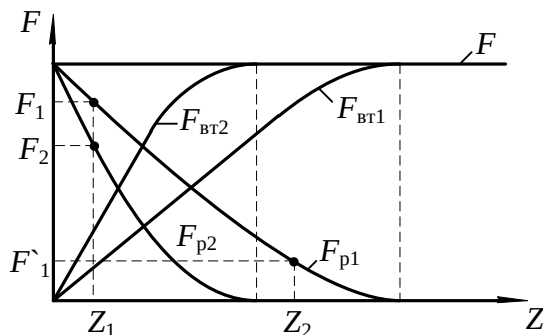


Рис. 3.16. Зависимость изменения результирующей МДС от расстояния до поверхности образца

На рис. 3.16 построены зависимости магнитодвижущих сил от расстояния Z для двух различных частот намагничивающего поля f_1 и f_2 ($f_1 > f_2$). Тогда

результатирующая магнитодвижущая сила по мере удаления от поверхности образца к его центру убывает также по экспоненциальному закону (кривые F_{p1} и F_{p2}). Аналогично результирующей магнитодвижущей силе уменьшается и напряженность магнитного поля по мере удаления от поверхности образца к центру. Зависимость напряженности поля от расстояния определяется из уравнения:

$$H(Z) = H_{\max} \cdot e^{-bz}.$$

где $H_{\max}$ – напряженность поля на поверхности образца; Z – расстояние от поверхности образца; $b = 2\pi \sqrt{\frac{\mu_p \cdot \gamma}{T}}$; C – константа, обусловленная выбором системы единиц; T – период волны напряженности поля; γ – удельная проводимость образца.

В соответствии с изменением напряженности переменного магнитного поля уменьшается индукция в образце с увеличением расстояния от его поверхности. При достаточно большой толщине образца уменьшение индукции может привести к тому, что в центральной части сечения образца индукция будет равна 0, а магнитный поток в ней отсутствовать. Таким образом, за счет макроскопических вихревых токов возникает эффект вытеснения магнитного потока из центральной части сечения образца к периферии. Следовательно, из-за эффекта-вытеснения магнитного поля уменьшается площадь сечения образца, по которой проходит магнитный поток. Уменьшение площади сечения приводит к возрастанию магнитного сопротивления образца и соответствующему падению величины магнитного потока. Зависимость магнитного потока Φ в ферромагнетике от магнитодвижущей силы F и от сопротивления магнитной цепи R_m описывается формулой

$$\Phi = \frac{F}{R_m}.$$

Магнитное сопротивление определяется по уравнению:

$$R_m = \frac{l}{S' \cdot \mu_a},$$

где l – длина и площадь сечения образца ферромагнетика, через которую проходит магнитный поток; μ_a – абсолютная магнитная проницаемость ферромагнетика.

Как видно из вышеприведенных равенств, уменьшение площади, по которой проходит магнитный поток, вызывает возрастание магнитного сопротивления образца. А увеличение магнитного сопротивления уменьшает

магнитный поток в ферромагнетике при неизменной магнитодвижущей силе. Т.к. геометрические размеры образца (длина и площадь сечения) остаются постоянными при намагничивании, то уменьшение магнитного потока к снижению магнитной индукции в образце:

$$B = \frac{\Phi}{S},$$

где S – геометрическая площадь сечения образца.

Для оценки влияния эффекта вытеснения на магнитное сопротивление образца используется характеристика, называемая *глубиной проникновения переменного магнитного поля в ферромагнетик*:

$$Z_1 = \frac{1}{b},$$

где Z_1 – глубина проникновения переменного магнитного поля.

Г л у б и н о й п р о н и к н о в е н и я называется расстояние от поверхности образца, на котором амплитудное значение напряженности магнитного поля уменьшается в 2,7 раза, по сравнению с напряженностью поля на поверхности образца.

Глубина проникновения определяется химическим составом ферромагнетика и частотой магнитного поля.

Для ослабления эффекта вытеснения магнитопроводы электрических машин собирают из отдельных листов электротехнической стали, толщина которых не превышает Z_1 . На поверхности листов стали наносятся электроизоляционные покрытия (лаковые, оксидные и т. п.), обладающие высокими электрическими сопротивлениями, наличие участков с высоким электрическим сопротивлением на пути протекания вихревых токов приводит к их уменьшению и соответственному ослаблению эффекта вытеснения.

При больших толщинах листов, чем Z_1 или цельнолитых магнитопроводах, магнитные свойства ферромагнетиков используются плохо из-за ярко выраженного эффекта вытеснения.

Существенное влияние на эффект вытеснения оказывает частота переменного магнитного поля. Это объясняется тем, что с ростом частоты увеличивается ЭДС $E_{вт}$, наводимая в элементарном контуре, так как значение ее прямо пропорционально частоте. Возрастание ЭДС приводит к увеличению вихревого тока и МДС $F_{вт}$. Поэтому на одном и том же расстоянии Z от поверхности образца (см. рис. 3.16) результирующая магнитодвижущая сила при большей частоте окажется меньше, чем при меньшей частоте намагничивающего тока. Следовательно, с ростом частоты глубина проникновения переменного магнитного поля уменьшается, что вызывает соответствующее снижение среднего значения индукции в образце.

На рис. 3.16 приведены зависимости $F_p = f(Z)$ для двух значений частоты магнитного поля. Зависимость $F_{p2} = f(Z)$ соответствует большей частоте магнитного поля, чем у $F_{p1} = f(Z)$.

3.9.3. Потери на перемагничивание в переменном магнитном поле

Потери мощности на перемагничивание в переменном магнитном поле больше, чем в квазипостоянном поле. Это связано с тем, что в переменном магнитном поле помимо потерь на гистерезис существуют также потери от вихревых токов и добавочные потери.

Потери мощности на перемагничивание определяются следующим образом:

$$P = P_r + P_{BT} + P_g, \quad (3.14)$$

где потери мощности на гистерезис:

$$P_r = \vartheta \cdot f \cdot B_{\max}^n \cdot V, \quad (3.15)$$

то же от вихревых токов:

$$P_{BT} = \xi \cdot f^2 \cdot B_{\max}^2 \cdot V, \quad (3.16)$$

где ϑ – коэффициент, зависящий от марки ферромагнетика; ξ – коэффициент, зависящий от марки ферромагнетика, толщины листа и формы образца; V – объем ферромагнитного образца; P_g – добавочные потери; n – коэффициент, значение которого определяется величиной индукции в ферромагнетике.

Коэффициент n принимает следующие значения:

$$\begin{aligned} n &= 1 && \text{при } B_{\max} \leq 0,1 \text{ Тл;} \\ n &= 1,6 && \text{при } B_{\max} \approx 0,1 - 1,0 \text{ Тл;} \\ n &= 2 - 3 && \text{при } B_{\max} > 1,0 \text{ Тл.} \end{aligned}$$

Природа добавочных потерь полностью не выяснена. Эти потери связаны со структурой строения ферромагнетика, формой и размерами зерен вещества. При практических расчетах потерь их значение принимается примерно равным (0,2 – 0,3) от суммы потерь на гистерезис и вихревые токи:

$$P_g = (0,2 - 0,3) \cdot (P_r + P_{BT}).$$

3.9.4. Потери на перемагничивание в переменном магнитном поле

Определение свойств ферромагнитных материалов может производиться двумя методами. Первый из них заключается в следующем. Изменяется частота магнитного поля, а индукция, создаваемая в образце, поддерживается неизменной ($f = V_{ar}$, $B_m = \text{const}$). При втором методе с изменением частоты поля поддерживается неизменной напряженность магнитного поля ($f = V_{ar}$, $H_m = \text{const}$).

С увеличением частоты переменного магнитного поля, при условии постоянства амплитуды магнитной индукции, в образце $B_m = \text{const}$, форма динамической петли приближается к эллипсу, вытянутому по оси H (рис. 3.17).

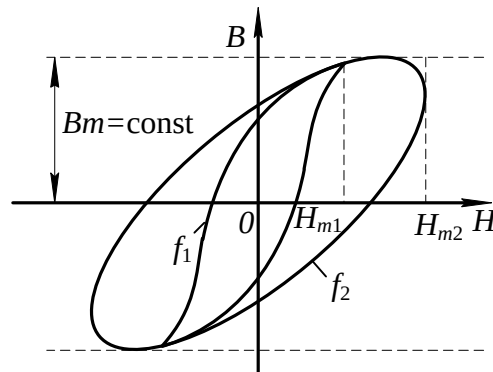


Рис. 3.17. Семейство динамических петель намагничивания

Площадь динамической петли с ростом частоты увеличивается пропорционально потерям мощности на перемагничивание.

Определив значения относительной магнитной проницаемости в вершинах семейства динамических петель намагничивания и потери на перемагничивание, можно построить зависимости $\mu_r = F(f)$ и $P = F(f)$. Эти зависимости приведены на рис. 3.18.

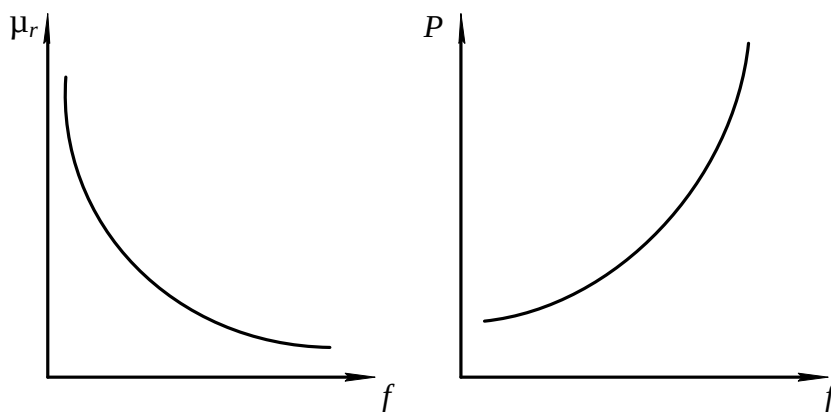


Рис. 3.18. Зависимости $\mu_r = F(f)$

Из рис. 3.18 видно, что с ростом частоты относительная магнитная проницаемость уменьшается. Это явление можно объяснить следующим. С возрастанием частоты переменного магнитного поля уменьшается среднее значение индукции в образце за счет усиления эффекта вытеснения магнитного поля.

Для того чтобы компенсировать уменьшение индукции, необходимо увеличивать напряженность намагничивающего поля. А так как

$$\mu_r = \frac{B_m}{H_m \cdot \mu_0},$$

то относительная магнитная проницаемость μ_r уменьшается с ростом частоты из-за увеличения амплитуды напряженности поля H_m .

При неизменной магнитной индукции характер изменения потерь мощности на перемагничивание определяется зависимостью этих потерь от вихревых токов. А так как потери мощности пропорциональны квадрату частоты переменного поля, то и зависимость этих потерь в ферромагнетике имеет квадратичный характер от изменения частоты (см. рис. 3.18).

Если увеличивать частоту переменного магнитного поля, поддерживая постоянной его напряженность, то форма динамической петли приближается к эллипсу, а амплитуда магнитной индукции уменьшается (рис. 3.19).

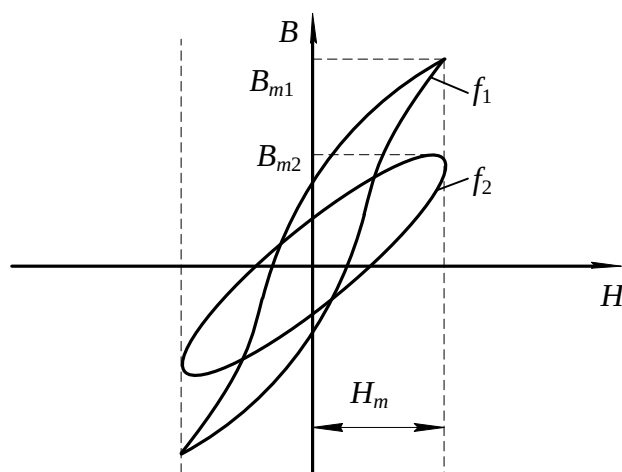


Рис. 3.19. Семейство динамических петель намагничивания при $H_m = \text{const}$

Определив по семейству динамических петель намагничивания значения магнитной проницаемости μ_r и потери мощности на перемагничивание, строим зависимости $\mu_r = F(f)$ и $P = F(f)$ (рис. 3.20).

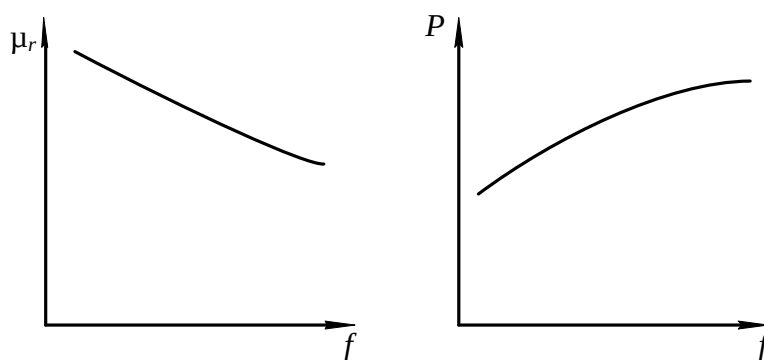


Рис. 3.20. Зависимости $\mu_r = F(f)$ и $P = F(f)$

С ростом частоты относительная магнитная проницаемость ферромагнетика уменьшается, но в меньших пределах, по сравнению с пределом изменения ее при $B_m = \text{const}$ в одном и том же интервале изменения частоты. Это объясняется тем, что с ростом частоты уменьшается амплитуда магнитной индукции ферромагнетика из-за усиления эффекта вытеснения. Электродвижущая сила, наводимая в элементарном контуре $E_{\text{вт}}$, зависит от индукции B_m и частоты f магнитного поля:

$$E_{\text{вт}} \approx S \cdot B_m \cdot f ,$$

где S – поперечное сечение образца.

Из приведенного уравнения видно, что электродвижущая сила вихревого тока при неизменной напряженности поля возрастает с увеличением частоты медленнее, чем при постоянной амплитуде магнитной индукции, так как рост ЭДС за счет частоты частично компенсируется ее уменьшением из-за снижения магнитной индукции. Медленное возрастание электродвижущей силы, а следовательно, и вихревого тока, протекающего по элементарному контуру, приводит к тому, что эффект вытеснения при неизменной амплитуде напряженности выражен менее ярко, чем при $B_m = \text{const}$.

Поэтому относительная магнитная проницаемость изменяется в меньшем диапазоне по сравнению со случаем, когда магнитная индукция поддерживалась неизменно.

Анализ уравнений (3.15, 3.16) показывает, что потери на гистерезис и вихревые токи возрастают незначительно с повышением частоты, так как их рост с повышением частоты частично компенсируется за счет уменьшения магнитной индукции в образце. Таким образом, потери на перемагничивание ферромагнетика в целом медленно увеличиваются с ростом частоты магнитного поля.

3.10. Индукционный метод определения параметров магнитных материалов с использованием осциллографа

Общие сведения

В связи с тем, что невозможно с достаточной степенью точности рассчитать характеристики магнитных материалов при намагничивании в переменном поле, широко используются экспериментальные методы их определения.

В настоящее время разработаны и используются на практике различные методы испытаний ферромагнитных материалов в переменном магнитном поле.

Основными из них являются:

- индукционный с использованием амперметра и вольтметра;
- индукционный с использованием фазочувствительного вольтметра (феррометр);
- индукционный с использованием осциллографического способа измерения (феррограф);
- индукционный с использованием компенсатора переменного тока;
- параметрический (мостовой).

При испытаниях индукционными методами измеряются ЭДС, индуцируемые в измерительных обмотках, и токи, протекающие по намагничивающим обмоткам, намотанным на образцах исследуемого магнитного материала.

Измерение ЭДС, пропорциональной магнитной индукции и намагничивающего тока, пропорционально магнитодвижущей силе намагничивающей обмотки, осуществляется с помощью либо показывающих приборов (амперметров и вольтметров) либо электронных осциллографов либо компенсаторов переменного тока.

Наиболее простым из индукционных методов является метод с использованием амперметра и вольтметра для определения магнитной проницаемости и потерь в образцах, основной динамической кривой намагничивания и динамических петель намагничивания. Недостатком этого метода является погрешность при перемагничивании материала до индукции свыше 1,2 Тл из-за отклонения формы кривой индукции от синусоидальной.

Наиболее точным из индукционных методов испытания магнитных материалов является компенсационный, основанный на измерении напряжений, пропорциональных индукций и напряженности магнитного поля с помощью компенсаторов переменного напряжения. С помощью этого метода определяется зависимости индукции от напряженности поля, потери на перемагничивание и т. д. Достоинствами способа являются полнота информации, высокая точность измерения, широкий диапазон измерения измеряемых величин. Недостатки заключаются в большой длительности процесса измерения, сложности и высокой стоимости аппаратуры.

Параметрический (мостовой) метод испытаний магнитных материалов, обеспечивающий высокую точность измерения в широком частотном диапазоне, заключается в определении индуктивности и сопротивления катушки с испытуемым образцом путем уравнивания мостовой схемы изменением двух переменных параметров. Метод позволяет исследовать зависимости максимальной индукции от максимального значения напряженности поля, определять магнитную проницаемость, потери на перемагничивание и составляющие комплексного магнитного сопротивления. В основном мостовой метод предназначен для определения характеристик в слабых полях, когда

индукция в образце не превышает 80 % от индукции насыщения исследуемого материала.

Достоинствами данного метода являются высокая точность измерения, возможность определения практически всех характеристик, широкий частотный диапазон испытаний.

Наиболее удобным и наглядным методом исследования динамических характеристик магнитных материалов является индукционный с использованием осциллографа, суть которого заключается в измерении электрических напряжений, пропорциональных магнитной индукции и напряженности поля, с помощью электронно-лучевого осциллографа. Этот метод используется для измерения показателей и визуального наблюдения основной динамической кривой намагничивания, семейств динамических петель намагничивания, определения потерь на перемагничивание, дифференциальной магнитной проницаемости, абсолютной и относительной магнитных проницаемостей в диапазоне частот магнитного поля от 20 Гц до нескольких десятков кГц.

Основной недостаток этого метода заключается в сравнительно высокой погрешности используемого средства регистрации, составляющей несколько процентов.

Вышеперечисленные достоинства осциллографического метода измерения, обусловили его использование для исследования свойств магнитных материалов в лабораторной работе.

Рассмотрим более подробно суть этого метода.

Принципиальная электрическая схема установки для исследования магнитных материалов индукционным методом с использованием электронно-лучевого осциллографа приведена на рис. 3.21.

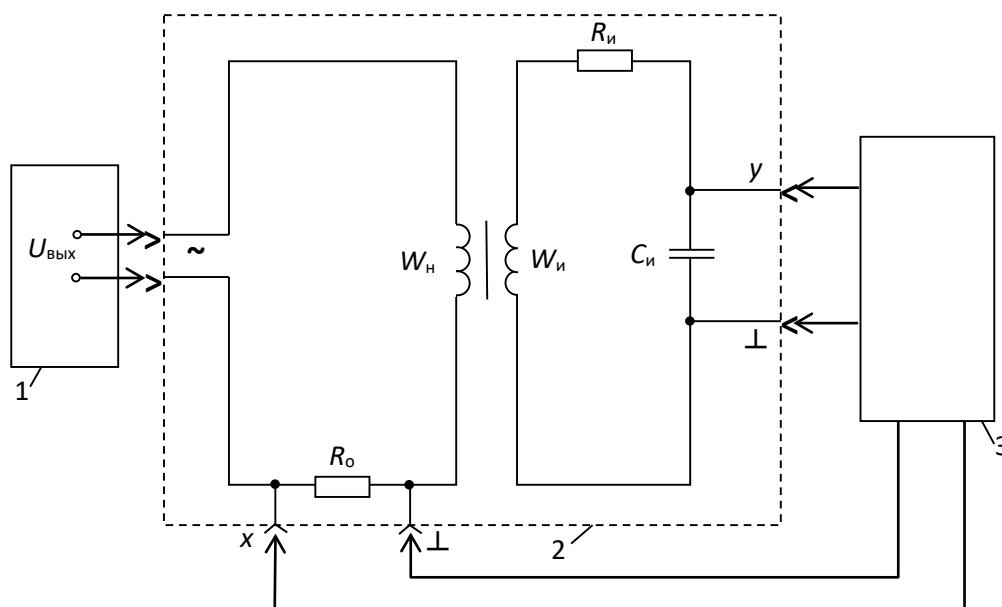


Рис. 3.21. Принципиальная электрическая схема установки:
1 – звуковой генератор; 2 – исследуемый образец; 3 – электронно-лучевой осциллограф

Для обеспечения необходимой точности измерений лучше всего применять образцы, в которых исключено влияние воздушных зазоров и рассеяния магнитного тока и в которых напряженность поля во всех точках образца практически одна и та же.

Чтобы выполнить данные требования, используются кольцевые (тороидальные) образцы и образцы в виде стержней с различным отношением длины к поперечному сечению.

Кольцевые образцы, намагничиваемые по замкнутому контуру, наиболее широко применяются для испытания магнитных материалов с максимальной напряженностью магнитного поля до 50 кА/м. Площадь сечения образца должна быть постоянной по всей длине. Разность между наибольшей и наименьшей площадями сечения допускается не более 1 %. Кольцевые образцы листовых и ленточных материалов изготавливают сборкой из штампованных и точеных колец или спиральной навивкой. Ферритовые образцы изготавливаются прессованием.

Внешний диаметр образца не должен превышать внутренний более чем в 1,3 раза. Это объясняется тем, что в кольцевых образцах с большим отношением внешнего диаметра к внутреннему наблюдается сильная неравномерность намагничивания, приводящая к значительным погрешностям при исследовании.

В работе исследуются образцы из различных магнитных материалов тороидальной формы, на каждом из которых намотано по две обмотки: намагничивающая W_H и измерительная W_H .

Последовательно с намагничивающей обмоткой включено активное сопротивление R_o , а к зажимам измерительной обмотки подключена интегрирующая цепь, состоящая из пассивных элементов: активного сопротивления R_H и конденсатора емкостью C_H .

При подаче на зажим «~» выходного напряжения звукового генератора $U_{\text{вых}}$ по намагничивающей обмотке образца начнет протекать намагничивающий ток i_H , который создает магнитодвижущую силу, вызывающую появление в образце магнитного поля.

Мгновенное значение магнитодвижущей силы F_t связано с мгновенным значением напряженности поля в любой точке образца H_t следующим соотношением:

$$F_t = i_H \cdot W_H = 2\pi \cdot r_{\text{cp}} \cdot H_t, \quad (3.17)$$

где i_H – мгновенное значение намагничивающего тока; r_{cp} – средний радиус кольцевого образца, равный

$$r_{cp} = \frac{r_{вш} + r_{вн}}{2},$$

где $r_{вш}$ – внешний радиус сердечника образца; $r_{вн}$ – внутренний радиус сердечника образца.

Из уравнения (3.17) выразим H_t через намагничивающий ток. Получим:

$$H_t = \frac{i_H \cdot W_H}{2\pi \cdot r_{cp}}. \quad (3.18)$$

Из выражения (3.18) видно, что мгновенное значение напряженности магнитного поля в любой точке образца прямопропорционально намагничивающему току i_H .

Таким образом, измерив значение намагничивающего тока и зная число витков намагничивающей обмотки и средний радиус образца, можно определить по уравнению (3.18) мгновенное значение напряженности магнитного поля.

Преобразовав выражение (3.18), получим уравнение для амплитудных значений напряженности поля и намагничивающего тока.

$$H_m = \frac{I_{mH} \cdot W_H}{2\pi \cdot r_{cp}}. \quad (3.19)$$

Учитывая, что отклонение луча в электронно-лучевом осциллографе пропорционально значению напряжения, подаваемого на вход усилителя, возникает необходимость преобразования намагничивающего тока в напряжение. Это осуществляется последовательным включением с намагничивающей обмоткой эталонного активного сопротивления R_0 (рис. 3.21). При протекании тока i_H по сопротивлению R_0 , на последнем создается падение напряжения

$$U_x = R_0 \cdot i_H.$$

Амплитудное значение этого напряжения

$$U_{mx} = R_0 \cdot I_H. \quad (3.20)$$

Подставив в уравнение (3.19) вместо тока I_{mH} его выражение из (3.20), получим

$$H_m = \frac{W_H}{2\pi \cdot r_{cp} \cdot R_0} \cdot U_{mx}. \quad (3.21)$$

Из уравнения (3.21) видно, что если на вход «х» падать напряжение U_{mx} с сопротивления R_0 , то отклонение луча осциллографа по горизонтальной оси прямопропорционально напряженности магнитного поля в образце.

Магнитодвижущая сила тока i_n создает в сердечнике образца магнитный поток, который наводит в измерительной наводке ЭДС

$$e = -W_n \cdot \frac{d\Phi_t}{dt} = -W_n \cdot S \cdot \frac{dB_t}{dt}. \quad (3.22)$$

где W_n – число витков измерительной обмотки; Φ_t – мгновенное значение магнитного потока в сердечнике образца; S – площадь поперечного сечения сердечника образца; B_t – мгновенное значение магнитной индукции в сердечнике образца.

Чтобы получить на экране осциллографа динамическую петлю намагничивания надо на вход «у» электронно-лучевого осциллографа подать напряжение, которое должно быть пропорционально магнитной индукции, создаваемой в образце. С этой целью измерительная обмотка образца подсоединяется по входу интегрирующей цепи с пассивными элементами R_n и C_n (рис. 3.21).

Тогда мгновенное значение тока, протекающего по интегрирующей цепи, определяется

$$i = \frac{e}{Z_n}. \quad (3.23)$$

Если выполнить условие $R_n \gg X_{C_n}$, то можно считать, что ток в интегрирующей цепи является практически активным ($i=i_a$). Тогда напряжение на входе интегратора будет равно интегралу от ЭДС, наводимой в измерительной обмотке

$$U_{\text{вых}} = \frac{1}{C_n} \int_0^t i \cdot dt = \frac{1}{C_n} \int_0^t \frac{e}{R_n} \cdot dt \approx -\frac{W_n \cdot S}{R_n \cdot C_n} \cdot B_t. \quad (3.24)$$

Решив уравнение (3.24) относительно величины B_t получим

$$B_t = \frac{R_n \cdot C_n}{W_n \cdot S} \cdot U_{\text{вых}}, \quad (3.25)$$

где R_n – активное сопротивление интегрирующей цепи; C_n – емкость конденсатора этой цепи.

Из уравнения (3.25) видно, что индукция в образце пропорциональна выходному напряжению интегрирующей цепи.

Переходя к амплитудным значениям индукции и выходного напряжения интегрирующей цепи, получим

$$B_m = \frac{R_n \cdot C_n}{W_n \cdot S} \cdot U_{m\text{вых}}, \quad (3.26)$$

Подав напряжение с выхода интегратора $U_{\text{твых}}$ на вход «у» и напряжение с сопротивления R_0 на вход «х» осциллографа, на экране последнего получим динамическую петлю намагничивания.

Чтобы реакция измерительной цепи не влияла на форму динамической петли, желательно, чтобы магнитодвижущая сила тока измерительной обмотки была значительно меньше, чем магнитодвижущая сила тока намагниченной обмотки, т. е.

$$\frac{R_{\text{и}} \cdot C_{\text{и}}}{W_{\text{и}} \cdot S} \geq 0,001.$$

Для получения неискаженной формы динамической петли постоянная времени интегратора должна удовлетворять следующему требованию:

$$\tau_{\text{и}} = R_{\text{и}} \cdot C_{\text{и}} \geq (60 \div 100) \cdot \frac{1}{2\pi \cdot f_{\text{min}}}, \quad (3.27)$$

где f_{min} – наименьшая частота переменного магнитного поля.

По активному сопротивлению $R_{\text{и}}$ и емкости конденсатора $C_{\text{и}}$, рассчитывается постоянная времени интегрирующей цепи $\tau_{\text{и}}$ по уравнению

$$\tau_{\text{и}} = R_{\text{и}} \cdot C_{\text{и}}. \quad (3.28)$$

Затем определяется наименьшая частота магнитного поля, при которой выходное напряжение интегратора пропорционально магнитной индукции в образце:

$$f_{\text{min}} = \frac{60}{2\pi \cdot \tau_{\text{и}}}. \quad (3.29)$$

При частоте магнитного поля $f < f_{\text{min}}$ исследовать образец нельзя из-за больших искажений формы динамической петли намагничивания, вызываемых интегрирующей цепью образца.

3.11. Объект исследования

Образцы ферромагнитных материалов тороидальной формы с двумя обмотками: намагничивающей и измерительной. Параметры образцов и обмоток приведены в таблицах, расположенных на корпусах образцов. Параметры образцов и обмоток записываются в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Данные исследуемого образца

Номер образца			Данные схемы		
о	б	р	Число витков	о	б
п	о	п	Интегратор		н
п	л	о			а
					н

			намагничивающей обмотки, W_n	измерительной обмотки, W_n		активное сопротивление, R_n , Ом	емкость, C_n , Ф	постоянная времени, τ_n , С	

3.12. Средства измерения и вспомогательные средства исследования

Осциллограф универсальный типа CI-73.

Звуковой генератор с регулируемым напряжением и частотой.

3.13. Подготовка осциллографа к работе

Перед включением осциллографа установить органы управления на передней панели в следующие положения:

- ручку «яркость» – в крайнее левое;
- ручку «фокус» – в среднее;
- переключатель «V/дел» – 0,01;
- ручку «усиление» - крайнее правое;
- ручку « $\updownarrow$ » – в среднее;
- переключатель « $\sim \perp \approx$ » в « $\approx$ »;
- ручку «уровень» – в крайнее правое»
- ручку « $\leftrightarrow$ » – в среднее.

Далее установить тумблер «разверт. X» на правой боковой панели в положение « $\odot$ X». Подключить осциллограф кабелем питания к сети 220 В и включить тумблер «питание» на передней панели осциллографа. При этом должна загореться сигнальная лампочка. В течение 2-3 минут прогреть осциллограф. Пока осциллограф прогревается, необходимо нанести координатную сетку осциллографа на листки кальки. После прогрева осциллографа установите ручкой «яркость» удобную яркость точки. Рукояткой « $\updownarrow$ » установите точку на горизонтальную ось экрана осциллографа. Рукояткой « $\leftrightarrow$ » установите точку точно по центру экрана.

В результате выполнения вышеперечисленных операций осциллограф подготовлен к выполнению экспериментальной части лабораторной работы.

3.14. Калибровка осциллографа и определение масштабов по напряженности и индукции магнитного поля

Для определения амплитудных значений индукции и напряженности магнитного поля образца по динамическим петлям необходимо определить чувствительность осциллографа по входам «х» и «у». Если при зарисовке динамических петель намагничивания ручка «усиление» находится в крайнем правом положении, то чувствительность осциллографа по оси «у» определяется по числу, против которого находилась риска переключателя «V/дел», если осциллограф был правильно откалиброван. Для проверки правильности калибровки необходимо переключатель «V/дел» установить в положение «5 дел». При правильной калибровке на экране осциллографа появятся две горизонтальные линии или две точки, смещенные на 5 клеток (делений) относительно друг друга.

Пример: при зарисовке динамических петель намагничивания ручка «усиление» находится в крайнем правом положении, а переключатель «V/дел» – против числа 0,02. При переключении переключателя «V/дел» в положение «5 дел» на экране появились две горизонтальные линии на расстоянии 5 клеток друг от друга.

В этом случае масштаб осциллографа по входу «н» составляет

$$m_B = 0,02 \text{ В/дел.}$$

Масштаб m_B необходимо записать в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Определение масштабов по напряженности и индукции магнитного поля

Измерено				Вычислено			
n_B	m'_B	n_r	U_r	m_B	m_r	M_B	M_H
дел.	В/дел.	дел.	В	В/дел.	В/дел.	Т\мм	А/м/мм

Если ручка «усиление» находилась в положении, отличном от крайнего правого, то расчет масштаба осуществляется следующим образом. Сохраняя ручку «усиление» в том же положении, что и при зарисовке динамических петель намагничивания, переключатель «V/дел» установить в положение «5 дел». Измерить расстояние по вертикальной оси между двумя горизонтальными линиями или точками n_B и записать в таблицу 3.3. Тогда чувствительность осциллографа по оси «у» может быть рассчитана следующим образом:

$$m_B = \frac{m'_B}{n_B} \cdot 5, \quad (3.30)$$

где m'_B – чувствительность осциллографа, определенная числом напротив переключателя «V/дел» в рабочем положении; n_B – расстояние между горизонтальными линиями в дел.

Результат расчета записывается в табл. 3.3.

При калибровке усилителя сигнала на оси «х» необходимо соединить гнездо «X», расположенное на правой боковой панели. С гнездом « $\ominus \Gamma 1V$ », расположенным на левой боковой панели. Определить расстояние между двумя вертикальными линиями n_r и записать в табл. 3.3. Напряжение, подаваемое на вход усилителя x , равно 1 В. Тогда чувствительность осциллографа по горизонтальной оси (оси «х») рассчитывается по уравнению

$$m_r = \frac{U_r}{n_r}. \quad (3.31)$$

Рассчитанное значение m_r записывается в табл. 3.3.

По определенным масштабам m_B и m_H рассчитываются масштабы по индукции и напряженности магнитного поля M_B и M_H по уравнениям

$$M_B = \frac{m_B \cdot R_{\text{и}} \cdot C_{\text{и}}}{6 \cdot W_{\text{и}} \cdot S}; \quad (3.32)$$

$$M_H = \frac{m_r \cdot W_{\text{н}}}{6 \cdot R_0 \cdot 2\pi \cdot r_{\text{ср}}}, \quad (3.33)$$

где $r_{\text{ср}}$ – средний радиус сердечника, м; R_0 – образцовое сопротивление в цепи намагничивающей обмотки; $W_{\text{н}}$ – число витков намагничивающей обмотки; $W_{\text{и}}$ – число витков измерительной обмотки; $R_{\text{и}}$ – сопротивление интегрирующей цепи, Ом; $C_{\text{и}}$ – емкость интегрирующей цепи, ф; S – площадь поперечного сечения сердечника образца м^2 .

Определенные масштабы M_B и M_H записываются в таблицу 3.3.

3.15. Подготовка звукового генератора к работе

Методика подготовки звукового генератора к работе, написана применительно к генератору ГЗ-53. При использовании генератора другого типа необходимо производить подготовку к работе согласно инструкции по эксплуатации или в соответствии с указанием преподавателя.

Перед включением звукового генератора необходимо установить органы управления на передней панели прибора в следующие положения:

- переключатель «поддиапазоны» – «Ок Hz»;

- рукоятку «частота Hz» – в положение при котором риска указателя частоты оказывается против цифры 0 на шкале частоты соответствующей поддиапазону 0 – 5 кГц;
- переключатель «пределы шкал, ослабление» – 3 в;
- рукоятка «регулировка выхода» – в положение, соответствующее значению выходного напряжения, равного нулю.

Затем следует подключить генератор кабелем питания к сети 220 В и включить переключатель «сеть». При этом должна загореться сигнальная лампа.

В течение 2 – 3 минут прогреть генератор. Если после прогрева вольтметр «напряжение выхода» покажет напряжение, отличное от нуля, необходимо плавным вращением рукоятки «уст. нуля» добиться нулевого показания вольтметра.

После выполнения вышеуказанных операций звуковой генератор подготовлен к работе.

3.16. Лабораторная работа №1. «Исследование свойств магнитных материалов в магнитных полях постоянной частоты». Цель работы

Целью лабораторной работы является ознакомление студентов с индукционным методом измерения магнитных величин и экспериментальное определение свойств и характеристик ферромагнитных материалов при воздействии на них магнитного поля постоянной частоты с изменяющейся по амплитуде напряженностью.

3.17. Рабочее задание

Собрать схему установки (рис. 3.21).

Зарисовать с экрана осциллографа семейство динамических петель намагничивания, начиная с предельной динамической петли до минимально различимой (6 – 7 петель.)

Произвести калибровку осциллографа.

По данным калибровки рассчитать масштабы по напряженности и индукции магнитного поля.

Для каждой из динамических петель намагничивания определить амплитудные значения напряженности и магнитной индукции.

Для каждой из динамических петель намагничивания определить удельные потери на перемагничивание.

Определить для каждой динамической петли значение магнитной проницаемости.

Рассчитать по предельной динамической петле дифференциальную магнитную проницаемость при различных значениях напряженности поля в диапазоне изменения ее от 0 до H_m и обратно.

Построить зависимости $B_m = F(H_m)$, $\mu_r = (H_m)$, $\mu_{rg} = (H)$, $P = F(B_m)$.

Сделать выводы по работе.

3.18. Методические рекомендации к выполнению рабочего задания

3.18.1. Подготовка к проведению эксперимента

Перед началом выполнения лабораторной работы необходимо получить у лаборанта комплект соединительных проводов, осциллограф, звуковой генератор и исследуемый образец по указанию преподавателя.

Данные образца записать в табл. 3.2.

По известным параметрам интегрирующей цепи образца рассчитайте наименьшую частоту магнитного поля $f_{\min}$ в соответствии с уравнением (3.29) и запишите ее в таблицу 3.2.

Соберите схему установки (рис. 3.21).

При сборке схемы, в соответствии с рис. 3.21, гнезда «вход y » и « $\perp$ » исследуемого образца соединить с гнездом « $\ominus$ УИМ Ω 35pF» тракта вертикального отклонения луча осциллографа, а гнезда «вход x » и « $\perp$ » образца с гнездом « $\otimes$ » осциллографа.

Произведите подготовку осциллографа к работе в соответствии с методикой, изложенной в разделе 3.13 данных методических указаний и звукового генератора (раздел 3.15).

3.18.2. Рекомендации по зарисовке семейства динамических петель намагничивания

Увеличивая выходное напряжение генератора, получите на экране осциллографа предельную динамическую петлю намагничивания. Предельной динамической петлей является наибольшая по площади динамическая петля, у которой появляются «усы», свидетельствующие о начале насыщения. Наложив кальку с нанесенной координатной сеткой, зарисуйте предельную динамическую петлю намагничивания.

Уменьшая выходное напряжение звукового генератора, зарисуйте на кальку семейство 6 – 7 динамических петель от предельной до минимально различимой петли намагничивания.

3.18.3. Калибровка осциллографа

Калибровка осциллографа осуществляется в соответствии с пунктом 3.14 данных методических указаний. При калибровке положение точки «усиление» должно быть таким же как и во время зарисовки динамических петель.

3.18.4. Определение амплитудных значений индукции, напряженности магнитного поля и потерь в сердечнике образца на перемагничивание

По имеющимся на кальках изображениям определяются для каждой динамической петли намагничивания координаты вершин H'_m и B'_m в миллиметрах. Значения H'_m и B'_m записываются в табл. 3.4. Пример определения координат H'_m и B'_m приведен на рис. 3.22.

Таблица 3.4

Определение амплитудных значений индукции, напряженности магнитного поля и потерь в сердечнике образца на перемагничивание

Номер опыта	Измерено				Вычислено			
	f	B'_m	H'_m	S_n	B_m	H_m	μ_r	P
	Гц	мм	мм	мм ²	Т	А/м	10 ³	Вт/кг

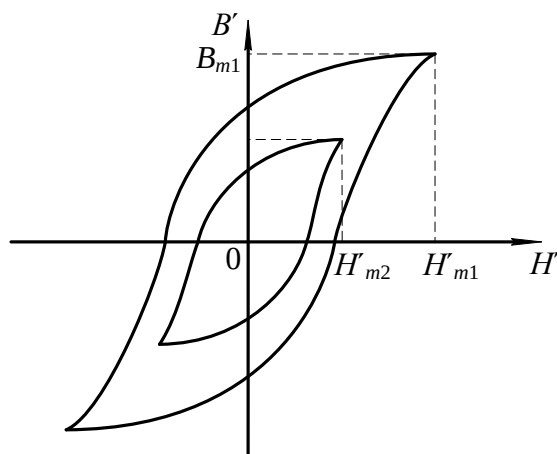


Рис. 3.22. Определение координат вершин динамических петель намагничивания

Амплитудные значения индукции и напряженности магнитного поля рассчитываются:

$$B_m = B'_m \cdot M_B. \quad (3.34)$$

$$H_m = H'_m \cdot M_H. \quad (3.35)$$

Для определения потерь на перемагничивание образца подсчитываются площади каждой из динамических петель намагничивания по клеткам миллиметровой бумаги, на которую накладывается калька с динамическими петлями намагничивания. Значения площадей записываются в табл. 3.4.

По найденным значениям B_m , H_m , S_n вычисляются значения относительной магнитной проницаемости и потери на перемагничивание для каждой петли

$$\mu_r = \frac{B_m}{\mu_0 \cdot H_m}; \quad (3.36)$$

$$P = \frac{S_n \cdot M_B \cdot M_H}{\gamma} \cdot f, \quad (3.37)$$

где $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$ Гн/м – магнитная постоянная вакуума; f – частота намагничивающего потока, Гц; γ – плотность сердечника образца, кг/м³.

Результаты расчетов записываются в табл. 3.4.

3.18.5. Определение дифференциальной магнитной проницаемости

Определение дифференциальной магнитной проницаемости производится по предельной динамической петле намагничивания в следующем порядке. В интервале изменения H от 0 до H_m откладываются 6 – 7 значений H' (H_0 , H_1 , $H_2 \dots H_m$) на одинаковом расстоянии друг от друга. Затем в окрестности каждого значения H' задаются приращениями $\Delta H'$ так, чтобы эти значения H' находились посередине отрезка равного $\Delta H'$ (рис. 3.23).

Проведя из концов $\Delta H'$ линии, параллельные оси B до пересечения с восходящей и нисходящей ветвями предельной динамической петли намагничивания, определяем для каждого значения напряженности поля приращение индукции $\Delta B'_1$ и $\Delta B'_2$. $\Delta B'_1$ – приращение индукции, когда размагничивание осуществляется по нисходящей ветви при уменьшении напряженности поля от H'_m до 0.

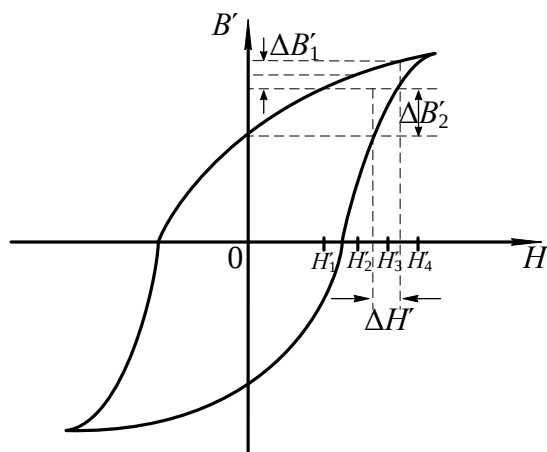


Рис. 3.23. К определению дифференциальной магнитной проницаемости

Значения напряженности $\Delta H'$, приращений $\Delta H'$, $\Delta B'_1$, $\Delta B'_2$ записываются в таблицу 3.5.

Таблица 3. 5

Определение дифференциальной магнитной проницаемости

H' , мм	$\Delta H'$, мм	$\Delta B'_1$, мм	$\Delta B'_2$, мм	H , А/м	ΔH , А/м	ΔB_1 , Тл	ΔB_2 , Тл	μ'_{rg}	μ''_{rg}

Затем производится перерасчет значений напряженности H' по уравнению (3.35), а $\Delta H'$, $\Delta B'_1$, $\Delta B'_2$ по нижеследующим формулам

$$\Delta H = \Delta H' \cdot M_H, \quad (3.38)$$

$$\Delta B_1 = \Delta B'_1 \cdot M_B, \quad (3.39)$$

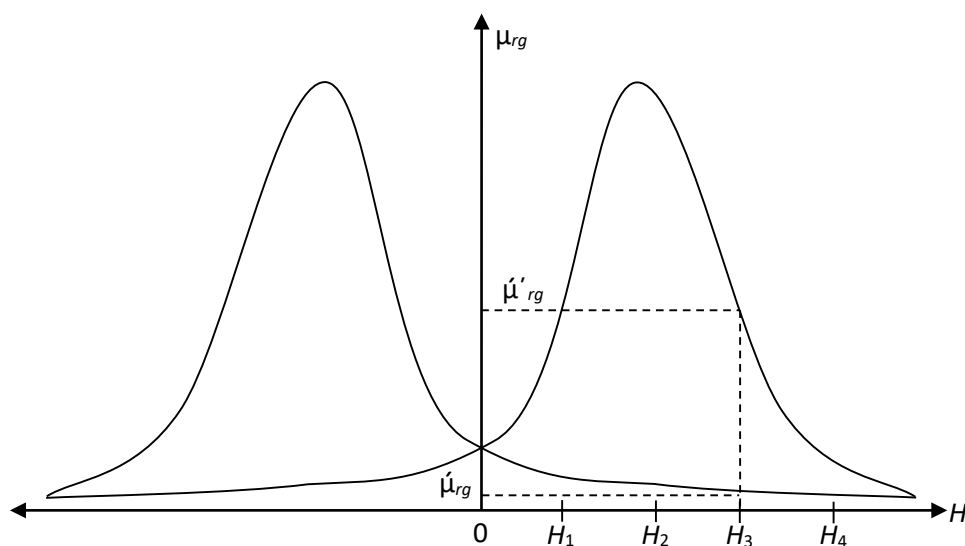
$$\Delta B_2 = \Delta B'_2 \cdot M_B. \quad (3.40)$$

Значения дифференциальной магнитной проницаемости рассчитывается по формулам

$$\mu'_{rg} = \frac{\Delta B_1}{\mu_0 \cdot \Delta H}, \quad (3.41)$$

$$\mu''_{rg} = \frac{\Delta B_2}{\mu_0 \cdot \Delta H}. \quad (3.42)$$

При построении зависимости $\mu_{rg}=F(H)$ по оси абсцисс откладываются значения напряженности H , а по оси ординат соответствующие им значения μ'_{rg} и μ''_{rg} . В результате построения должен получиться график, представленный на рис. 3.24.



3.19. Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен иметь следующее содержание:

1. Цель лабораторной работы.
2. Характеристика и основные параметры исследуемого образца.
3. Характеристики средства измерения и вспомогательных средств исследования.
4. Таблицы с записью результатов экспериментальных исследований и расчетов.
5. Основные расчетные формулы.
6. Зависимости магнитной индукции $B_m=F(H_m)$ и относительной магнитной проницаемости $\mu_r=F(H_m)$, дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{rg}=F(H)$ от напряженности магнитного поля.
7. Зависимость потерь на перемагничивание от индукции в образце $P=F(B_m)$.

Зависимости магнитной индукции $B_m=F(H_m)$ и относительной магнитной проницаемости $\mu_r=F(H_m)$ необходимо строить в одной системе координат, откладывая по оси абсцисс значения H_m , а по оси ординат значения B_m и μ_r , в выбранных для каждой из этих величин масштабах.

Отчет заканчивается выводами, в которых в краткой форме должны быть описаны характеры полученных экспериментально зависимостей и дано их теоретическое обоснование.

3.20. Вопросы для самоконтроля

1. Как зависит относительная магнитная проницаемость от напряженности магнитного поля?
2. Чем объяснить, что сначала магнитная проницаемость возрастает с ростом напряженности, а затем уменьшается при дальнейшем возрастании последней?
3. Как изменяется магнитная индукция в образце с ростом напряженности намагничивающего поля?
4. На чем основан принцип действия лабораторной установки?
5. Какими параметрами установки ограничивается наименьшая частота намагничивающего тока?
6. Определите наименьшую частоту магнитного поля, при которой можно исследовать образец.

7. Как зависят потери на перемагничивание от магнитной индукции, создаваемой в образце?
8. Какие причины обуславливают рост потерь на перемагничивание с ростом магнитной индукции?
9. Объясните, как осуществляется намагничивание ферромагнетиков на различных участках основной кривой намагничивания?
10. В какой точке основной кривой намагничивания относительная магнитная проницаемость максимальна?
11. Каким основным условиям должно удовлетворять вещество, являющееся ферромагнетиком?
12. Какой из видов элементарного движения электрических зарядов создает основной магнитный момент в атоме?
13. Какое явление называется магнитной анизотропией?
14. Какое явление называется магнитострикцией?
15. Почему ферромагнетик самопроизвольно делится на отдельные области, домены?
16. Какая область ферромагнетика называется доменом?
17. Как и где происходит изменение направления намагниченности между доменами?

3.21. Лабораторная работа №2. «Исследование свойств магнитных материалов в магнитных полях переменной частоты». Цель работы

Целью лабораторной работы является ознакомление студентов с индукционным методом измерения магнитных величин и экспериментальное определение свойств и характеристик магнитных материалов при воздействии на них магнитного поля переменной частоты.

3.22. Рабочее задание

Рассчитать для полученного образца постоянную времени интегрирующей цепочки τ_i и минимальную частоту магнитного поля, при которой его можно исследовать.

Собрать схему установки (рис. 3.21).

Зарисовать с экрана осциллографа семейство динамических петель намагничивания при различных частотах намагничивающего тока, поддерживая неизменной магнитную индукцию $B_m = \text{const}$.

Зарисовать семейство динамических петель намагничивания при различных частотах намагничивающего тока, поддерживая неизменной напряженность магнитного поля $H_m = \text{const}$.

Произвести калибровку осциллографа.

По данным калибровки рассчитать масштаб по напряженности и индукции магнитного поля.

Для каждой из динамических петель намагничивания рассчитать амплитудные значения напряженности и магнитной индукции.

Для каждой из динамических петель намагничивания определить потери на перемагничивание образца.

Рассчитать для каждой динамической петли значение относительной магнитной проницаемости.

Построить зависимости $\mu_r = F(f)$, $P = F(f)$ для обоих семейств динамических петель намагничивания.

Сделать выводы по работе.

3.23. Методические указания к выполнению рабочего задания

3.23.1. Подготовка к проведению эксперимента.

Подготовка к проведению эксперимента осуществляется в соответствии с пунктом 3.18.1.

3.23.2. Рекомендации по зарисовке семейств динамических петель намагничивания.

Перед началом экспериментальных исследований выбирается диапазон частот магнитного поля в пределах от $f_{\min}$ до $f_{\max}$, который задается преподавателем.

Зарисовка динамических петель намагничивания при различных частотах магнитного поля с неизменной магнитной индукцией в образце $B_m = \text{const}$ производится в следующем порядке. Необходимо установить на генераторе частоту $f = f_{\max}$. Увеличивая выходное напряжение генератора добиться, чтобы динамическая петля намагничивания касалась двух горизонтальных линий, отстоящих друг от друга на расстоянии 5 клеток (рис. 3.26) и зарисовать на кальку.

Затем уменьшить частоту генератора на Δf . При этом амплитуда B_m возрастает. Уменьшая выходное напряжение генератора, восстановить прежнее значение индукции B_m в образце и снова зарисовать динамическую петлю намагничивания. В диапазоне изменения частоты генератора от $f_{\max}$ до $f_{\min}$

необходимо зарисовать шесть – семь петель, сохраняя индукцию в образце неизменной при каждой частоте.

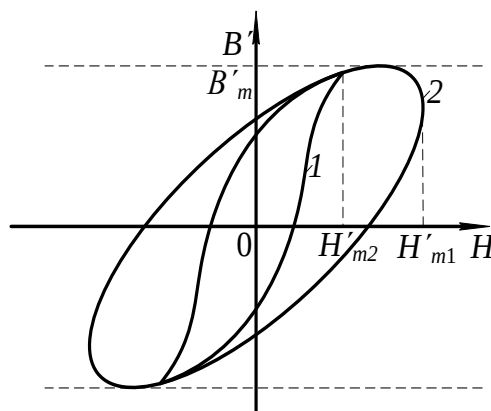


Рис. 3.26. Свойство динамических петель намагничивания с постоянной магнитной индукцией и различной частотой магнитного поля

Зарисовка семейства динамических петель намагничивания на различных частотах магнитного поля при постоянной напряженности магнитного поля в образце производится следующим образом. Частота звукового генератора устанавливается равной $f_{\min}$. Увеличивая выходное напряжение генератора добиваются максимальной по размеру экрана магнитной индукции B_m . Через вершины петель параллельно оси B_m проводятся две вертикальные линии на кальке. Затем увеличивают частоту генератора до следующего значения. При этом ширина динамической петли или H_m уменьшится. Увеличивая выходное напряжение генератора, добиваются, чтобы динамическая петля касалась линий, проведенных параллельно оси B_m и зарисовывают петлю на кальку (см. рис. 3.27).

Изменяя частоту генератора в диапазоне от $f_{\min}$ до $f_{\max}$ зарисовывают 6 – 7 динамических петель намагничивания на различных частотах, сохраняя $H_m = \text{const}$ по вышеприведенной методике.

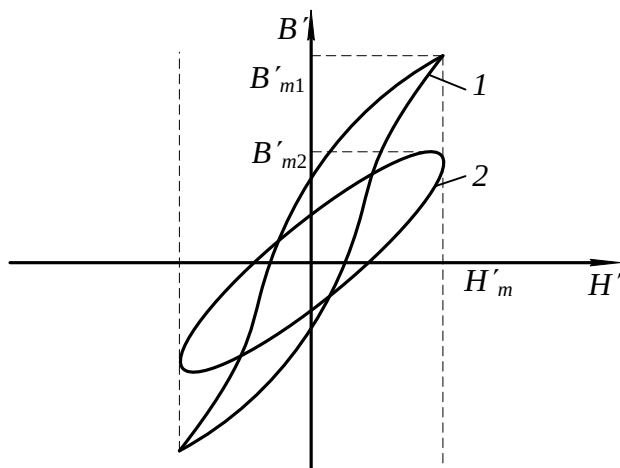


Рис. 3.27. Семейство динамических петель намагничивания при $H_m = \text{const}$

3.23.2. Рекомендации по зарисовке семейств динамических петель намагничивания.

Определение амплитудных значений индукции и напряженности магнитного поля потерь в сердечнике, значений относительной магнитной проницаемости для вершин каждой из зарисованных динамических петель намагничивания производится в соответствии с методикой, изложенной в пункте 3.18.4 данных методических указаний.

3.24. Содержание отчета

Содержание отчета по данной лабораторной работе должно отличаться от содержания отчета по лабораторной работе 1 (см. 3.19) полученными экспериментально зависимостями.

В этой работе определяются и строятся графики зависимостей $\mu_r = F(f)$, $P = F(f)$, когда $B_m = \text{const}$, и эти же зависимости, когда $H_m = \text{const}$. Необходимо строить зависимости $\mu_r = F(f)$ при $B_m = \text{const}$ и $\mu_r = F(f)$ при $H_m = \text{const}$ в одной системе координат откладывая по оси абсцисс значения H_m , а по оси ординат – значения μ_r .

Аналогично, в одной системе координат строятся зависимости $P = F(f)$ для обоих режимов испытания образца.

3.25. Вопросы для самоконтроля

1. Чем отличается динамическая петля намагничивания от петли гистерезиса?
2. Какие виды потерь существуют при перемагничивании ферромагнетика в переменном магнитном поле?
3. От каких параметров намагничивающего поля и как зависят потери на гистерезис?
4. От каких параметров намагничивающего поля и как зависят потери на вихревые токи?
5. Объясните суть явления вытеснения магнитного поля.
6. К каким последствиям приводит явление вытеснения магнитного поля?
7. Почему с ростом частоты уменьшается индукция, если $B_m = \text{const}$?
8. Почему с ростом частоты уменьшается магнитная индукция, если $H_m = \text{const}$?
9. Как и почему изменяются потери на перемагничивание с ростом частоты при $B_m = \text{const}$?

10. Как и почему изменяются потери на перемагничивание с ростом частоты при $H_m = \text{const}$?
11. Почему в одном и том же диапазоне изменения частоты относительная магнитная проницаемость изменяется в больших пределах, когда, как и почему изменяются потери на перемагничивание с ростом частоты при $B_m = \text{const}$, а не при $H_m = \text{const}$?
12. Почему в одном и том же диапазоне изменения частоты потери на перемагничивание ферромагнетика изменяются в больших пределах при $B_m = \text{const}$, а не при $H_m = \text{const}$?

Часть 4

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 1. «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИЗОЛЯЦИИ ДВУХЖИЛЬНОГО КАБЕЛЯ»

4.1. Требование к оформлению контрольной работы

Контрольная работа состоит из двадцати вариантов с нумерацией вариантов от 0 до 19.

Номер варианта задачи, решаемой студентами в контрольной работе, определяется суммой двух последних цифр шифра студента. Например, если номер шифра студента 4298, то номер варианта задачи – 17.

К оформлению контрольной работы предъявляются следующие требования:

1. Контрольная работа выполняется в тетради, на обложке которой должны быть указаны фамилия, имя, отчество студента, учебный шифр, наименование дисциплины и домашний адрес.

2. Условия задачи переписываются полностью, без сокращений.

3. Текстовая часть, формулы, числовые выкладки должны быть выполнены чернилами без помарок и исправлений.

4. Графическая часть работы выполняется в карандаше с помощью чертёжных инструментов.

5. Электрические схемы вычерчиваются с соблюдением установленных стандартом условных обозначений.

6. Ответы на вопросы должны быть аргументированы теоретически с использованием в необходимом объёме рисунков, графиков.

7. В конце работы необходимо привести список использованной при выполнении контрольной работы литературы.

8. После списка литературы необходимо проставить дату выполнения работы и подпись.

4.2. Задание на контрольную работу

Питание электротехнической установки осуществляется с помощью кабельной линии длиной l . Кабель со свинцовой оболочкой имеет две токопроводящие жилы радиусом R (Рис.1). В качестве электрической изоляции жил друг от друга и жил от оболочки использована кабельная бумага. В пористой структуре диэлектрика имеются капилляры, заполненные воздухом. К жилам кабеля приложено переменное напряжение, действующее значение которого U , частотой f . При расчёте считать, что электрическое поле внутри кабеля однородно.

Требуется определить:

- 1) ёмкость между жилами кабеля, C_k ;
- 2) сопротивление изоляции между жилами кабеля, $Z_{из}$;
- 3) значение тока утечки между жилами кабеля, I_y ;
- 4) диэлектрические потери в изоляции кабеля, P ;
- 5) пробивное напряжение изоляции между жилами кабеля, $U_{пр}$;
- 6) ёмкость $C_{кп}$, сопротивление изоляции $Z_{изп}$ и ток утечки $I_{уп}$

диэлектрические потери P_p , пробивное напряжение $U_{прп}$ при условии, что оболочка кабеля заполнена газообразным либо жидким диэлектриком. При расчёте принять, что поры и капилляры полностью заполнены этим диэлектриком;

7) после расчёта составить таблицу сравнительных данных кабелей без пропитки и с пропиткой и произвести анализ влияния пропитки изоляции кабеля на его электрические свойства;

8) определить соответствие изоляционных свойств электрической изоляции кабеля требованиям правил установки электропотребителей (ПУЭ);

Геометрические размеры кабеля и электрические параметры диэлектриков, использованных в качестве изоляции, приведены в таблице 4.1.

Вопросы к контрольной работе

1. Дайте расшифровку цифр, используемых в обозначениях марок электрических сталей.
2. На основной кривой намагничивания укажите участки, на которых намагничивание осуществляется за счёт роста доменов. В чём отличие процессов намагничивания на этих участках?
3. Как влияют на магнитные свойства материалов вихревые токи. В каких магнитных полях возникают эти токи?

Таблица 4.1

Исходные данные для решения контрольной работы

Номер варианта	Длина линии l	Радиус жилы, R	Расстояние между жилами, S	Рабочее напряжение, U	Частота, f	Плотность		Относительная диэлектрическая проницаемость			Тангенс угла диэлектрических потерь			Электрическая прочность		
						Целлюлозы, D_1	Бумаги, D	Целлюлозы, ϵ_{21}	Воздуха, ϵ_{22}	Пропитки, ϵ_{23}	Целлюлозы, $tg\delta_1$	Воздуха, $tg\delta_2$	Пропитки, $tg\delta_3$	Целлюлозы, $E_{пр1}$	Воздуха, $E_{пр2}$	Пропитки, $E_{пр3}$
	м	мм	мм	В	Гц	кг/м ³	кг/м ³				10 ⁻⁴	10 ⁻⁶	10 ⁻³	кВ/мм	кВ/мм	кВ/мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
0	120	1,38	7,5	220	50	1550	780	6,6	1,00059	2,1	65,0	4,0	3,0	15,0	3,2	20,0
1	50	1,78	8,3	380	50	1550	850	6,6	1,00059	2,7	65,0	4,0	10,0	15,0	3,2	60,0

2	1000	2,25	12,24	2200	50	1550	1100	6,6	1,00059	4,5	65,0	4,0	25,0	15,0	3,2	50,0
3	800	2,82	13,58	1100	50	1550	1090	6,6	1,00059	4,1	65,0	4,0	15,0	15,0	3,2	55,0
4	150	3,34	17,92	6600	50	1550	780	6,6	1,00059	2,8	65,0	4,0	0,2	15,0	3,2	43,0
5	1500	3,99	19,42	3300	50	1550	770	6,6	1,00059	5,2	65,0	4,0	30,0	15,0	3,2	35,0
6	3000	4,72	14,18	6600	50	1550	900	6,6	1,00059	4,8	65,0	4,0	5,0	15,0	3,2	20,0

Окончание табл. 4.1

Номер варианта	Длина линии l	Радиус жилы, R	Расстояние между жилами, S	Рабочее напряжение, U	Частота, f	Плотность		Относительная диэлектрическая проницаемость			Тангенс угла диэлектрических потерь			Электрическая прочность		
						Целлюлозы, D_1	Бумаги, D	Целлюлозы, ϵ_{21}	Воздуха, ϵ_{22}	Пропитки, ϵ_{23}	Целлюлозы, $tg\delta_1$	Воздуха, $tg\delta_2$	Пропитки, $tg\delta_3$	Целлюлозы, $E_{пр1}$	Воздуха, $E_{пр2}$	Пропитки, $E_{пр3}$
	м	мм	мм	В	Гц	кг/м ³	кг/м ³				10 ⁻⁴	10 ⁻⁶	10 ⁻³	кВ/мм	кВ/мм	кВ/мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
7	500	5,5	15,74	380	50	1550	970	6,6	1,00059	2,4	65,0	4,0	3,0	15,0	3,2	18,0
8	250	6,18	19,5	2200	50	1550	800	6,6	1,00059	1,01	65,0	4,0	4,0	15,0	3,2	20,0
9	2000	6,91	20,76	1100	50	1550	1100	6,6	1,00059	3,8	65,0	4,0	0,2	15,0	3,2	45,0
10	200	7,68	24,8	3300	50	1550	1100	6,6	1,00059	2,1	65,0	4,0	3,0	15,0	3,2	20,0
11	4000	8,74	27,3	6600	50	1550	850	6,6	1,00059	2,3	65,0	4,0	1,0	15,0	3,2	18,0
12	3500	1,38	11,2	1100	50	1550	780	6,6	1,00059	5,0	65,0	4,0	20,0	15,0	3,2	42,0
13	1600	1,78	11,2	2200	50	1550	900	6,6	1,00059	4,4	65,0	4,0	5,0	15,0	3,2	45,0
14	600	7,68	20,1	220	50	1550	770	6,6	1,00059	2,8	65,0	4,0	0,2	15,0	3,2	24,0
15	800	8,74	22,2	660	50	1550	970	6,6	1,00059	4,8	65,0	4,0	8,0	15,0	3,2	25,0
16	300	2,25	16,14	3300	50	1550	1090	6,6	1,00059	2,7	65,0	4,0	10,0	15,0	3,2	25,0
17	1400	3,34	17,92	6600	50	1550	780	6,6	1,00059	1,019	65,0	4,0	0,2	15,0	3,2	50,0
18	700	6,18	17,1	660	50	1550	780	6,6	1,00059	3,8	65,0	4,0	20,0	15,0	3,2	32,0

4.3. Методические указания к выполнению контрольной работы

Кабельная бумага представляет собой механическую смесь целлюлозы и воздуха с неодинаковой относительной диэлектрической проницаемостью. Определение относительной диэлектрической проницаемости такого диэлектрика производится в соответствии с уравнением Лихтенеккера для последовательного расположения компонентов. В связи с тем, что при использовании этого уравнения необходимо знать объёмные концентрации компонентов, расчёт следует начать с

определения последних по заданным значениям плотности целлюлозы и кабельной бумаги в соответствии с уравнениями

$$\theta_1 = \frac{D}{D_1} ; \quad (4.1)$$

$$\theta_2 = 1 - \frac{D}{D_1}, \quad (4.2)$$

где θ_1 – объёмная концентрация целлюлозы; θ_2 – объёмная концентрация воздуха; D – плотность кабельной бумаги, кг/м³; D_1 – плотность целлюлозы, кг/м³.

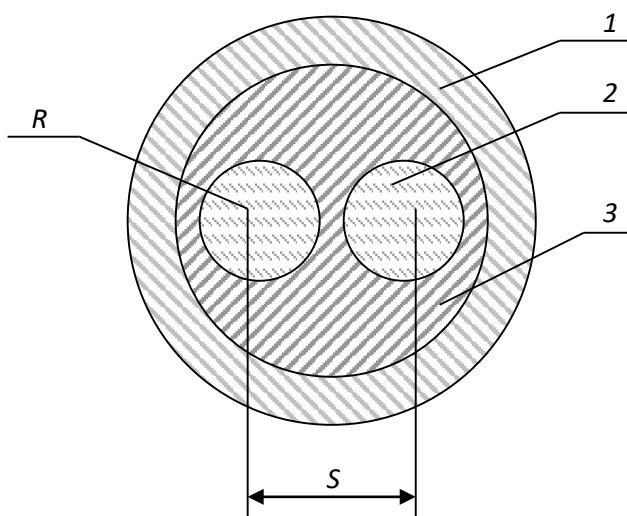


Рис. 4.1. Сечение двухжильного кабеля
1- оплётка кабеля; 2- жила кабеля; 3- изоляция кабеля

По вычисленному значению относительной диэлектрической проницаемости непропитанной кабельной бумаги и заданным геометрическим размерам кабеля рассчитывается ёмкость кабельной линии.

Для двухжильного кабеля ёмкость между жилами может быть определена из уравнения:

$$C_k = \xi_r \cdot \xi_0 \times \frac{2 \cdot \pi \cdot l}{\ln K^2}, \quad (4.3)$$

где

$$K = \frac{a + x - R}{a + R - x};$$

$$x = \frac{S}{2};$$

$$a = \sqrt{\left(\frac{S}{2}\right)^2 - R^2};$$

S – расстояние между центрами жил кабеля, м; R – радиус жил кабеля, м; l – длина кабельной линии, м.

Тангенс угла диэлектрических потерь кабельной бумаги вычисляются по заданным значениям тангенсов углов диэлектрических потерь целлюлозы и воздуха по формуле

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{tg} \delta_1}{1 + \frac{\theta_2 \cdot \xi_{r1}}{(1 - \theta_2) \cdot \xi_{r2}}} + \frac{\operatorname{tg} \delta_2}{1 + \frac{(1 - \theta_2) \cdot \xi_{r2}}{\theta_2 \cdot \xi_{r1}}}. \quad (4.4)$$

Удельная активная (γ_a) и удельная реактивная (γ_p) проводимости изоляции в переменном электрическом поле с частотой f вычисляются по формулам, приведённым в основных учебных пособиях.

Удельная полная проводимость изоляции кабеля связана с удельными активной и реактивной проводимостями соотношением

$$\gamma_{\text{из}} = \sqrt{\gamma_a^2 + \gamma_p^2} \quad (4.5)$$

Полная проводимость $Y_{\text{из}}$ изоляции кабеля определяется по удельной проводимости $\gamma_{\text{из}}$ и геометрическим размерам кабеля

$$Y_{\text{из}} = \gamma_{\text{из}} \cdot \frac{2\pi \cdot l}{\ln K^2} \quad (4.6)$$

Ток утечки кабеля, возникающий под воздействием приложенного напряжения, сопротивление изоляции между жилами в двухжильных кабелях рассчитываются на основании соотношений

$$I_y = U \cdot Y_{\text{из}}; \quad (4.7)$$

$$Z_{\text{из}} = \frac{1}{Y_{\text{из}}}. \quad (4.8)$$

Диэлектрические потери в изоляции кабеля P находятся по действующему значению приложенного переменного напряжения, ёмкости кабельной линии, тангенсу угла диэлектрических потерь и частоте питающей сети

$$P = U^2 \cdot 2\pi \cdot f \cdot C_k \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (4.9)$$

где U – рабочее напряжение кабельной линии, В; f – частота, Гц; C_k – ёмкость кабельной линии, Ф; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь; P – диэлектрические потери, Вт.

Для упрощения расчёта величины пробивного напряжения делаем допущение, что электрическое поле внутри кабеля однородное, то есть напряженность поля в любой его точке одинакова. Тогда электрическая прочность кабельной бумаги может быть получена по заданным значениям электрической прочности компонентов (целлюлозы и воздуха) из следующего уравнения

$$E_{\text{пр}} = \frac{E_{\text{пр1}} \cdot E_{\text{пр2}}}{E_{\text{пр1}} + E_{\text{пр2}} \cdot \left(1 - \frac{\xi_{r2}}{\xi_{r1}}\right)}. \quad (4.10)$$

Пробивное напряжение изоляции:

$$U_{\text{пр}} = E_{\text{пр}} \cdot h_{\text{из}}, \quad (4.11)$$

где $h_{\text{из}}$ – минимальная толщина изоляции, мм.

Минимальная толщина изоляции между жилами кабеля для двухжильного кабеля определяется из уравнения

$$h_{\text{из}} = S - 2R \quad (4.12)$$

Вычислив электрические параметры линии, в кабеле которой в качестве изоляции использована непропитанная кабельная бумага, следует произвести расчёт параметров этой линии при условии, что оболочка кабеля заполнена вместо воздуха либо газообразным диэлектриком, либо жидким изоляционным материалом. При этом считаем, что в порах капиллярах воздух полностью замещается этими диэлектриками.

Последовательность расчёта остаётся той же, что для непропитанной кабельной бумаги. В уравнениях (4.2), (4.4) и (4.10) необходимо вместо электрических параметров воздуха подставлять аналогичные параметры замещающего воздух другого диэлектрика согласно условию задачи. При записи расчётного уравнения необходимо индекс 2, обозначающий, что это параметр воздуха, изменить на индекс 3.

Например, при определении $\text{tg}\delta_n$ пропитанной жидким диэлектриком кабельной бумаги уравнение (4.4) нужно записать в следующем виде:

$$\text{tg}\delta_{\text{п}} = \frac{\text{tg}\delta_q}{1 + \frac{\theta_3 \cdot \xi_{r1}}{(1 - \theta_3) \cdot \xi_{r2}}} + \frac{\text{tg}\delta_3}{1 + \frac{(1 - \theta_3) \cdot \xi_{r3}}{\theta_3 \cdot \xi_{r1}}}.$$

При расчёте следует полагать, что объёмные концентрации целлюлозы и заменяющего воздух другого газообразного или жидкого диэлектрика остались такими же, как целлюлозы и воздуха, то есть

$$\theta_3 = \theta_2.$$

После окончания расчёта следует *обязательно* проанализировать, как влияет на электрические параметры кабельной линии пропитка её изоляции жидким диэлектриком. Для удобства анализа необходимо составить таблицу расчётных значений электрических параметров кабельной линии до и после пропитки. Образец такой таблицы представлен ниже.

Таблица 4.2

Таблица сравнительных данных кабельной линии

Обозначение параметра	ξ_r	C_k, Φ	$X_{из}, \text{См/м}$	$Z_{из}, \text{Ом}$	$Y_{из}, \text{См}$	$P, \text{Вт}$	$U_{пр}, \text{кВ}$
Кабель без пропитки							
Кабель с пропиткой							

При анализе необходимо указывать, как влияет пропитка изоляции на значение каждого из рассчитанных параметров с использованием теоретических сведений.

В конце анализа необходимо сделать вывод о соответствии изоляции пропитанного и непропитанного кабелей требованиям, предъявляемых к кабельной линии правилами устройства электроустановок (ПУЭ).

В соответствии с этими требованиями кабельные линии с рабочим напряжением до 1000 В должны обладать сопротивлением изоляции $R_{из} > 0,5 \text{ МОм}$ при прозвонке их мегаомметром на напряжение 2,5 кВ.

Изоляция кабельных линий с рабочим напряжением более 1 кВ должна выдерживать воздействия постоянных напряжений, значение которых приводятся в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Испытательное напряжение выпрямленного тока для силовых кабелей

Изоляция	Напряжение, кВ, для кабелей на рабочее напряжение, кВ								Продолжительность
	2	3	6	10	20	35	110	220	
Бумажная	12	18	36	60	100	175	300	450	

Для установления соответствия изоляции кабельных линий с рабочим напряжением до 1 кВ требованиям ПУЭ необходимо рассчитать сопротивление изоляции $R_{из}$ постоянному току. Расчёт $R_{из}$ осуществляется по активной удельной проводимости в соответствии с уравнениями

$$g_{из} = \gamma_a \cdot \frac{2\pi \cdot l}{\ln K^2}; \quad (4.13)$$

$$R_{из} = \frac{1}{g_{из}}, \quad (4.14)$$

где $g_{из}$ – активная проводимость кабельной линии, См; γ_a – удельная активная проводимость кабельной линии, См/м; $R_{из}$ – сопротивление изоляции постоянному току, Ом.

Если рассчитанное значение сопротивления изоляции $R_{из}$ больше 0,5 МОм, то кабельная линия удовлетворяет требованиям ПУЭ.

Для кабельных линий с рабочим напряжением свыше 1000В проверка изоляции на соответствие требованиям ПУЭ производится путём сравнения

рассчитанного пробивного напряжения с $U_{пр}$ с испытательным напряжением, приведённым в табл. 4.3.

4.4. Экзаменационные вопросы

1. Понятия об электротехнических материалах. Классификация (определения).
2. Диэлектрики. Основные понятия. Определения. Классификация.
3. Понятия поляризации. Механизм поляризации.
4. Виды поляризации. Электронная поляризация.
5. Виды поляризации. Ионная поляризация.
6. Виды поляризации. Спонтанная (остаточная) поляризация.
7. Обобщенная схема замещения диэлектрика.
8. Относительная диэлектрическая проницаемость газообразных диэлектриков.
9. Относительная диэлектрическая проницаемость твердых диэлектриков
10. Относительная диэлектрическая проницаемость сложных диэлектриков. Уравнение Лихтеннекера.
11. Понятия об электропроводности диэлектриков. Электропроводность твердых диэлектриков. Объемное и поверхностное удельные сопротивления диэлектриков.
12. Диэлектрические потери. Основные понятия. Схемы замещения. Виды диэлектрических потерь.
13. Понятие пробоя диэлектриков. Электрический пробой газообразных диэлектриков.
14. Понятие электрического пробоя диэлектриков. Электротепловой пробой.
15. Механические, физические и тепловые свойства диэлектриков.
16. Электроизоляционные материалы. Газообразные, жидкие твердые и твердеющие изоляционные материалы.
17. Физика магнетизма. Условия возникновения ферромагнетизма.
18. Основные характеристики магнитных веществ.
19. Строение ферромагнетиков.
20. Явление магнитной анизотропии и магнитострикции.
21. Намагничивание ферромагнетиков.
22. Свойства ферромагнетиков в квазипостоянных магнитных полях.
23. Динамическая петля намагничивания.
24. Эффект вытеснения магнитного поля диэлектрика в переменном магнитном поле.
25. Потери мощности на перемагничивание ферромагнетиков в переменном магнитном поле.
26. Магнитные материалы. Магнитомягкие и магнитотвердые магнитные материалы.
27. Исследование ферромагнетика в переменном магнитном поле.

- 28.Полупроводники. Основные понятия. Классификация.
- 29.Электропроводность полупроводников.
- 30.Электронно-дырочный переход полупроводников.
- 31.Проводники. Классификация. Основные понятия.
- 32.Удельное сопротивление проводников. Температурный коэффициент удельного сопротивления.
- 33.ТермоЭДС. Температурный коэффициент линейного расширения металлических проводников.
- 34.Основы конструкционного и электротехнического материаловедение.
- 35.Агрегатные состояния и дефекты строения материалов.
- 36.Термическая обработка.
- 37.Металлы и сплавы.
- 38.Искусственные и синтетические материалы.
- 39.Классификация материалов.
- 40.Технологии получения материалов.

Учебно-методические материалы

Основная литература

Богородицкий Н. П., Пасынков В. В., Тареев Б. М. Электротехнические материалы. 7-е издание. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 304 с.

Угольников А. В. Электротехническое и конструкционное материаловедение. Екатеринбург, Изд-во УГГУ, 2015. 147 с.

Хахин Ю. М. Электротехническое материаловедение. Екатеринбург, Изд. УГГГА, 1995. 100 с.

Дополнительная литература

Справочник по электрическим материалам / под ред. Ю. В. Корицкого 2-е изд. М.: Энергия, том 1, 1974. 583 с.; том 2, 1974. 615 с.; том 3, 1976. 896 с.

Агеева Н. Д., Винаковская Н. Г., Лифанов В. Н. Электротехническое материаловедение, Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2006. 76 с.

Дудкин А. Н. Ким В. С. Электротехническое материаловедение. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2012. 216 с.

Журавлева Л. В. Электроматериаловедение, М ПрофОбрИздат, 2001. 312 с.

Попов В. С. Теоретическая электротехника. М.: Энергоатомиздат, 1990.

Розенблат М. А. Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. М.: Наука, 1966. 720с.

Тареев Б. М. Физика диэлектрических материалов. М.: Энергия, 1982. 320 с.

Штофа Ян. Электротехнические материалы в вопросах и ответах. М.: Энергоатомиздат, 1984. 200 с.

Электротехнические и конструкционные материалы. В. Н. Бородулин, А. С. Воробьев, В. М. Матюгин и др. М: Издательский центр «Академия», 2005. 280 с.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

***МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ
ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ***

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Специальность

21.05.03 Технология геологической разведки

Специализация

Геофизические методы поиска и разведки месторождений полезных ископаемых

Екатеринбург

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ВИДЫ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТА	4
МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ КО ВСЕМ ВИДАМ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ	4
Повторение материала лекций и самостоятельное изучение курса	4
Подготовка к практическим занятиям и лабораторным работам	5
Подготовка и написание контрольной работы	6
Подготовка к выполнению и написанию курсовой работы (проекта)	7
МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ	8
Подготовка к зачёту	8
Подготовка к экзамену	8

ВВЕДЕНИЕ

Самостоятельная работа студентов – это разнообразные виды деятельности студентов, осуществляемые под руководством, но без непосредственного участия преподавателя в аудиторное и/или внеаудиторное время.

Это особая форма обучения по заданиям преподавателя, выполнение которых требует активной мыслительной, поисково-исследовательской и аналитической деятельности.

Методологическую основу самостоятельной работы студентов составляет деятельностный подход, когда цели обучения ориентированы на формирование умений решать типовые и нетиповые задачи, то есть на реальные ситуации, где студентам надо проявить знание конкретной дисциплины, использовать внутрипредметные и межпредметные связи.

Цель самостоятельной работы – закрепление знаний, полученных на аудиторных занятиях, формирование способности принимать на себя ответственность, решать проблему, находить конструктивные выходы из сложных ситуаций, развивать творческие способности, приобретение навыка организовывать своё время

Кроме того самостоятельная работа направлена на обучение студента осмысленно и самостоятельно работать сначала с учебным материалом, затем с научной информацией, заложить основы самоорганизации и самовоспитания с тем, чтобы привить умение в дальнейшем непрерывно повышать свой профессиональный уровень.

Самостоятельная работа реализует следующие задачи:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности студентов: творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- формирование практических (общеучебных и профессиональных) умений и навыков;
- развитие исследовательских умений;
- получение навыков эффективной самостоятельной профессиональной (практической и научно-теоретической) деятельности.

В учебном процессе выделяют два вида самостоятельной работы:

- аудиторная;
- внеаудиторная.

Аудиторная самостоятельная работа по дисциплине выполняется на учебных занятиях под непосредственным руководством преподавателя и по его заданию.

Внеаудиторная самостоятельная работа – планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия.

Самостоятельная работа, не предусмотренная образовательной программой, учебным планом и учебно-методическими материалами, раскрывающими и конкретизирующими их содержание, осуществляется студентами инициативно, с целью реализации собственных учебных и научных интересов.

Для более эффективного выполнения самостоятельной работы по дисциплине преподаватель рекомендует студентам источники и учебно-методические пособия для работы, характеризует наиболее рациональную методику самостоятельной работы, демонстрирует ранее выполненные студентами работы и т. п.

ВИДЫ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТА

Основные формы организации самостоятельной работы студентов определяются следующими параметрами:

- содержание учебной дисциплины;
- уровень образования и степень подготовленности студентов;
- необходимость упорядочения нагрузки студентов при самостоятельной работе.

В соответствии с реализацией рабочей программы дисциплины в рамках самостоятельной работы студенту необходимо выполнить следующие виды работ:

для подготовки ко всем видам текущего контроля:

- повторение материала лекций;
- самостоятельное изучение курса;
- подготовка к практическим занятиям и лабораторным работам;
- подготовка к контрольной работе, написание контрольной работы;
- выполнение и написание курсовой работы (проекта);

для подготовки ко всем видам промежуточной аттестации:

- подготовка к зачёту;
- подготовка к экзамену.

Особенностью организации самостоятельной работы студентов является необходимость не только подготовиться к сдаче зачета /экзамена, но и собрать, обобщить, систематизировать, проанализировать информацию по темам дисциплины.

Технология организации самостоятельной работы студентов включает использование информационных и материально-технических ресурсов образовательного учреждения.

Самостоятельная работа может осуществляться индивидуально или группами студентов как online, так и на занятиях в зависимости от цели, объема, конкретной тематики самостоятельной работы, уровня сложности, уровня умений студентов.

В качестве форм и методов контроля внеаудиторной самостоятельной работы студентов могут быть использованы обмен информационными файлами, семинарские занятия, тестирование, опрос, доклад, реферат, самоотчеты, контрольные работы, защита контрольных и курсовых работ (проектов), защита зачётных работ в виде доклада с презентацией и др.

Текущий контроль результатов внеаудиторной самостоятельной работы студентов осуществляется в пределах времени, отведенного на обязательные учебные занятия по дисциплине.

Промежуточный контроль результатов внеаудиторной самостоятельной работы студентов осуществляется в пределах времени, отведенного для сдачи экзамена / зачёта.

В методических указаниях по каждому виду контроля представлены материалы для самостоятельной работы и рекомендации по организации отдельных её видов.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ КО ВСЕМ ВИДАМ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ

Повторение материала лекций и самостоятельное изучение курса

Лекционный материал по дисциплине излагается в виде устных лекций преподавателя во время аудиторных занятий. Самостоятельная работа студента во время лекционных аудиторных занятий заключается в ведении записей (конспекта лекций).

Конспект лекций, выполняемый во время аудиторных занятий, дополняется студентом при самостоятельном внеаудиторном изучении некоторых тем курса. Самостоятельное изучение тем курса осуществляется на основе списка основной и дополнительной литературы к дисциплине.

Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины приведён в рабочей программе дисциплины.

Рекомендуемые задания для самостоятельной внеаудиторной работы студента, направленные на повторение материала лекций и самостоятельное изучение тем курса:

для овладения знаниями:

- конспектирование текста;
- чтение основной и дополнительной литературы;
- составление плана текста;
- работа со словарями, справочниками и нормативными документами;
- просмотр обучающих видеозаписей.

для закрепления и систематизации знаний:

- работа с конспектом лекций;
- повторная работа над учебным материалом;
- составление таблиц для систематизации учебного материала;
- изучение нормативных материалов;
- составление плана и тезисов ответа на вопросы для самопроверки;
- ответы на вопросы для самопроверки;
- составление библиографических списков по изучаемым темам.

для формирования навыков и умений:

- выполнение рисунков, схем, эскизов оборудования;
- рефлексивный анализ профессиональных умений.

Тематический план изучения дисциплины и содержание учебной дисциплины приведены в рабочей программе дисциплины.

Вопросы для самопроверки приведены учебной литературе по дисциплине или могут быть предложены преподавателем на лекционных аудиторных занятиях после изучения каждой темы.

Подготовка к практическим занятиям и лабораторным работам

Практические занятия по дисциплине выступают средством формирования у студентов системы интегрированных умений и навыков, необходимых для освоения профессиональных компетенций, а также умений определять, разрабатывать и применять оптимальные методы решения профессиональных задач.

На практических занятиях происходит закрепление теоретических знаний, полученных в ходе лекций, осваиваются методики и алгоритмы решения типовых задач по образцу и вариантных задач, разбираются примеры применения теоретических знаний для практического использования, выполняются доклады с презентацией по определенным учебно-практическим, учебно-исследовательским или научным темам с последующим их обсуждением.

Рекомендуемые задания для самостоятельной внеаудиторной работы студента, направленные на подготовку к практическим занятиям:

для овладения знаниями:

- чтение основной и дополнительной литературы;
- работа со словарями, справочниками и нормативными документами;
- просмотр обучающих видеозаписей.

для закрепления и систематизации знаний:

- работа с конспектом лекций;
- ответы на вопросы для самопроверки;
- подготовка публичных выступлений;
- составление библиографических списков по изучаемым темам.

для формирования навыков и умений:

- решение задач по образцу и вариативных задач;
- выполнение рисунков, схем, эскизов оборудования;

- рефлексивный анализ профессиональных умений.

Тематический план изучения дисциплины и содержание учебной дисциплины приведены в рабочей программе дисциплины.

Лабораторные занятия по дисциплине выступают средством формирования у студентов навыков работы с использованием лабораторного оборудования, планирования и выполнения экспериментов, оформления отчётной документации по выполнению лабораторных работ.

Рекомендуемые задания для самостоятельной внеаудиторной работы студента, направленные на подготовку к лабораторным занятиям:

для овладения знаниями:

- изучение методик работы с использованием различных видов и типов лабораторного оборудования;
- изучение правил безопасной эксплуатации лабораторного оборудования;
- работа со словарями, справочниками и нормативными документами.

для закрепления и систематизации знаний:

- составление плана проведения эксперимента;
- составление отчётной документации по результатам экспериментирования;
- аналитическая обработка результатов экспериментов.

для формирования навыков и умений:

- выполнение рисунков, схем, эскизов оборудования;
- оформление отчётной документации по выполнению лабораторных работ.

Подготовка и написание контрольной работы

Контрольная работа – индивидуальная деятельность обучающегося по концентрированному выражению накопленного знания, обеспечивает возможность одновременной работы всем обучающимся за фиксированное время по однотипным заданиям, что позволяет преподавателю оценить всех обучающихся. Контрольная работа является средством проверки умений применять полученные знания для решения задач определенного типа по теме или разделу.

Рекомендуемые задания для самостоятельной внеаудиторной работы студента, направленные на подготовку к контрольной работе:

для овладения знаниями:

- чтение основной и дополнительной литературы;
- работа со словарями, справочниками и нормативными документами.

для закрепления и систематизации знаний:

- работа с конспектом лекций;
- ответы на вопросы для самопроверки.

для формирования навыков и умений:

- решение задач по образцу и вариативных задач;
- выполнение рисунков, схем, эскизов оборудования;
- оформление отчётной документации по выполнению контрольной работы.

Контрольная работа может быть выполнена в виде доклада с презентацией.

Доклад с презентацией – это публичное выступление по представлению полученных результатов знаний по определенной учебно-практической, учебно-исследовательской или научной теме.

При подготовке доклада с презентацией обучающийся должен продемонстрировать умение самостоятельного изучения отдельных вопросов, структурирования основных положений рассматриваемых проблем, публичного выступления, позиционирования себя перед коллективом, навыки работы с библиографическими источниками и оформления научных текстов.

В ходе подготовки к докладу с презентацией обучающемуся необходимо:

- выбрать тему и определить цель выступления;
- осуществить сбор материала к выступлению;
- организовать работу с источниками;
- во время изучения источников следует записывать вопросы, возникающие по мере ознакомления, ключевые слова, мысли, суждения; представлять наглядные примеры из практики;
- сформулировать возможные вопросы по теме доклада, подготовить тезисы ответов на них;
- обработать материал и представить его в виде законченного доклада и презентации.

При выполнении контрольной работы в виде доклада с презентацией самостоятельная работа студента включает в себя:

для овладения знаниями:

- чтение основное и дополнительной литературы по заданной теме доклада;
- составление плана доклада;
- работа со словарями, справочниками и нормативными документами;
- просмотр обучающих видеозаписей по теме доклада

для закрепления и систематизации знаний:

- составление плана и тезисов презентации по теме доклада;
- составление презентации;
- составление библиографического списка по теме доклада;
- подготовка к публичному выступлению;
- составление возможных вопросов по теме доклада и ответов на них.

для формирования навыков и умений:

- публичное выступление;
- выполнение рисунков, схем, эскизов оборудования;
- рефлексивный анализ профессиональных умений.

Варианты контрольных работ и темы докладов приведены в комплекте оценочных средств дисциплины.

Подготовка к выполнению и написанию курсовой работы (проекта)

Курсовая работа (проект) – форма контроля для демонстрации обучающимся умений работать с объектами изучения, критическими источниками, справочной и энциклопедической литературой, логично и грамотно излагать собственные умозаключения и выводы, обосновывать и строить априорную модель изучаемого объекта или процесса, создавать содержательную презентацию выполненной работы.

При выполнении и защите курсовой работы (проекта) оценивается умение самостоятельной работы с объектами изучения, справочной литературой, логично и грамотно излагать собственные умозаключения и выводы, обосновывать выбранную технологическую схему и принятый тип и количество оборудования, создавать содержательную презентацию выполненной работы (пояснительную записку и графический материал).

Рекомендуемые задания для самостоятельной внеаудиторной работы студента, направленные на подготовку к курсовой работе (проекту):

для овладения знаниями:

- чтение основной и дополнительной литературы;
- работа со словарями, справочниками и нормативными документами;
- составление плана выполнения курсовой работы (проекта);
- составление списка использованных источников.

для закрепления и систематизации знаний:

- работа учебно-методическими материалами по выполнению курсовой работы (проекта);
- изучение основных методик расчёта технологических схем, выбора и расчёта оборудования;
- подготовка тезисов ответов на вопросы по тематике курсовой работы (проекта).

для формирования навыков и умений:

- решение задач по образцу и вариативных задач;
- выполнение рисунков, схем, компоновочных чертежей;
- оформление текстовой и графической документации.

Тематика курсовых работ (проектов) приведены в комплекте оценочных средств дисциплины.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

Подготовка к зачёту

Зачёт по дисциплине может быть проведён в виде теста или включать в себя защиту контрольной работы (доклад с презентацией).

Тест – это система стандартизированных заданий, позволяющая автоматизировать процедуру измерения уровня знаний и умений обучающегося.

При самостоятельной подготовке к зачёту, проводимому в виде теста, студенту необходимо:

- проработать информационный материал (конспект лекций, учебное пособие, учебник) по дисциплине; проконсультироваться с преподавателем по вопросу выбора дополнительной учебной литературы;
- выяснить условия проведения теста: количество вопросов в тесте, продолжительность выполнения теста, систему оценки результатов и т. д.;
- приступая к работе с тестом, нужно внимательно и до конца прочитать вопрос и предлагаемые варианты ответов, выбрать правильные (их может быть несколько), на отдельном листке ответов вписать цифру вопроса и буквы, соответствующие правильным ответам.

В процессе выполнения теста рекомендуется применять несколько подходов в решении заданий. Такая стратегия позволяет максимально гибко оперировать методами решения, находя каждый раз оптимальный вариант. Не нужно тратить слишком много времени на трудный вопрос, а сразу переходить к другим тестовым заданиям, к трудному вопросу можно обратиться в конце. Необходимо оставить время для проверки ответов, чтобы избежать механических ошибок.

Зачёт также может проходить в виде защиты контрольной работы (доклад с презентацией). Методические рекомендации по подготовке и выполнению доклада с презентацией приведены в п. «Подготовка и написание контрольной работы».

Подготовка к экзамену

Промежуточная аттестация по итогам освоения дисциплины проводится в форме экзамена.

Билет на экзамен включает в себя теоретические вопросы и практико-ориентированные задания.

Теоретический вопрос – индивидуальная деятельность обучающегося по концентрированному выражению накопленного знания, обеспечивает возможность одновременной работы всем обучающимся за фиксированное время по однотипным заданиям, что позволяет преподавателю оценить всех обучающихся.

Практико-ориентированное задание – средство проверки умений применять полученные знания для решения задач определенного типа по определенной теме.

При самостоятельной подготовке к экзамену студенту необходимо:

- получить перечень теоретических вопросов к экзамену;
- проработать пройденный материал (конспект лекций, учебное пособие, учебник) по дисциплине, при необходимости изучить дополнительные источники;
- составить планы и тезисы ответов на вопросы;
- проработать все типы практико-ориентированных заданий;
- составить алгоритм решения основных типов задач;
- выяснить условия проведения экзамена: количество теоретических вопросов и практико-ориентированных заданий в экзаменационном билете, продолжительность и форму проведения экзамена (устный или письменный), систему оценки результатов и т. д.;
- приступая к работе с экзаменационным билетом, нужно внимательно прочитать теоретические вопросы и условия практико-ориентированного задания;
- при условии проведения устного экзамена составить план и тезисы ответов на теоретические вопросы, кратко изложить ход решения практико-ориентированного задания;
- при условии проведения письменного экзамена дать полные письменные ответы на теоретические вопросы; изложить ход решения практико-ориентированного задания с численным расчётом искомых величин.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебно-методическому

комитету
С.А. Уиоров



**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО ФИЗИКЕ ЗЕМЛИ**

Специальность:

21.05.03 Технология геологической разведки

форма обучения: очная, заочная

Автор: Болотнова Л. А., Филатов В. В.

Екатеринбург

2020

Рецензенты: Д. С. Вагшаль, канд. геол.-минерал. наук, Геофизический отдел Комитета природных ресурсов по Свердловской области;
В. В. Кормильцев, д-р геол.-минерал. наук, профессор, зав. лабораторией электрометрии ИГ УрО РАН

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Уральского государственного горного университета

Филатов В. В., Кузин А. В.

Ф 51 ФИЗИКА ЗЕМЛИ: практикум / В. В. Филатов, А. В. Кузин; Урал. гос. горный ун-т. – Изд. 3-е, исправл. и доп. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2017. – 26 с.

Практикум содержит темы, методические указания, формулы, варианты заданий для выполнения практических занятий по дисциплине «Физика Земли». В справочном отделе приведены численные значения основных физических параметров Земли и физических констант, указания по переводу единиц физических величин в Международную систему СИ.

Практикум предназначен для студентов вузов, обучающихся по специальности 21.05.03 – «Технология геологической разведки».

- © Филатов В. В., Кузин А. В., 1999
- © Филатов В. В., Кузин А. В., 2001
- © Филатов В. В., Кузин А. В., 2011
- © Уральская государственная горно-геологическая академия, 1999, 2001
- © Уральский государственный горный университет, 2011

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АБСОЛЮТНОГО ВОЗРАСТА ГОРНЫХ ПОРОД

Содержание работы: по результатам определения изотопов свинца Pb^{204} , Pb^{206} , Pb^{207} , Pb^{208} в горных породах различных месторождений вычислить абсолютный возраст этих пород.

Расчетные формулы:

$$\frac{Pb^{206}}{Pb^{204}} = 18,90 - 12,00(e^{0,159t} - 1); \quad (1.1)$$

$$\frac{Pb^{207}}{Pb^{204}} = 15,98 - 0,086(e^{0,072t} - 1); \quad (1.2)$$

$$\frac{Pb^{208}}{Pb^{204}} = 38,82 - 37,00(e^{0,049t} - 1). \quad (1.3)$$

Пример задания исходных данных и оформления результатов расчетов дан в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Содержание изотопов свинца, возраст образцов горных пород

Месторождение	Изотопный состав свинца			Возраст по трем изотопным отношениям, млрд лет	Среднее значение возраста, млрд лет
	Pb^{206}	Pb^{207}	Pb^{208}		
Рудник Садбери	16,20	15,36	36,99		
Рудник Садбери	16,15	15,60	35,94		
Юго, Швеция	15,92	15,61	35,89		
Корске, Финляндия	15,95	15,57	36,26		
Перная, Финляндия	15,85	15,51	36,00		
Сандава, Карелия	14,88	14,91	33,31		
Питкранта, Карелия	14,26	14,77	33,23		
Ксми, Карелия	15,43	14,87	34,50		
Сада, Швеция	15,40	14,95	34,00		

Примечание. Содержание Pb^{204} равно 1, варианты исходных заданий приведены в главе 10.

Задание

1. Преобразовать формулы (1.1)–(1.3) к виду, позволяющему определить время t .

2. Провести расчеты абсолютного возраста для каждого образца по трем преобразованным формулам (1.1)–(1.3).

3. Рассчитать среднее значение возраста каждого образца по трем определениям (резко отличающиеся значения возраста при расчете среднего значения следует отбросить, так как отдельные изотопы могли быть привнесены или вынесены из горных пород при метасоматозе и других геологических явлениях).

2. ВЫЧИСЛЕНИЕ НОРМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Содержание работы: по формуле Гельмерта 1884 г. и одной из формул (2)–(15) вычислить нормальное значение ускорения силы тяжести в зависимости от ширины точки на поверхности Земли в интервале широт от 90° (полюс) до 0° (экватор). Шаг измерения широты $\Delta\varphi = 10^\circ$. Величину долготы (при расчетах по некоторым формулам) принять 60° . По результатам расчетов построить графики (рис. 2.1).

Расчетные формулы:

1. Гельмерт, 1884 г.

$$\gamma_0 = 978,00(1 + 0,005310 \sin^2 \varphi);$$

2. Гельмерт, 1901–1909 гг.

$$\gamma_0 = 978,030(1 + 0,005302 \sin^2 \varphi - 0,000007 \sin^2 2\varphi);$$

3. Гельмерт, 1915 г.

$$\gamma_0 = 978,052[1 + 0,005285 \sin^2 \varphi - 0,000007 \sin^2 2\varphi + 0,000018 \cos^2 \varphi \cos 2(\lambda + 17^\circ)];$$

4. Боуи, 1917 г.

$$\gamma_0 = 978,039(1 + 0,005294 \sin^2 \varphi - 0,000007 \sin^2 2\varphi);$$

5. Гейсканен, 1924 г.

$$\gamma_0 = 978,052[1 + 0,005285 \sin^2 \varphi - 0,000007 \sin^2 2\varphi + 0,000027 \cos^2 \varphi \cos 2(\lambda + 18^\circ)];$$

6. Гейсканен, 1928 г.

$$\gamma_0 = 978,049[1 + 0,005293 \sin^2 \varphi - 0,000007 \sin^2 2\varphi + 0,000019 \cos^2 \varphi \cos 2(\lambda + 0^\circ)];$$

7. Гейсканен, 1928 г.

$$\gamma_0 = 978,049(1 + 0,005289 \sin^2 \varphi - 0,000007 \sin^2 2\varphi);$$

8. Кассинис, 1930 г.

$$\gamma_0 = 978,049(1 + 0,0052884 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi);$$

9. Гейсканен, 1938 г.

$$\gamma_0 = 978,0524[1 + 0,0052970 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi + 0,0000276 \cos^2 \varphi \cos 2(\lambda + 25^\circ)];$$

10. Жонглович, 1952 г.

$$\gamma_0 = 978,0573(1 + 0,0052837 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi);$$

11. Жонглович, 1952 г.

$$\gamma_0 = 978,0573[1 + 0,005268 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi + 0,0000155 \cos^2 \varphi \cos 2(\lambda + 6^\circ)];$$

12. Гейсканен, 1957 г.

$$\gamma_0 = 978,0497(1 + 0,0032902 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi);$$

13. Гейсканен, 1957 г.

$$\gamma_0 = 978,0516[1 + 0,0052910 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi + 0,0000106 \cos^2 \varphi \cos 2(\lambda + 6^\circ)];$$

14. Грушинский, 1960 г.

$$\gamma_0 = 978,0531(1 + 0,0052883 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi);$$

15. Международная формула, 1967 г.

$$\gamma_0 = 978,01318(1 + 0,0053024 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi).$$

Пример оформления результатов расчетов.

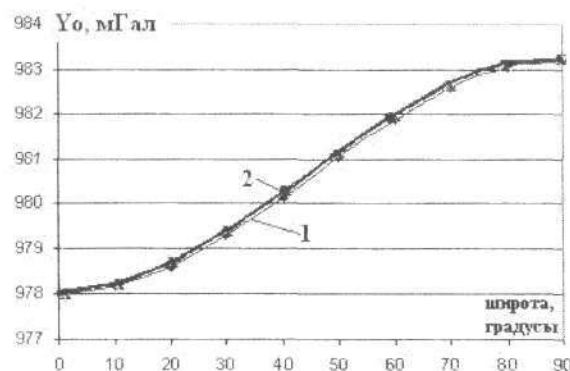


Рис. 2.1. Изменение нормального значения ускорения силы тяжести в зависимости от широты:

1 – формула Гельмерта, 1884 г.; 2 – одна из формул (2)–(15)

3. ИЗМЕРЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Содержание работы: провести измерение ускорения силы тяжести по вертикальному профилю и вычислить нормальное значение вертикального градиента ускорения силы тяжести.

Оборудование: гравиметр типа ГАК, ГНУ-КС, батарея напряжением 3 В, мерная лента (рулетка).

Порядок выполнения работы

1. Место проведения измерений. Измерения выполняют вдоль вертикального профиля, совмещенного с лестничным пролетом. Пункты наблюдения располагаются на площадках первого и четвертого этажей.

2. Методика измерений.

а) установить гравиметр на площадке, провести его горизонтирование с помощью подъемных винтов;

б) подключить батарею к разъемам гравиметра, при этом загорится лампочка подсветки оптической системы, прибор готов к работе;

в) вращая микрометренный винт измерительного устройства, совместить блик в окуляре гравиметра с нулевой линией внутренней шкалы;

г) взять отчет S_i на отсчетном устройстве гравиметра, записать его в журнал;

д) вращением измерительного винта (влево или вправо, но всегда в одну сторону) отвести блик и снова совместить его с нулевой линией, взять новый отчет. Должно быть взято пять отсчетов на каждой точке измерения. Исключить из отсчетов наибольший и наименьший, по оставшимся трем рассчитать среднее значение.

3. Схема измерений. Измерения относительного изменения ускорения силы тяжести на двух площадках, расположенных на различной высоте, выполняют по цикловой схеме (рис. 3.1). Цикловая схема измерений предусматривает взятие отсчета S_1 на площадке I, переход на площадку II, взятие отсчета S_2 , возвращение на площадку I, взятие отсчета S'_1 .

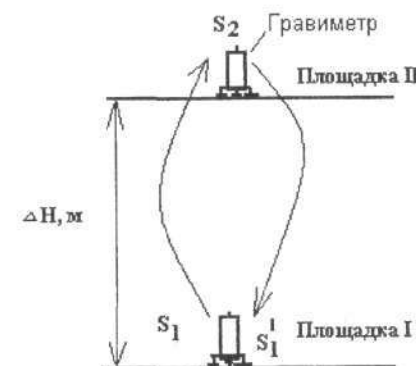


Рис. 3.1. Схема измерений ускорения силы тяжести и ее вертикального градиента

4. Расчет относительного изменения силы тяжести между двумя площадками проводят по формуле

$$\Delta g = C \left[S_2 - \frac{1}{2}(S_1 + S'_1) \right], \quad (3.1)$$

где C – цена деления гравиметра.

5. Мерной лентой измеряют разность высот ΔH между площадками.

6. Вычисляют вертикальный градиент ускорения силы тяжести (мГал/м):

$$g(H) = \frac{\Delta g}{\Delta H} \quad (3.2)$$

и сравнивают его с теоретическим значением 0,3086 мГал/м.

4. ПОСТРОЕНИЕ ГОДОГРАФОВ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

Содержание работы:

- выполнить корреляцию (с помощью преподавателя) на учебной сейсмограмме фаз прямой и преломленной волн;
- построить на миллиметровой бумаге годографы волн: прямой ($\Gamma_{пр}$), преломленной ($\Gamma_{гол}$) (рис. 4.1);
- рассчитать скорость волн по годографам (см. рис. 4.1).

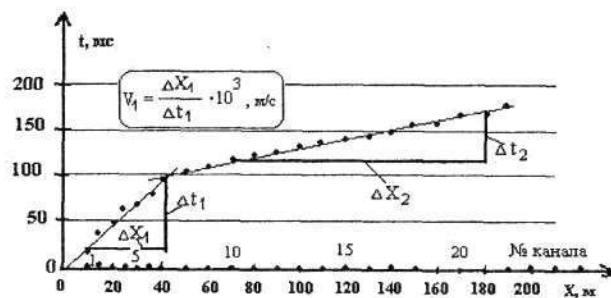


Рис. 4.1. Годографы прямой и преломленной волн

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ЭПИЦЕНТРА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Содержание работы: зная координаты планового положения сейсмических станций (рис. 5.1) и время регистрации продольных T_p и поперечных T_s упругих волн от очага землетрясения (табл. 5.1), определить координаты эпицентра землетрясения.

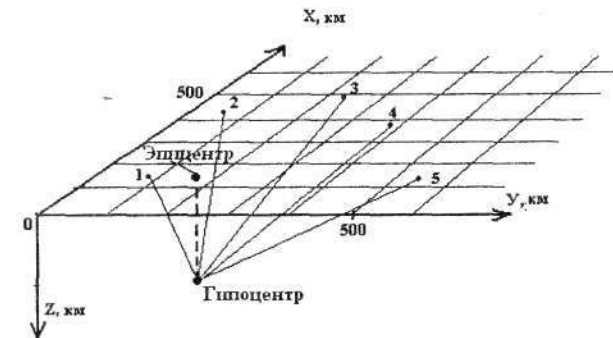


Рис. 5.1. Схема хода лучей упругих волн от гипоцентра землетрясения к сейсмическим станциям

Таблица 5.1
Координаты станций и время регистрации прихода волн

Сейсмологические станции	Координаты станций, км		Отметка прихода времени волн, с		Разность, с $T_s - T_p$	Абсолютное время, с	
	X	Y	T_p	T_s		t_p	t_s
1	800	200	70,28	109,77			
2	1000	900	99,98	160,68			
3	1100	400	85,72	136,23			
4	400	100	99,98	160,68			
5	200	300	106,28	171,48			

$$V_p = 6 \text{ км/с}, V_s = 3,5 \text{ км/с}.$$

Порядок выполнения работы

Построить график Вадати (рис. 5.2) и определить по нему время, когда произошло землетрясение (t_0).

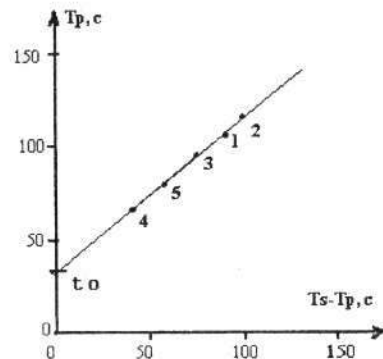


Рис. 5.2. График Вадати

2. Вычислить время распространения продольной и поперечной волн от очага землетрясения до сейсмических станций по формулам:

$$t_p = T_p - t_0; \quad (5.1)$$

$$t_s = T_s - t_0. \quad (5.2)$$

По формулам (5.3) и (5.4) определить координаты эпицентра землетрясения:

$$x_0 = \frac{B_2 D_1 - B_1 D_2}{A_1 B_2 - B_1^2}; \quad (5.3)$$

$$y_0 = \frac{A_1 D_2 - B_1 D_1}{A_1 B_2 - B_1^2}, \quad (5.4)$$

где A_1, B_1, B_2, D_1, D_2 – коэффициенты, определяемые по формулам:

$$A_1 = \sum_{i=2}^5 [2(x_1 - x_i)]^2; \quad B_1 = \sum_{i=2}^5 [2(x_1 - x_i)][2(y_1 - y_i)]; \quad B_2 = \sum_{i=2}^5 [2(y_1 - y_i)]^2;$$

$$D_1 = \sum_{i=2}^5 \{2(x_1 - x_i)[(x_1^2 - x_i^2) + (y_1^2 - y_i^2) + V_p^2(t_{pi}^2 - t_{p1}^2)]\};$$

$$D_2 = \sum_{i=2}^5 \{2(y_1 - y_i)[(x_1^2 - x_i^2) + (y_1^2 - y_i^2) + V_p^2(t_{pi}^2 - t_{p1}^2)]\}.$$

4. Построить на миллиметровой бумаге схему расположения сейсмических станций и показать на ней положение эпицентра землетрясения.

6. ВЫЧИСЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ТЕМПЕРАТУРНОГО ГРАДИЕНТА ДЛЯ МОДЕЛИ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Содержание работы:

1. Рассчитать теоретические значения среднего температурного градиента (G) по данным табл. 6.1:

$$G = \left(\frac{A}{\lambda} \right) H. \quad (6.1)$$

Таблица 6.1

Значения удельной объемной теплогенерации и коэффициента теплопроводности для модели земной коры

Теплогенерация $A \cdot 10^{-7}, \text{Вт/м}^3$	Теплопроводность $\lambda, \text{Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$
7,5	1,9–3,2
7,6	2,6–3,5
8,9	2,1–2,3

2. Рассчитать кривые теоретических температур T в земной коре по формуле:

$$T = T_0 + \frac{A}{3\lambda} \left[\frac{1}{2} (R_3^2 - R^2) - (R_3 - H)^3 \frac{R_3 - R}{R_3 R} \right], \quad (6.2)$$

где $T_0 = 0^\circ\text{C}$ – температура на поверхности Земли; R_3 – радиус земного шара, 6371 км; R – расстояние от центра Земли до произвольной точки внутри земной коры, R изменяется от 6369 до 6331 км с шагом 2 км; $H = 40$ км – мощность коры.

3. Построить график изменения температуры для модели земной коры (рис. 6.1).

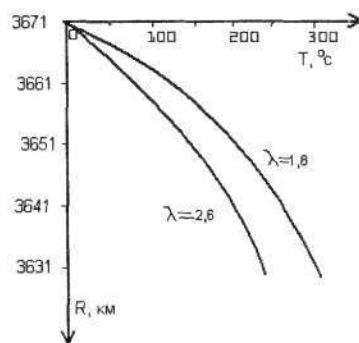


Рис. 6.1. Графики температуры для модели земной коры

7. ИЗМЕРЕНИЕ ВАРИАЦИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Содержание работы: провести измерение вариаций вертикальной составляющей магнитной индукции (z -составляющей) геомагнитного поля в течение 5 минут с интервалом времени 5-10 с путем снятия отсчетов по шкале оптико-механического магнитометра типа М-27. Результаты измерений и вычислений записать в специальный журнал.

Обработка результатов:

1. Значения отсчетов магнитометра умножить на цену деления (10 нТл/деление), записать в соответствующую колонку таблицы.
2. Построить вариограмму (рис. 7.1).
3. Определить амплитуду изменения значений магнитной индукции за время наблюдения.
4. Оценить интенсивность вариаций в баллах (табл. 7.1).



Рис. 7.1. Вариограмма значений вертикальной составляющей магнитного поля (время местное)

Таблица 7.1

Шкала балльности вариаций магнитного поля

Амплитуда изменения индукции магнитного поля, нТл	0-5,5	11	22	44	77	132	220	363	550	>550
Баллы	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Оценка	Норма			Возмущение			Буря			

8. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГРАВИТАЦИОННЫХ И РОТАЦИОННЫХ СИЛ ЗЕМЛИ

1. Определить величину ускорения силы тяжести на полюсах Земли в единицах СИ, в миллигалах, по формуле

$$g = \frac{kM_3}{R^2}, \quad (8.1)$$

где k – гравитационная постоянная; M_3 – масса Земли; R – полярный радиус Земли (см. эти и прочие параметры в главе 11).

Рассчитать силу гравитационного притяжения единичной массы (1 кг).

2. Рассчитать центробежную силу, действующую на физическое тело, расположенное на: а) экваторе Земли, б) на широте

56°. Определить центробежное ускорение, действующее на единичную массу данного тела, перевести значение ускорения в миллигалы по формулам:

$$F_{\text{цб}} = m\omega^2 R = m \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 R, \quad (8.2)$$

$$C = \frac{F_{\text{цб}}}{m}, \quad (8.3)$$

3. Определить соотношение силы притяжения и центробежной силы, действующих на единичную массу, расположенную: а) на экваторе Земли на широте 30°, по формулам (8.1), (8.3), (8.4)

$$C_{(\varphi)} = \omega^2 R \cos^2 \varphi. \quad (8.4)$$

4. Рассчитать линейную скорость материальной точки, расположенной: а) на экваторе Земли, б) на широте 35° по формулам:

$$V = \frac{2\pi}{T} R; \quad (8.5)$$

$$V = \frac{2\pi}{T} R \cos \varphi. \quad (8.6)$$

5. Определить силу притяжения между Землей и Луной по формуле

$$F = \frac{kM_3M_{\text{Л}}}{R_{3\text{Л}}^2}. \quad (8.7)$$

6. Определить линейную скорость движения Земли по орбите вокруг Солнца по формуле

$$V_3 = \frac{2\pi}{T_3} R_{\text{С-З}}, \quad (8.8)$$

где T_3 – время движения Земли по орбите вокруг Солнца, звездный год (в секундах).

9. ОБРАБОТКА ДАННЫХ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ

Содержание работы. При магнитотеллурических зондированиях (МТЗ) регистрируют в течение нескольких часов или суток вариации геомагнитного поля и вариации наведенных (индуцированных) электрических токов в Земле. По соотношению напряженности E электрического и индукции B магнитного полей рассчитывают комплексное сопротивление среды – импеданс $Z = E/H$. По импедансу рассчитывают значения удельного электрического сопротивления ρ_T . Индекс T при сопротивлении означает, что его величина определяется для электромагнитного поля с определенным периодом колебаний T , то есть с различной частотой. Известно, что волны с низкой частотой распространяются на больших глубинах, а с высокой – у поверхности проводника (Земли). Это проявление так называемого «поверхностного эффекта» в распространении электромагнитных волн в проводнике. Выделяя на вариограммах волны различной частоты, можно оценить удельное электрическое сопротивление различных слоев Земли, вплоть до ее ядра.

При построении кривых МТЗ на билогарифмических бланках по одной из осей откладывают ρ_T , а по другой – значения корня квадратного из величины периода электромагнитного колебания (рис. 9.1).

На кривых МТЗ к ее восходящим частям можно провести вспомогательные линии продольной проводимости S , а к нисходящим – линии h мощности слоев высокого поперечного сопротивления. Используя значения квадратного корня из периода колебаний волн, отсекаемых этими линиями по формулам (9.1)–(9.6), можно определить значения продольной проводимости низкоомных слоев и мощности слоев высокого сопротивления:

$$S_1 = 356\sqrt{T_S}; \quad (9.1)$$

$$S_{10} = 114\sqrt{T_S}; \quad (9.2)$$

$$S_{100} = 35,6\sqrt{T_S}; \quad (9.3)$$

$$h_1 = 0,396\sqrt{T_h}; \quad (9.4)$$

$$h_{10} = 1,28\sqrt{T_h}; \quad (9.5)$$

$$h_{100} = 3,96\sqrt{T_h}. \quad (9.6)$$

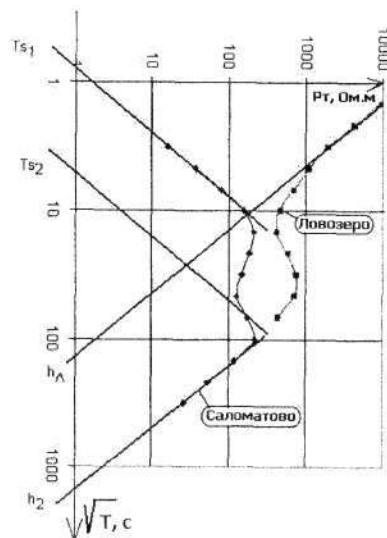


Рис. 9.1. Кривые МТЗ и вспомогательные линии

Индексы 1, 10, 100 означают значение r_T на билогарифмическом бланке, через которое проходит ось $\sqrt{T}$, на которой для конкретной кривой МТЗ сняты значения T_S и T_h .

Порядок выполнения работы

1. Построить на билогарифмическом бланке кривую МТЗ.
2. Провести на кривой асимптотические линии продольной проводимости S и мощности слоев высокого поперечного сопротивления h .

3. Снять значения $\sqrt{T_S}$ и $\sqrt{T_h}$ для выделяемых пластов с повышенной продольной проводимостью и повышенным поперечным сопротивлением и по формулам (9.1)–(9.6) рассчитать значения продольной проводимости и мощности слоев высокого поперечного сопротивления.

4. Рассчитать удельное электрическое сопротивление r_T верхнего слоя мощностью $H = 40$ км (40000 м), воспользовавшись формулой: $H = S r_T$.

5. Дать геологическое истолкование полученным при обработке кривой МТЗ результатам, то есть оценить мощности выделяемых слоев: коры, глубины до астеносферного слоя, мощности высокоомной мантии, глубины до электропроводного ядра и т. п.

6. Составить краткую пояснительную записку к выполненной работе.

10. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

1. Определение абсолютного возраста горных пород свинцовым методом.

Месторождение	Содержание изотопов свинца		
	Pb ²⁰⁶	Pb ²⁰⁷	Pb ²⁰⁸
1	2	3	4
Задание 1			
Питкеранта, Карелия	14,26	14,77	33,23
Кинов-Кознала, Финляндия	14,27	14,64	32,96
Кинов-Кознала, Финляндия	14,85	14,99	34,44
Беломорье, Карелия	14,97	15,13	35,00
Северная Варака, Карелия	14,76	14,96	35,20
Кемь, Карелия	15,43	14,87	34,50
Сала, Швеция	15,40	14,95	34,00
Орнарви, Финляндия	15,74	15,46	34,04
Орнарви, Финляндия	16,50	15,70	36,80
Задание 2			
Лонгбон, Швеция	15,83	15,45	35,60
Тэдино, Карелия	14,76	14,85	35,17
Юто, Швеция	15,92	15,61	35,89

Продолжение задания 1

Месторождение	Содержание изотопов свинца		
	Pb ²⁰⁶	Pb ²⁰⁷	Pb ²⁰⁸
1	2	3	4
Фалун, Швеция	15,34	14,99	33,84
Фалун, Швеция	15,89	15,66	35,86
Корске, Финляндия	15,95	15,57	36,26
Атту, Финляндия	15,82	15,47	35,89
Айла, Финляндия	15,95	15,64	36,24
Пакили, Финляндия	15,73	15,36	35,30
Задание 3			
Парнайа, Финляндия	15,85	15,51	36,00
Пенийавара, Финляндия	15,74	15,45	35,98
Оутокульту, Финляндия	14,90	15,23	35,21
Ялонвара, Приладожье	14,95	15,04	34,35
Клее 6, Питкеранта	14,72	14,96	33,61
Люпико, Питкеранта	14,66	14,88	33,75
Хонунвара, Питкеранта	14,60	14,86	33,54
Фадейн, Келья	14,90	14,92	33,71
Сондала, Карелия	14,88	14,91	33,31
Задание 4			
Рудник Садбери	16,20	15,76	36,99
То же	16,15	15,60	35,94
Юто, Швеция	15,92	15,61	35,89
Корске, Финляндия	15,95	15,57	36,26
Пернайа, Финляндия	15,85	15,51	36,00
Сондала, Карелия	14,88	14,91	33,31
Питкеранта, Карелия	14,26	14,77	33,23
Кемь, Карелия	15,43	14,87	34,50
Сала, Швеция	15,40	14,95	34,00
Задание 5			
Галениты из Тандер	18,19	15,31	37,78
Бай, Онтарио	18,32	15,25	37,14
Рудник Садбери, Онтарио	16,30	15,49	36,97
То же	16,43	15,69	36,93
— " —	15,99	15,48	36,56
— " —	16,20	15,16	36,99
— " —	16,15	15,60	35,94
— " —	15,94	15,34	36,56
«8-е Марта»	18,02	15,42	37,91

5. Определение координат эпицентра землетрясения

Сейсмологические станции	Координаты станций, км		Отметка времени прихода волн, с	
	X	Y	T _p	T _s
1	2	3	4	5
Задание 1				
1	300	500	78,87	127,80
2	500	200	70,10	113,03
3	1200	300	101,28	166,48
4	1000	600	62,78	100,48
5	700	900	78,87	127,80
Задание 2				
1	200	400	104,98	165,68
2	600	500	43,35	60,40
3	1000	700	82,37	126,91
4	800	300	60,82	89,97
5	1100	100	115,73	184,11
Задание 3				
1	800	200	70,28	109,77
2	1000	900	99,98	160,68
3	1100	400	85,72	136,23
4	400	100	99,98	160,68
5	200	300	106,28	171,48
Задание 4				
1	1000	400	65,28	104,77
2	300	900	105,73	174,11
3	400	400	65,28	104,77
4	700	1000	94,98	155,68
5	200	800	108,60	179,03
Задание 5				
1	500	600	55,82	84,97
2	900	1000	106,28	171,48
3	300	800	99,98	160,68
4	100	400	117,74	191,11
5	1100	500	83,87	12,80
Задание 6				
1	600	400	33,87	54,48
2	900	1000	94,75	158,96
3	100	500	105,00	176,43
4	300	1100	125,18	211,03
5	200	800	102,18	171,60

Продолжение задания 5

1	2	3	4	5
Задание 7				
1	100	400	115,73	189,11
2	400	1200	141,02	232,46
3	1000	600	68,28	107,77
4	1200	700	104,28	169,48
5	300	100	108,73	177,11
Задание 8				
1	1200	900	115,02	192,17
2	800	300	47,82	76,97
3	200	1000	126,02	211,03
4	600	200	62,28	101,77
5	100	700	113,72	189,94
Задание 9				
1	900	900	94,75	158,86
2	1000	400	77,65	129,54
3	800	300	67,36	111,90
4	500	200	83,17	139,01
5	600	600	60,28	99,76
Задание 10				
1	1000	500	80,09	123,01
2	400	400	82,36	126,90
3	300	100	120,08	191,43
4	1000	200	98,07	154,01
5	300	700	101,65	159,97

6. Вычисление температуры (T) и геотермического градиента (G) для модели земной коры

Задание	Плотность тепловых источников $A \cdot 10^{-7}, \text{Вт/м}^3$	Температуропроводность горных пород, $\text{Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$
1	7,9	2,1–3,1
2	8,0	2,2–2,8
3	8,4	2,1–3,7
4	8,5	3,6–5,3
5	7,9	2,0–3,0
6	8,9	2,1–2,7
7	8,2	1,5–2,2
8	8,3	2,0–2,3
9	8,6	2,5–3,2
10	8,7	1,3–1,8

Продолжение задания 6

Задание	Плотность тепловых источников, $A \cdot 10^{-7}, \text{Вт/м}^3$	Температуропроводность горных пород, $\text{Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$
11	8,0	1,9–3,2
12	8,1	2,6–3,5
13	8,0	1,8–3,1
14	8,1	2,5–3,4
15	8,6	2,6–3,3
16	8,7	1,4–1,9
17	8,2	1,6–2,3
18	8,3	2,1–2,4
19	8,4	2,0–3,8
20	8,5	3,7–5,2

11. СПРАВОЧНЫЙ ОТДЕЛ

Радиоактивные элементы и константы их распада

Элемент	Кларк изотопа, умноженный на относит. содержа- ние изотопа в природной смеси элементов, %	Конечный продукт распада	Постоянная распада λ , 1/лет	Период полураспада, T, лет
Уран U_{92}^{238}	$2,6 \cdot 10^{-4} \cdot 0,993$	Свинец Pb_{82}^{208}	$1,53 \cdot 10^{-10}$	$4,498 \cdot 10^9$
Актиноуран U_{92}^{235}	$2,6 \cdot 10^{-4} \cdot 0,0073$	Свинец Pb_{82}^{207}	$9,722 \cdot 10^{-10}$	$7,13 \cdot 10^8$
Торий Th_{90}^{232}	$11,3 \cdot 10^{-4} \cdot 1$	Свинец Pb_{82}^{208}	$4,931 \cdot 10^{-11}$	$1,39 \cdot 10^{10}$
Рубидий Rb_{37}^{87}	$0,009 \cdot 0,272$	Стронций Sr_{38}^{87}	$1,39 \cdot 10^{-11}$ $1,47 \cdot 10^{-11}$	$5,0 \cdot 10^{10}$ $4,7 \cdot 10^{10}$
Самарий Sm_{62}^{146}	$7 \cdot 10^{-4} \cdot 0,149$	Неодим Nd_{60}^{143}	$6,6 \cdot 10^{-12}$	$1,05 \cdot 10^{10}$
Неодим Nd_{60}^{150}	$3,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,056$	Прометий Pm_{61}^{150}	$6,9 \cdot 10^{-17}$	$1 \cdot 10^{16}$
Радиоуглерод C_6^{14}		Азот N_7^{14}	$1,245 \cdot 10^{-4}$	5568

Некоторые параметры и законы Солнечной системы

Масса Солнца $M_C = 1,991 \cdot 10^{30}$ кг.

Масса Земли $M_3 = 5,976 \cdot 10^{24}$ кг.

Масса Луны $M_L = 7,17 \cdot 10^{22}$ кг.

Расстояние от Земли до Солнца $150 \cdot 10^6$ км.

Расстояние от Земли до Луны 388400 км.

Экваториальный радиус Земли $R_3 = 6378,16$ км.

Полярный радиус Земли $R_n = 6356,18$ км.

Сжатие Земли $e = (R_3 - R_n)/R_3 = 1/298,25$.

Гравитационная постоянная $K = 6,67 \cdot 10^{-11}$ м³/кг·с².

Сила гравитационного притяжения Землей массы m :

$$F = K \frac{mM_3}{R^2}.$$

Центробежная сила, действующая на массу m :

$$F_u = m\omega^2 r = m \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 r,$$

где T – период вращения; r – радиус вращения.

Звездный год Земли $T_3 = 365$ сут. 6 ч. 9 мин. 10 с = 31558150 с.

Перевод внесистемных единиц в единицы СИ

Параметр	Единица измерения	Перевод единицы в СИ
Длина	ангстрем	$1 \cdot 10^{-10}$ м
Объем	литр	$1 \cdot 10^{-3}$ м
Давление	Атмосфера	101325 Па
	мм рт. ст.	103,322 Па
	бар	$1 \cdot 10^5$ Па
	760 мм рт. ст.	101325 Па
Мощность	Лошадиная сила	735,499 Вт
Удельная теплоемкость	кал/(г·К°)	$4,1868 \cdot 10^3$ Дж/(г·К°)
Количество теплоты	кал	4,1686 Дж
Удельное количество теплоты	кал/г	$4,1868 \cdot 10^3$ Дж/кг
Тепловой поток	кал/с	4,1868 Вт
Теплопроводность	кал/(с·см·К°)	$4,1868 \cdot 10^2$ Вт/(м·К°)
Коэффициент лучеиспускания	кал/(с·см ² ·К°)	$4,1868 \cdot 10^4$ Вт/(м ² ·К°)
Газовая постоянная	кал/(г·К°)	$4,1868 \cdot 10^3$ Дж/(г·К°)

Перевод различных единиц в метрическую систему

Параметр	Единица измерения	Метрическая система
Длина	1 дюйм	2,54 см
	1 фут	30,3 см
	1 миля	1,61 км
	1 морская миля	1,85 км
Объем	1 л	10^3 см ³
Масса	1 кг	10^3 г
Скорость	1 км/ч	27,8 см/с
Ускорение	1 гал	1 см/с ²
Давление	1 бар	10^6 дин/см ²
	1 атм	$1013 \cdot 10^3$ дин/см ²
Энергия	1 Дж	10^7 эрг

Соотношение единиц температуры в различных системах

По Цельсию, °C	По Кельвину, К	По Фаренгейту, F
0	273,2	32
10	283,2	50
20	293,2	68
30	303,2	86
40	313,02	104
100	373,02	212
-40	233,02	-40

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Определение абсолютного возраста горных пород	3
2. Вычисление нормального значения ускорения силы тяжести ...	4
3. Измерение ускорения силы тяжести	6
4. Построение годографов сейсмических волн	8
5. Определение координат эпицентра землетрясения	9
6. Вычисление температуры и температурного градиента для модели земной коры	11
7. Измерение вариаций геомагнитного поля	12
8. Теоретический анализ гравитационных и ротационных сил Земли	13
9. Обработка данных магнитотеллурических зондирований	15
10. Варианты заданий	17
11. Справочный отдел	21

МИНОБРНАУКИ РФ

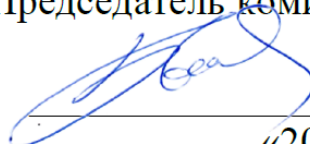
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

ОДОБРЕНО

методической комиссией

факультета геологии и геофизики

Председатель комиссии



В. И. Бондарев

«20» марта 2020 г.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

«ФИЗИКА ЗЕМЛИ»

Специальность:

21.05.03 Технология геологической разведки

форма обучения: очная, заочная

Екатеринбург

2020

СОДЕРЖАНИЕ

Введение

1. Задания контрольной работы
2. Методические рекомендации по выполнению контрольной работы
 - 2.1 Оформление контрольной работы
 - 2.2 Критерии оценки контрольной работы
3. Методические рекомендации по составлению глоссария
4. Рекомендуемая литературы для выполнения контрольной работы

Введение

Данные методические указания разработаны в помощь для выполнения контрольной работы по курсу «Физика Земли».

В методических рекомендациях содержится: перечень вопросов контрольной работы, методические рекомендации по выполнению контрольной работы, перечень рекомендуемых учебных изданий, интернет-ресурсов, дополнительной литературы.

Внимательно прочитайте задание контрольной работы, подготовьте рекомендуемую вам литературу (при необходимости), ознакомьтесь с рекомендациями по выполнению работы, с критериями оценивания работы.

Прежде чем сдать выполненную контрольную работу преподавателю на проверку, выполните самооценку по заданным критериям.

Контрольная работа является обязательной для каждого обучающегося и определяется учебным планом. Наличие положительной оценки по контрольной работе необходимо для получения промежуточной аттестации по дисциплине «Физика Земли».

1. Задания для контрольной работы

Вариант 1

Дайте определения следующим понятиям: сила тяжести, сила тяготения, ускорение силы тяжести, гравитационный потенциал. Укажите на отличительные особенности силы тяжести и силы тяготения.

Вариант 2

Для исследования внутреннего строения Земли используют различные методы. Перечислите эти методы и дайте им сравнительную характеристику.

Вариант 3

Опишите сущность радиоизотопного метода определения абсолютного возраста горных пород?

Вариант 4

Земной магнетизм обусловлен действием постоянных источников, расположенных внутри Земли и испытывающих лишь медленные вековые изменения (вариации) и

внешних (переменных) источников, расположенных в магнитосфере Земли и ионосфере. Что это за источники геомагнитного поля и почему различают основное (главное ~99%) и переменное (~1%) геомагнитные поля?

Вариант 5

Для исследования внутреннего строения Земли используют различные методы. Перечислите эти методы и дайте им сравнительную характеристику.

Вариант 6

Земля несет на себе отрицательный электрический заряд. Откуда и как берется этот на Земле этот заряд? Какие сопутствующие явления имеют место при образовании электрического заряда Земли?

Вариант 7

С какой линейной скоростью (в метрах в секунду) движется Екатеринбург, широта которого $56^{\circ} 51'$.

Вариант 8

Если Землю представить глобусом с диаметром в 3 м, как выразится тогда сжатие Земли?

Вариант 9

О глубинном строении Земли судят по продольным и поперечным сейсмическим волнам, которые, распространяясь внутри Земли, испытывают преломление, отражение и затухание, что свидетельствует о расслоенности Земли. Сформулируйте основные законы, описывающие указанные процессы.

Вариант 10

Тепловой поток в точке поверхности Земли составляет 0.071 Вт/м^2 . Какой тепловой поток поступает с поверхности мантии, если коэффициент теплопроводности пород земной коры здесь составляет в среднем 2.5 Вт/(мК) , а её мощность — 40 км ? Температурный градиент $-2^{\circ}/100 \text{ м}$.

Вариант 11

Для того чтобы стрелка компаса, устанавливаясь в плоскости магнитного меридиана, находилась в то же время в горизонтальном состоянии, на южную или северную часть стрелки прикрепляют уравнивающий груз. С какой стороны необходимо прикрепить груз к стрелке компаса в двух исследуемых точках (долгота 0° , широта 20 и широта -40)? В какую сторону (к центру или от центра стрелки) необходимо переместить груз для пользования в настоящем году, если последний раз компасом пользовались в 1975 году?

Вариант 12

Охарактеризуйте карты элементов геомагнитного поля (Z, H, T, dT, dH, dZ) эпохи 2015 года.

Вариант 13

Считая скорость изменения элементов геомагнитного поля постоянной с 1975 года, определите значения элементов магнитного поля для текущего года. Начертите в плоскости магнитного меридиана полный вектор геомагнитного поля T , его горизонтальную (H) и вертикальную (Z) составляющие. Покажите на построенной векторной диаграмме наклонение I . В чем принципиально отличаются векторные диаграммы геомагнитного поля в северных и южных широтах?

Вариант 14

Рассчитайте энергию, выделяющуюся в Земле за счёт радиоактивного распада в течение года. Русский учёный В.И. Вернадский считал радиогенную энергию основной для эволюции Земли. Прав ли он, если Земля ежегодно излучает в космическое пространство порядка $9,2 \cdot 10^{20}$ Дж, а потери её на тектоно-магматические процессы составляют около $1,26 \cdot 10^{20}$ Дж/год?

Вариант 15

Определите энергию приливного торможения Земли, выделившуюся за период её жизни, если угловая скорость вращения Земли за это время уменьшилась в 2 раза. За счёт чего происходит замедление вращения Земли?

Вариант 16

Оцените среднюю плотность слоев Земли: земной коры, мантии и ядра. Сравните со средней плотностью вещества Земли. Плотности каких минералов они соответствуют? Предложите состав ядра.

2. Методические рекомендации по выполнению контрольной работы

Контрольная работа является индивидуальной самостоятельно выполненной работой студента.

Контрольная работа должна содержать следующие структурные элементы:

1. титульный лист;
2. содержание;
3. ответы на контрольные вопросы;
4. список использованных источников;
5. приложения (при необходимости).

Количество источников в списке определяется студентом самостоятельно, рекомендуемое количество от 5 до 10. При этом в списке обязательно должны присутствовать источники, изданные в последние 5 лет.

2.1 Оформление контрольной работы

При выполнении контрольной работы необходимо соблюдать следующие требования:

- текст располагается на одной стороне листа белой бумаги формата А-4;
- размер шрифта - 14 Times New Roman, цвет – черный;
- междустрочный интервал – полуторный;
- поля на странице – размер левого поля – 2 см, правого – 1 см, верхнего - 2 см, нижнего – 2 см;
- текст должен быть отформатирован по ширине листа;
- на первой странице необходимо изложить план (содержание) реферата;
- в конце работы необходимо указать источники использованной литературы.

Список использованных источников должен формироваться в алфавитном порядке по фамилии авторов.

Включенная в список литература нумеруется сплошным порядком от первого до последнего названия. По каждому литературному источнику указывается: автор (или группа авторов), полное название книги или статьи, место и наименование издательства (для книг и брошюр), год издания; для журнальных статей указывается наименование журнала, год выпуска и номер. По сборникам трудов (статей) указывается автор статьи, ее название и далее название книги (сборника) и ее выходные данные. На использованные источники в тексте работы должны быть ссылки

2.2 Критерии оценки контрольной работы

Срок сдачи готовой контрольной работы определяется утвержденным графиком. В случае отрицательного заключения преподавателя студент обязан доработать или переработать контрольную работу. Срок доработки контрольной работы устанавливается преподавателем с учетом сущности замечаний и объема необходимой доработки.

Контрольная работа оценивается по системе:

Оценка "отлично" выставляется за контрольную работу, которая носит исследовательский характер, содержит грамотно изложенный материал, с соответствующими обоснованными выводами.

Оценка "хорошо" выставляется за грамотно выполненную во всех отношениях контрольную работу при наличии небольших недочетов в его содержании или оформлении.

Оценка "удовлетворительно" выставляется за контрольную работу, которая удовлетворяет всем предъявляемым требованиям, но отличается поверхностностью, в ней просматривается непоследовательность изложения материала, представлены необоснованные выводы.

Оценка "неудовлетворительно" выставляется за контрольную работу, которая не носит исследовательского характера, не содержит анализа источников и подходов по выбранной теме, выводы носят декларативный характер.

Обучающийся, не представивший в установленный срок готовую контрольную работу, которая была оценена на «неудовлетворительно», считается имеющим академическую задолженность и не допускается к сдаче экзамена или зачета.

3. Составление глоссария

Выполнить подбор и систематизации терминов, непонятных слов и выражений, встречающихся при выполнении контрольной работы. Расположить после основной части контрольной работы название и значение терминов, слов и понятий в алфавитном порядке.

Роль студента: прочитать материал источника, выбрать главные термины, непонятные слова; подобрать к ним и записать основные определения или расшифровку понятий; критически осмыслить подобранные определения и попытаться их модифицировать (упростить в плане устранения избыточности и повторений).

4.Рекомендуемая литературы для выполнения контрольной работы

Основная литература

1. Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли / В.А.Магницкий. - М. : Недра, 2006 - 390 с Гаврилов В.П. Физика Земли: учебник для вузов.М.: Недра – Бизнесцентр, 2008. – 287 с.
2. Павлов А. Н. Геофизика. Общий курс о природе Земли: Учебник / Павлов А. Н. - Санкт-Петербург: Российский государственный гидро-метеорологический университет,2006, ISBN 5-86813-175-4.-454. <http://www.iprbookshop.ru/12484>
3. Алексеев А. С. Методы решения прямых и обратных задач сейсмологии, электромагнетизма и экспериментальные исследования в проблемах изучения геодинамических процессов в коре и верхней мантии Земли/ Алексеев А. С.- Новосибирск: Сибирское отделение РАН,2010, ISBN 978-5-7692-1135-5.-310 <http://www.iprbookshop.ru/15806>

Дополнительная литература

1. Орленок В. В. Глобальный вулканизм и океанизация Земли и планет: Монография / Орленок В. В.- Калининград:Российский государственный университет им. Иммануила Канта,2010, ISBN 978-5-9971- 0022-3.-196. <http://www.iprbookshop.ru/7358>
2. Павлов А. Н. Геофизика. Тема 3 Физические модели Земли. Тема 4 Геофизические поля: Конспект лекций / Павлов А. Н. - Санкт-Петербург: Российский государственный гидро- метеорологический университет, 2004.-69. <http://www.iprbookshop.ru/17906>
3. Авсюк Ю.Н. Приливные силы и природные процессы. М.: ОИФЗ РАН, 1996, 188 с.
4. Моги К. Предсказание землетрясений / Пер. с англ. М.: Мир, 1988, 382 с.
5. Моисеенко У.И., Смыслов А.А. Температура земных недр. Л.: Недра, 1986, 180 с.
6. Орленок В.В. Физика и динамика внешних геосфер. М.: Недра, 1985, 183 с.
7. Паркинсон У. Введение в геомагнетизм / Пер. с англ. М.: Мир, 1986, 528 с.

Единое окно доступа к образовательным ресурсам - Режим доступа: <http://window.edu.ru>

Составитель: _____ Л.А. Болотнова, доцент, к.г.-м.н.
подпись

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖАЮ
Проректор по учебно-методическому комплексу
С.М. Упоров



МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

«ФИЗИКА ГОРНЫХ ПОРОД»

специальность

21.05.03 Технология геологической разведки

форма обучения: очная, заочная

год набора: 2021

Автор: Земцов Н.С. к.г.-м.н.

Одобен на заседании кафедры

Геофизики

(название кафедры)

Зав.кафедрой

(подпись)

Талалай А. Г.

(Фамилия И.О.)

Протокол № 1 от 05.10. 2020

(Дата)

Рассмотрен методической комиссией
факультета

(название факультета)

Председатель

(подпись)

Бондарев В. И.

(Фамилия И.О.)

Протокол № 8 от 13.10. 2020

(Дата)

Екатеринбург
2020

Петрофизика-это одна из наук о Земле, изучающая физические свойства минералов, горных пород и руд. Целью изучения петрофизических характеристик является установление состава, структуры и состояния пород, особенностей дифференциации физических свойств горных пород, околорудных зон и полезных ископаемых при решении задач поисков и разведки МШИ, геологического картирования, геотектоники, геодинамики, инженерной геологии геологии.

Петрофизические исследования позволяют обосновать возможность применения отдельных геофизических методов и комплекса геофизических исследований. Наряду с этим петрофизика позволяет решать широкий класс задач прикладного и теоретического характера, от изучения состава и генезиса рудных и акцессорных минералов (магнитная минералогия, петрофизика полупроводниковых минералов) до опробования полезных ископаемых (скважинная и шахтная геофизика), от стратиграфии осадочных комплексов (палеомагнитология) до прогнозирования состояния вещества в глубинных частях Земли (экспериментальная и теоретическая петрофизика).

Современная петрофизика изучает широкий спектр Физических свойств минералов, горных пород и полезных ископаемых: коллекторские (пористость, проницаемость, влажность, влагоемкость, нефте- и газонасыщенность), плотностные, магнитные (магнитная восприимчивость, остаточная намагниченность, температура Кюри), электрические (Удельное сопротивление, диэлектрическая проницаемость, вызванная поляризация, диффузионно-адсорбционная активность, терма—ЭДС), тепловые (теплоемкость, теплопровод—ность), ядернофизические (естественная радиоактивность, сечения взаимодействия и параметры переноса излучений), упругие (упругие модули, скорости распространения упругих волн).

Курс петрофизики в УГГГА читается на 5 семестре, опережая или параллельно с основными методами разведочной геофизики. Малый объем часов (около 40 лекционных) не позволяет подробно изложить все традиционные разделы петрофизики, обычно рассматриваемые в учебниках. Поэтому автор рассматривает физические свойства, лежащие в основе гравиразведки, магниторазведки, электроразведки,

сейсморазведки. Главное внимание уделяется факторам, определяющим петрофизические характеристики горных пород, связям физических свойств с петрографическими характеристиками. Петрофизические модели месторождений полезных ископаемых рассмотрены на отдельных примерах, методики и аппаратура петрофизических исследований вынесены на лабораторный практикум и учебно-методическую практику,

1. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Когда ставится задача изучения каких—либо физических свойств

(например, плотности или магнитной восприимчивости) массива магматических или определенного горизонта осадочных горных пород, то из этих объектов (обнажении, горных выработок, керна буровых скважин) отбирается некоторое количество образцов, у которых измеряются соответствующие Физические характеристики. При этом оказывается, что измеренные значения у разных образцов различны.

Эти различия не связаны с погрешностями измерений, а есть результат вариаций физических свойств изученных образцов, т.е. следствие неоднородности объекта исследования. Дело в том, что формирование горных пород (и соответственно их физических свойств)

происходит под воздействием большого числа факторов внутренних и внешних. Например, при образовании массивов магматических пород состав и структура будут определяться такими главными факторами:

- 1.Изменением глубины кристаллизации расплава.
- 2.Неоднородностью распределения давления и температуры в пределах магматического тела.
- 3.Фракционной и гравитационной дифференциацией.
- 4.Перемешиванием расплава.
- 5.Взаимодействием магмы с вмещающими породами различного состава.

Каждый из перечисленных факторов в свою очередь является сложной функцией от координат и времени. Результатом будет неоднородность состава, размера зерен, структуры и текстуры в пределах массива и как следствие, неоднородность физических свойств. Многообразие действующих факторов, их неопределенность во времени и пространстве позволяют рассматривать их как случайные события, а физические свойства — как случайные величины, к которым может быть применен аппарат математической статистики.

При образовании осадочных (например, обломочных) пород главными факторами являются:

1. Вещественный состав пород источника сноса, характер и степень их выветривания

2. Удаленность бассейна осадконакопления, глубина его, гидродинамические характеристики.

3. Химический состав и степень минерализации вод, окислительно-восстановительный потенциал, РН и т.д.

В процессе Формирования породы эти факторы изменяются в связи с изменениями источников сноса, глубин, гидродинамических и гидрохимических условий, что приводит к изменениям состава обломков, размеров и степени отсортированности зерен, количества и типа цемента и т.д. Возникает первичная неоднородность физических свойств.

На первичную неоднородность может накладываться вторичная, связанная с процессами преобразования: выветриванием, трещиноватостью, метаморфизмом, привносом и выносом вещества и т.д.

Учитывая, что студентам будет читаться специальный курс "Теоретические основы обработки результатов геофизических измерений", ниже приводятся только самые элементарные сведения по статистической обработке результатов изучения физических свойств горных пород, необходимые для понимания последующих разделов.

Предположим, что мы имеем М измерений некоторого физического параметра X, среди которых присутствуют максимальное X_{max} и минимальное X_{min} значения. Разобьем весь диапазон измеренных значений на n интервалов с шириной каждого ΔX :

$$\Delta X = (X_{max} - X_{min})/n, \quad (1.1)$$

Количество интервалов n связано с объемом выборки N и обычно определяется формулой Старджеса:

$$n = 3.3 * \lg N + 1$$

где n округляется до целого числа.

Подсчитаем N_i - число измерений, параметр X которых попадает в i-й интервал ($i=1, 2, \dots, n$). Строится график зависимости N_i или $(N_i/N) * 100\%$ от X. В каждом интервале рассчитанное значение изображается в виде отрезка горизонтальной линии (гистограмма). На рисунке 1.1 приведен пример гистограммы для $N=40$, $n=5$.

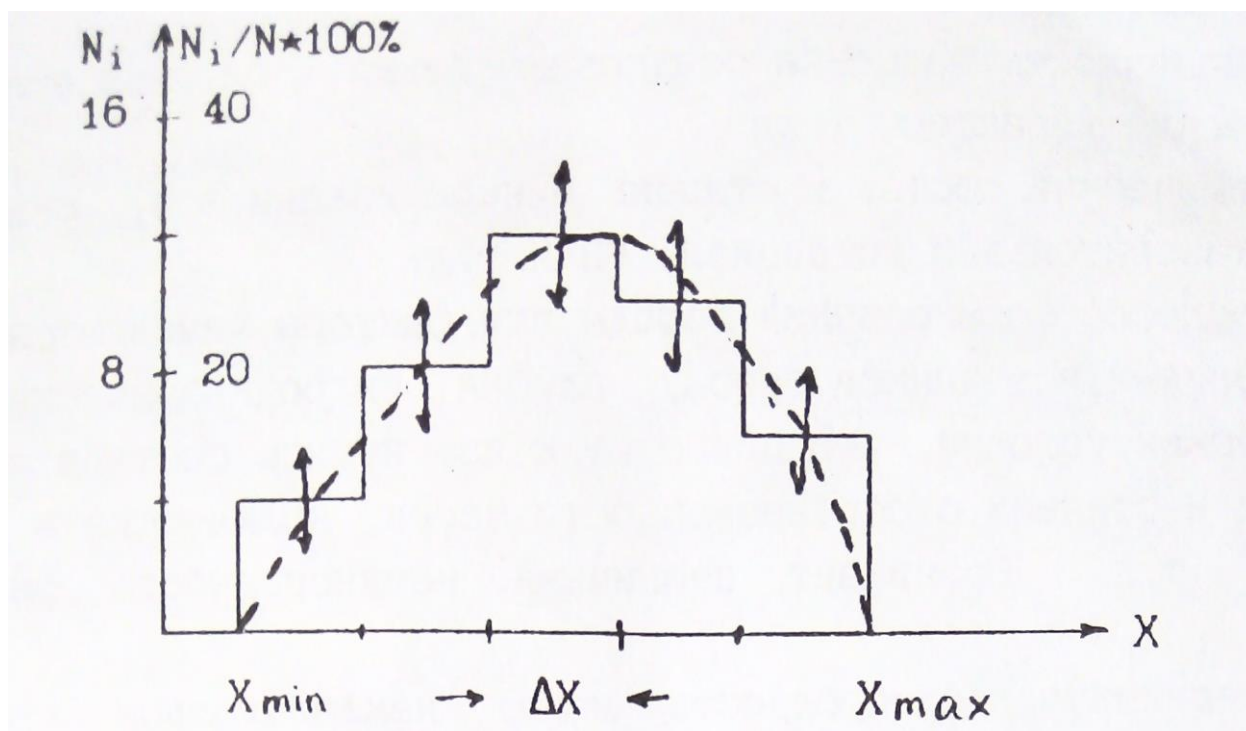


Рис.1.1. Гистограмма распределения параметра X

Гистограмма содержит в себе все статистические характеристики объекта исследования. В частности, величина $(N_i/N) \cdot 100\%$ представляет вероятность (в %) для данного объекта существования значения параметра X в пределах 1-го интервала. При построении реальных гистограмм не следует абсолютизировать полученный результат. Дело в том, что мы всегда имеем дело с ограниченными выборками и каждое значение N_i получено с погрешностью, вероятное значение которой приближенно оценивается как $\pm\sqrt{N_i}$ (на рис. показано стрелками).

При неограниченном возрастании объема выборки ($N \rightarrow \infty$), число интервалов (n) также стремится к бесконечности, а ширина интервала (ΔX) к нулю и мы получаем непрерывную кривую распределения, КОТОРУЮ часто называют вариационной кривой. Приближенно вариационную кривую можно получить путем визуального сглаживания гистограммы таким образом, чтобы площади между осью абсцисс и гистограммой и осью абсцисс и вариационной кривой были равны (изображено пунктирной линией).

Опыт Изучения физических свойств показывает, что часто распределения их подчиняется двум законам: нормальному и логнормальному — ПРИ нормальном законе кривая распределения $P(X)$ описывается выражением:

$$F(X) = \frac{\exp\left[-\frac{(X_K - MX)^2}{2\sigma^2}\right]}{\sigma\sqrt{2\pi}}, \quad (1.2)$$

где MX —мода параметра или значение его в максимуме распределения (для нормального закона совпадает со средним значением параметра:

$$MX = \bar{X} = \frac{\sum X_k}{N} \quad k=(1,2,\dots,N).$$

σ —среднеквадратичное отклонение (σ^2 —называют стандартом).

Нормальному закону подчиняется обычно распределение плотности, пористости, скорости продольных волн. На рис.1.2 приведен пример нормального распределения с двумя различными значениями стандарта.

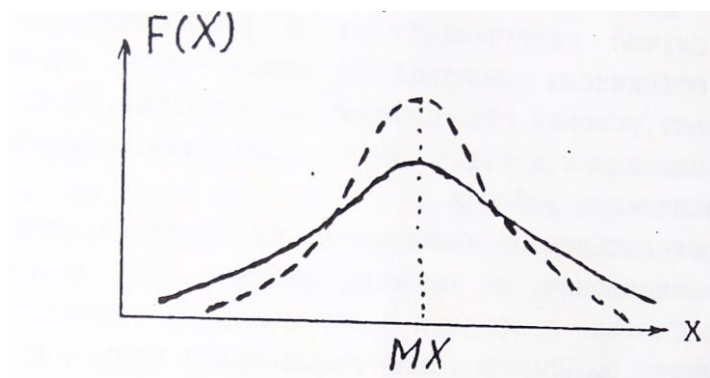


Рис.1.2. Нормальное распределение параметра X

Кривая характеризуется симметрией относительно моды и полностью определяется двумя величинами MX и σ . Логнормальный закон соответствует случаю, когда нормальному закону подчиняется логарифм параметра ($\log X$). Этому закону обычно подчиняется распределение магнитной восприимчивости, удельного электрического сопротивления, нефтенасыщенности. Для практического построения гистограмм или вариационных кривых в предположении существования лог-нормального закона измеренным значениям X_k вычисляются значения $\log X_k$, которые обрабатываются способом, описанным выше.

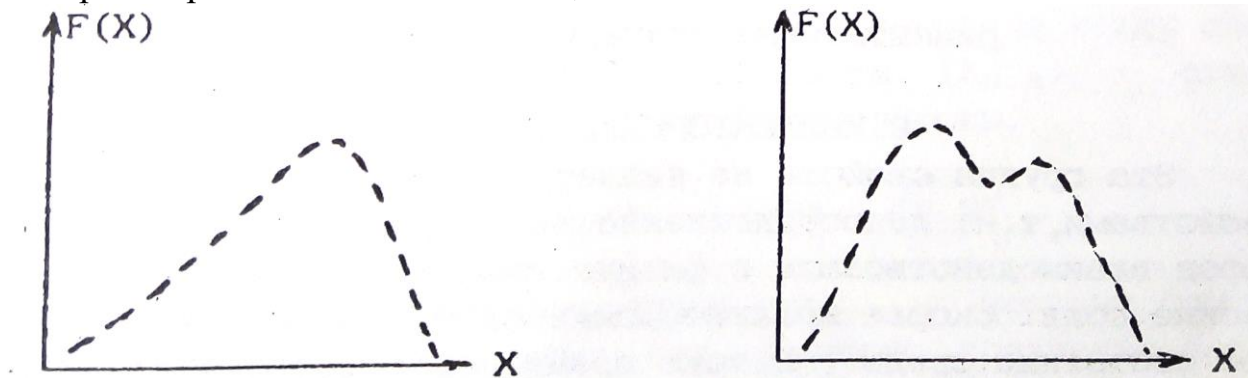


Рис.1.3.Примеры реальных кривых распределения

Реальные кривые распределения часто отличаются от теоретических. Они могут быть асимметричными и даже иметь два и более максимумов (рис. 1.3).

В первом случае появляются новые характеристики распределения (одна или более), например параметр асимметрии. В любом случае выборки считаются статистически одинаковыми, если все (!) статистические параметры их одинаковы. Асимметрия обычно связана со вторичными процессами изменения физических свойств в результате выветривания, регионального или локального метаморфизма и т.д.

Второй случай свидетельствует о неоднородности выборки; в одну группу объединены различные по каким—либо характеристикам породы (возраст, условия образования, минеральный состав, структура, степень изменения и т.д.). Необходимы дополнительные исследования для разделения выборки.

Важным следствием из изложенного является то, что все петрофизические зависимости не функциональные, а статистические, то есть выполняются в среднем с определенной вероятностью отклонения от среднего. Пример такой зависимости приведен на рис.1.4.

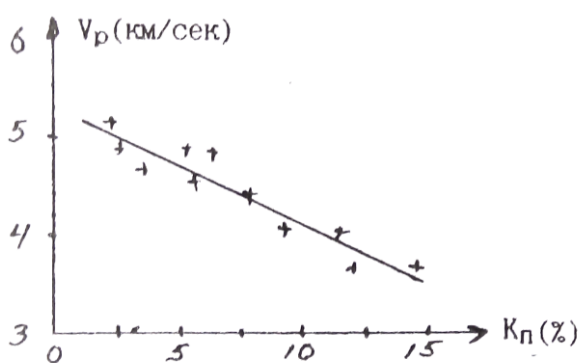


Рис.1.4. Зависимость скорости продольных волн (V_p) от коэффициента пористости (K_n)(+ - экспериментальные значения)

2.КОЛЛЕКТОРСКИЕ СВОЙСТВА

Эта группа свойств не является в строгом смысле физическими свойствами, т.к. непосредственно не определяет способности горных

пород взаимодействовать с физическими полями или создавать физические поля. Скорее коллекторские свойства характеризуют физическое состояние среды. В тоже время коллекторские свойства влияют на другие Физические свойства (плотностные, электрические. Упругие) и определяют корреляционные связи между ними. С другой стороны,

коллекторские свойства, такие как пористость, проницаемость. водо-, нефте- и газонасщенность. это важнейшие характеристики решенных месторождений углеводородов и подземных вод, определяющие запасы и условия эксплуатации этих месторождений сведения о коллекторских свойствах могут быть получены через плотностные, электрические и упругие свойства. Поэтому коллекторские свойства рассматриваются во всех учебниках и курсах петрофизики.

2. 1. ПОРИСТОСТЬ

Пористостью называется совокупность пространства в горной породе, не занятого твердой фазой. Оно заполнено газами, жидкостями (вода, нефть) или их смесями. Количественно пористость выражают через коэффициенты пористости K : отношение объема пор ($V_{\text{пор}}$) к объему горной породы ($V_{\text{г.п.}}$) в процентах. Общий объем горной породы равен сумме объемов пор и твердой фазы ($V_{\text{г.п.}} = V_{\text{пор}} + V_{\text{т.ф.}}$). При всем этом выделяют:

а) Коэффициент общей пористости ($K_{\text{п}}$) — отношение объема всех пор ($V_{\text{пор}}$) к объему породы:

$$K_{\text{п}} = (V_{\text{пор}}/V_{\text{г.п.}}) * 100\%, (2.1)$$

б) Коэффициент открытой пористости ($K_{\text{п.о}}$) .- отношение объема открытых пор ($V_{\text{о.пор}}$) к объему породы:

$$K_{\text{п.о.}} = (V_{\text{о.пор}}/V_{\text{г.п.}}) * 100\%. (2.2)$$

Открытыми порами называются поры, сообщающиеся между собой.

в) Коэффициент динамической пористости ($K_{\text{п.д}}$) - отношение

объема динамических пор ($V_{\text{д.пор}}$) к объему породы.

$$K_{\text{п.д}} = (V_{\text{д.пор}}/V_{\text{г.п.}}) * 100\%. (2. 3)$$

динамическими порами называются поры, по которым происходит движение жидкостей или газов при наличии градиента-давления. Часть открытых пор может быть представлена тупиковыми порами или водой, прочно связанной с поверхностью твердой фазы, и не участвует в переносе жидкостей или газов. Очевидно, что $K_p > K_{п.о}$ $K_{п.д}$.

2.1.1. Классификация пор.

1) По происхождению поры подразделяются на первичные и вторичные. Первичные возникают при образовании породы и представлены структурными порами — промежутками между частицами обломочных „о-род (грубообломочных, песчанистых, алевроитовых, глинистых), межкристаллическими промежутками магматических и метаморфических пород и т. д. При уплотнении цементации, перекристаллизации, метаморфизме форма и размеры первичных пор могут меняться. Вторичные поры образуются при последующих воздействиях на породы процессов выветривания, выщелачивания, кристаллизации, тектонических нагрузок и т.д.

2) По форме поры могут быть близкими к **ромбоздальным** (рыхлые отсортированные обломочные осадочные породы), близкими к **тетраэдрическим** (те же, но уплотненные породы), **щелевидным** (порода состоит из пластинчатых минералов: слюды, глины), в виде **канальцев** переменного сечения (плохо отсортированные обломочные породы), **трещеновидные** (магматические, метаморфические, плотные осадочные породы, испытавшие воздействие сильных тектонических нагрузок), **каверновидные** (карбонатные породы, подвергшиеся процессам растворения и выщелачивания), **пузырчатые** (магматические породы), **ячеистые** (известковые и кремнистые туфы), **каналовидные** (лёссы).

3) По размерам выделяют а) **сверхкапиллярные** - эффективный (средний) диаметр сечения пор $d_{э.ф.}$ более 0,1 мм. (грубообломочные породы типа галечников и гравия, крупно— и среднезернистые пески, оолитовые известняки, выщелоченные карбонаты). В сверхкапиллярных порах доля воды, связанной с поверхностью твердой фазы, не велика, вода в основном свободная и перемещается по законам гидродинамики. б) Капиллярные - эффективный диаметр пор $d_{э.ф.}$ $1 \cdot 10^{-4}$ - $1 \cdot 10^{-1}$ мм. (мелкозернистые, менее отсортированные, сцементированные пороли: мелкозернистые пески и песчаники, некоторые карбонатные породы)-

В **Капиллярных** порах более высокое содержание связанной воды И возможен ее подъем в силу поверхностного натяжения. в) **Субкапиллярные** - $d_{з.ф.} < 1 \cdot 10^{-4}$ мм. (глины, микрокристаллические известняки, туфы). Практически вся вода перового пространства связана на поверхности твердой фазы, перемещения воды почти нет.

2.1.2. ПОРИСТОСТЬ ОБЛОМОЧНЫХ ОСАДОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Основными факторами определяющими пористость обломочных пород являются: 1) форма и размер обломков, 2) степень отсортированности 3) степень уплотнения и цементации.

1) Влияние Формы и размера частиц иллюстрируется таблицей, в которой приведены значения K_p (%) для искусственных пород:

Таблица 1

Размер частиц (мм.)	Кварц окатанный	Кварц остроуг.	Ортоклаз остроуг.	Слюда
2-1	33	38	45	80
0.5-0.25	33	41	49	72
0.1-0.06	39	45	52	68

Отмечается малое влияние размера частиц и существенно большее формы (пористость возрастает в 2-2.5 раза при переходе от изометричных зерен к пластинчатым).

2) Степень отсортированности характеризует распределение обломков по размерам и количественно выражается через коэффициент отсортированности G_f :

$$G_f = \frac{d_{cp} - \sum V_i \delta d_i}{d_{cp}}, \quad (2.4)$$

где V_i — объемное содержание частиц диаметра d_i в породе,

δd_i — отклонение от среднего диаметра 1-й группы, '

d_{cp} — средний диаметр частиц.

Коэффициент отсортированности меняется от 1 (хорошо отсортированная порода, все частицы одного размера) до 0 (плохо отсортированная порода, размеры частиц равномерно распределены от 0 до d_{max}).

присутствие в породе частиц разного размера приводит к тому, что мелкие частицы заполняют промежутки между крупными и уменьшение коэффициента G_f (ухудшение отсортированности) ведет к уменьшению коэффициента пористости.

На рис.2.1 приведен пример такой зависимости.

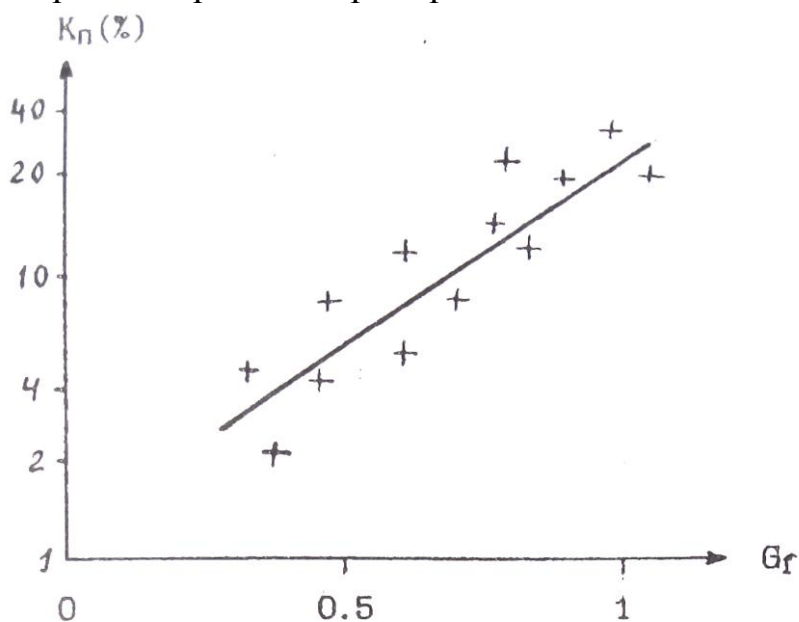


Рис.2.1. Зависимость коэффициента пористости от коэффициента отсортированности песчаников и алевролитов Туймазинской площади

Изменение отсортированности может приводить к изменению пористости на порядок. В связи с этим интересно рассмотреть изменение пористости песчано—глинистых образований в зависимости от состава (рис.2,2). . '

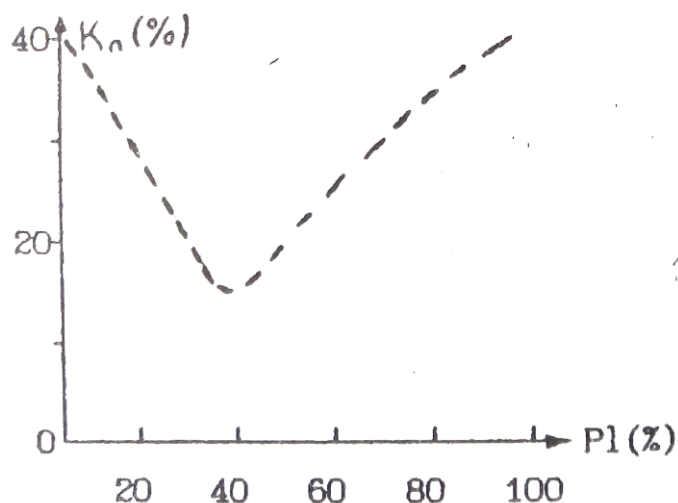


Рис.2.2. Зависимость коэффициента пористости от глинистости (P1) песчано—глинистых отложений (теоретическая зависимость)

Положим, что песчаная и глинистая фракции представлены однородными по размерам частицами каждая (песчаная крупными, глинистая мелкими). Коэффициенты пористости каждой фракции около 40%. При увеличении глинистости (P1) в породе будет происходить уменьшение пористости в результате частичного заполнения глинистыми частицами промежутков между крупным песчинками. При достижении 40% глинистости все эти промежутки (поры) будут заполнены глинистым материалом (минимальная отсортированность), а K_p равен $0.4 \cdot 0.4 = 0.16$ (16%). При дальнейшем увеличении глинистости отсортированность и коэффициент пористости будут возрастать.

3) Под действием нагрузки вышележащих пород первичные рыхлые осадки уплотняются, что приводит к уменьшению их пористости. В начале уплотнение связано с перемещением отдельных частиц и более компактным их взаимным расположением. Затем происходит частичное разрушение и сшивание обломков (ухудшение отсортированности). Этот процесс идет при нагрузках, превышающих несколько тысяч кг/см². Наиболее сильно уплотняются глины, коэффициент пористости которых под нагрузкой может меняться от 50% до 5%. В результате для многих районов, сложенных обломочными породами, наблюдается корреляционная связь K_p и глубины залегания породы:

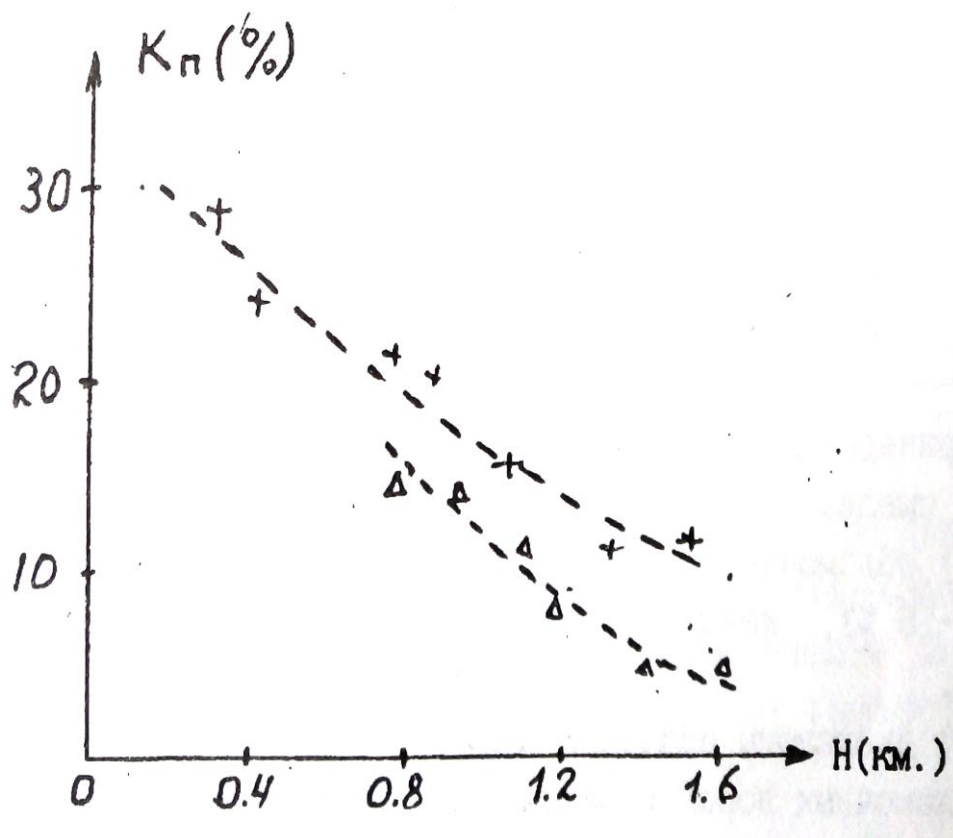


Рис.2,3. Зависимость K_p от глубины залегания H ;
 +-глины, Δ - алевролиты

$$K_p(H) = K_p(0) * \exp(-\beta H), (2.5)$$

где $K_p(0)$ — коэффициент пористости вблизи поверхности,
 β - константа, зависящая от типа отложений ($\beta=0.05$).

Уравнения типа (2.5) позволяют прогнозировать изменения пористости с глубиной, что очень важно при интерпретации результатов геофизических съемок, т.к. величина пористости определяет ряд других физических свойств: плотность, удельное электрическое сопротивление, скорость упругих волн.

Процесс цементации заключается в выпадении вторичных минералов (карбонаты, опал, глинистые минералы и т.д.) в поровом пространстве из поровых вод. В результате пористость уменьшается вплоть до нескольких процентов.

В заключение приведем данные по пористости некоторых типов обломочных пород.

Таблица 2

Порода	$K_p(\%)$	
	Пределы	Наиболее вероятные

Пески	5-55	20-35
Песчаники	0.5-40	5-30
Лессы	40-55	40-55
Алевриты	1-40	3-25
Глины	1-75	20-50
Аргиллиты	1-30	1.5-15

Приведенные в таблице данные позволяют сделать следующие основные выводы:

1) обломочные породы обычно характеризуются средней ($K_p=10-15\%$), повышенной ($K_p=15-20\%$) и высокой ($K_p>20\%$) пористостью.

2) диапазоны значений коэффициентов пористости различных типов обломочных пород в значительной степени перекрываются. Следует подчеркнуть, что данные таб.2 обобщают сведения о пористости пород всей страны в целом. В конкретных районах, у конкретных пластов диапазон колебания K_p может быть существенно уже. Например,

пласты – коллекторы AB_{2-5} одного из нефтяных районов Тюменской области имеют $K_p=20-30\%$

2.1.3. ПОРИСТОСТЬ КАРБОНАТНЫХ ОСАДОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

первичные карбонатные осадки (известковые и доломитовые илы) имеют высокую пористость ($K_p=60-80\%$). По мере их уплотнения пористость резко уменьшается ($K_p=0.5—15\%$). В дальнейшем появляется вторичная пористость, обусловленная перекристаллизацией, трещиноватостью и выщелачиванием карбонатных пород. Характерная особенность карбонатных пород - неравномерность распределения пористости в пространстве. Поэтому, при изучение карбонатных коллекторов необходимо отбирать - большое количество образцов с различных интервалов по глубине и площади. Значения пористости основных типов карбонатных пород приведены в таблице 3.

Таблица 3

Порода	$K_p(\%)$	
	пределы	Наиболее вероятные
Известковый ил	65-85	-

Известняки	0.5-48	1.5-15
Известковый туф	20-30	-
Мел	10-55	40-50
Доломиты	0.1-37	3-20

2. 1.4 ПОРИСТОСТЬ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ОСАДОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД.

В отличие от двух предыдущих групп пород, гидрохимические

осадки характеризуются пониженными и низкими значениями коэффициентов пористости. Так у ангидритов $K_p=0.2—15\%$ у гипсов 1-25 %,

У каменной соли 0-5 %.

2.1.5 ПОРИСТОСТЬ МАГМАТИЧЕСКИХ И МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ГОРНЫХ ПОРОД

Для этой категории пород характерна низкая пористость. Исключение составляют кайнотипные эффузивы, которые в силу особенности образования (быстрое остывание, не полный отход летучих компонент), могут иметь повышенную и высокую пористость. Таблица 4 иллюстрирует значения коэффициента общей пористости магматических и метаморфических пород.

Таблица 4

Порода	Кп(%)
	Пределы
Граниты	0.3-4
Габбро	0.3-3
Пироксенит	0.2-2
Базальт	0.5-40
Диабаз	0.2-3
Порфирит	0.4-6
Гнейс	0.2-6

Сланец хлорит.	0.2-1
Амфиболит	0.1-6

данные относятся к невыветрелым породам. В процессе выветривания пористость возрастает (образование вторичной пористости) и может достигать 20 - 40 %.

Другая особенность данной группы пород состоит в существенном преобладании закрытой пористости над открытой.

2.1.6 ПОРИСТОСТЬ ГИДРОТЕРМАЛЬНО ИЗМЕНЕННЫХ ПОРОД

К гидротермально измененным породам приурочены месторождения рудных полезных ископаемых. Многочисленные исследования показали, что зоны развития этих пород характеризуются повышенными значениями пористости по сравнению с неизмененными породами. Вероятно это связано с тем, что гидротермальные растворы могут перемещаться в средах с повышенной пористостью и проницаемостью. Таким образом, зоны повышенной пористости являются своеобразным индикатором

гидротермальных процессов и, косвенно, признаком оруденения.

На рисунке 2.4 приведен пример распределения пористости в районе медноколчеданного оруденения.

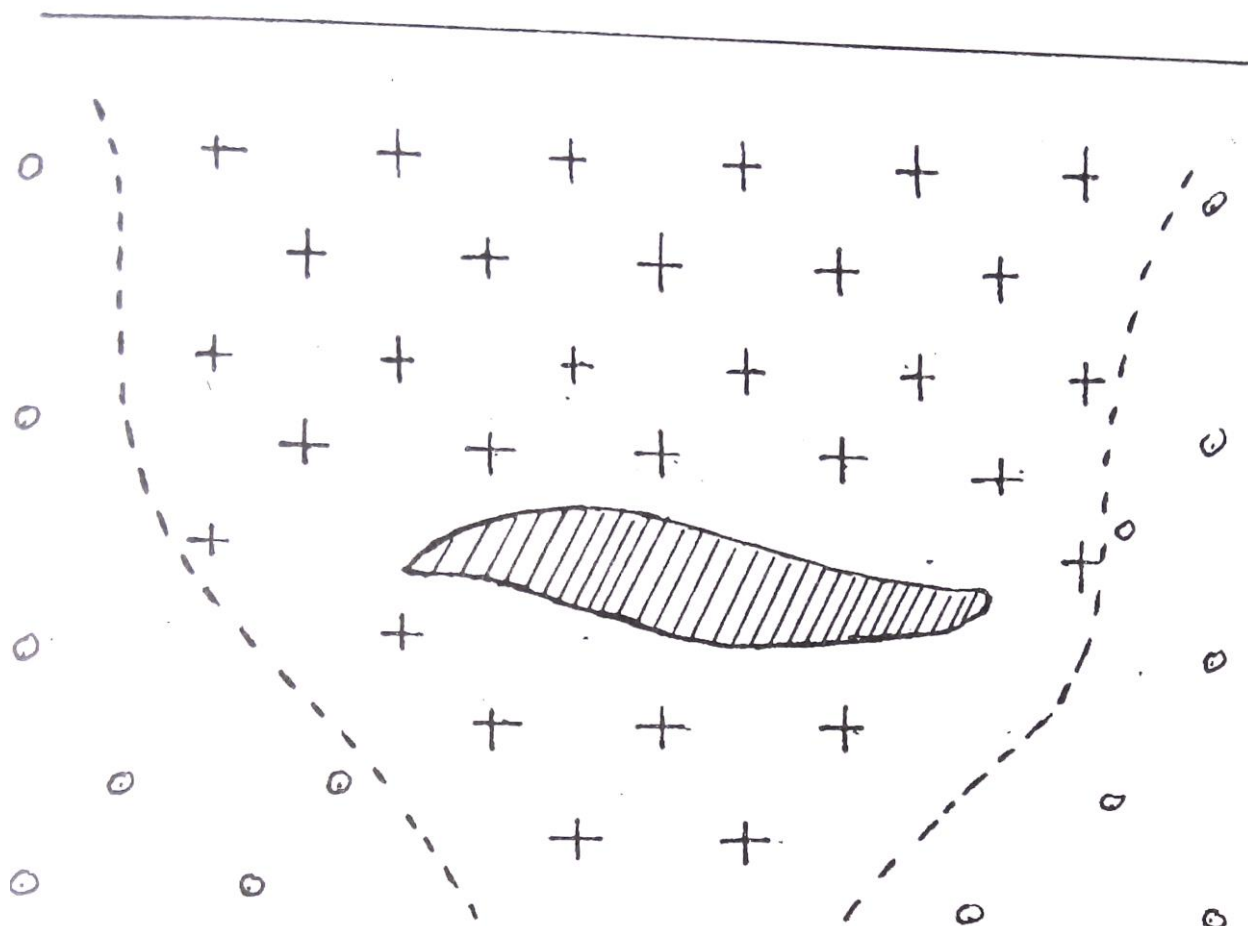


Рис.2.4. Распределение коэффициента открытой пористости на месторождении Аabei-Саз (Башкирия)

-  -рудное тело
-  -Кп.о=0.5-3 %
-  -Кп.о<0.2%

2.2. ВЛАЖНОСТЬ. ВЛАГОЕМКОСТЬ

Влажность определяется, как количество воды в горной породе, а **влагоемкость**, как способность горной породы удерживать воду. Вода в горных породах может присутствовать в различных видах:

а) **Прочно связанная вода** - слои воды толщиной в несколько молекул. непосредственно примыкающий к стенке перового канала. Эта вода силами Ван-дер—Ваальса прочно связана с твердой фазой породы, Не может перемешаться, обладает аномальными физическими свойствами

(плотность до 2 г/см³, температура замерзания до -78 С°, повышенная вязкость, плохая растворимость солей).

б) **Рыхло связанная вода** - непосредственно примыкает к слою прочно связанной воды, менее прочно связана с твердой фазой. В частности, образуется в углах пор в силу поверхностного натяжения (стыковая вода). Толщина слоя рыхло связанной воды составляет десятки и более молекул, она имеет повышенную плотность и пониженную температуру замерзания.

в) **Свободная вода** - обычная вода, которая свободно перемещается в поровом пространстве по законам гидродинамики.

Выделяют несколько типов влагоемкости:

а) **Машинальная гигроскопическая влагоемкость** ($W_{\text{мг}}$) - максимальное количество парообразной влаги (в процентах к весу абсолютно сухой породы), которое способна поглотить порода из воздуха влажностью 94%. Эта влагоемкость включает в себя прочно связанную и часть рыхло связанной воды.

б) **Капиллярная влагоемкость** — полное количество воды, которое присутствует в породе в силу явления капиллярного подъема.

в) **Полная влагоемкость** - максимальное количество связанной и свободной воды, которое может присутствовать в горной породе.

Соотношение между связанной и свободной водой при полном заполнении порового пространства определяется сечением поровых каналов и составом твердой фазы породы. Относительное количество свободной воды уменьшается с уменьшением сечения пор и увеличением содержания глинистых минералов. В случае чистых глин в порах присутствует только связанная вода, а в грубообломочных породах (галечники, крупнозернистые пески) почти вся вода представлена свободной.

Двойной электрический слой.

Поверхность твердой фазы порового пространства адсорбирует ионы одного знака из поровых растворов. Эти ионы удерживаются на ней силами Ван—дер—Ваальса, создавая слой не компенсированных зарядов (слой потенциал-определяющих ионов). В результате электростатического взаимодействия из порового раствора к нему будут притягиваться ионы противоположного знака (слой противоионов), что в совокупности создает двойной электрический слой. Противоионы образуют сложную пространственную структуру. На расстоянии порядка размера молекулы противоионы прочно удерживаются силами электростатического взаимодействия и не могут перемещаться, образуя плотную часть двойного слоя. Дальше от поверхности твердой

фазы их концентрация убывает и они не столь сильно связаны с потенциал-определяющим слоем. Эта область называется диффузионной частью двойного слоя и может перемещаться при движении жидкости в поровом пространстве примерная структура двойного слоя приведена на рис. 2.5.

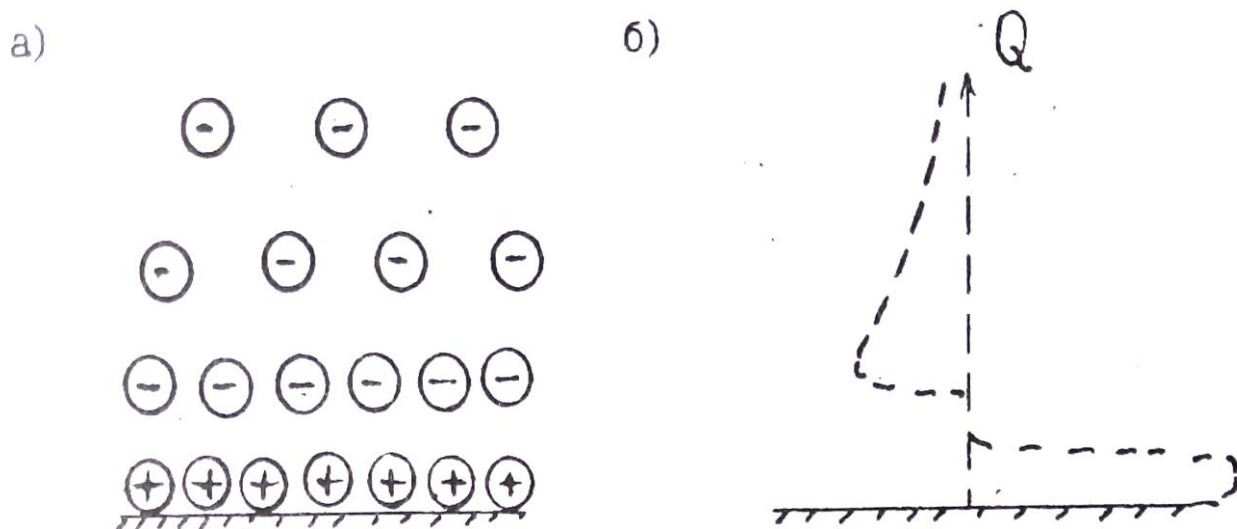


Рис.2.5. Строение двойного электрического слоя (а) и распределение заряда Q в пределах двойного слоя (б)

Область, занятая двойным слоем, примерно соответствует или несколько больше слоя прочно и рыхло связанной воды.

2. 3. ПРОНИЦАЕМОСТЬ

Проницаемостью называется способность горной породы пропускать жидкости, газы или их смеси при наличии градиента давления. Выделяют физическую или абсолютную и фазовую проницаемости.

2.3. 1. ФИЗИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ

Это способность горных пород пропускать **однородные** жидкости или газы. Представим себе трубку, в которую помещен образец цилиндрической формы (Рис.2.б). На верхней грани образца давление P_1 на нижней P_2 . Градиент давления равен $\frac{\Delta P}{L}$, где $\Delta = P_1 - P_2$, L -длина образца. Через нижнюю границу будет вытекать жидкость. раскол которой

равен Q (см³/сек). Обозначим площадь поперечного сечения образца через S и введем удельный расход $V=Q/S$ (расход через единицу площади поперечного сечения). Соотношение между этими величинами описывается законом Дарси: V прямо пропорционален градиенту давления и обратно пропорционален вязкости (μ).

$$V = K_{\text{пр}} \frac{\frac{P_1 - P_2}{L}}{\mu} \quad (2,6)$$

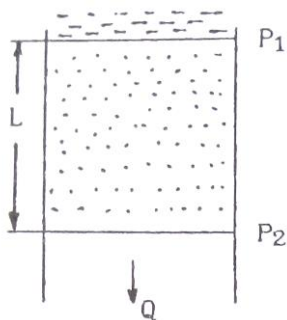


Рис.2.6. К определению коэффициента проницаемости

Коэффициент пропорциональности в этом уравнении (кпд) называется коэффициентом проницаемости, он является количественно характеристикой физической проницаемости. Единицей $K_{\text{пр}}$ в системе СИ служит мг. Существует вне системная единица - Дарси, которая соответствует проницаемости породы, у которой удельный расход воды равен 1 см³/сек при градиенте давления 1 атм/см. $1 \text{ м}^2 \approx 1 * 10^{12} \text{ Д}$ или $1 \text{ Д} \approx 1 * 10^{-12} \text{ м}^2 = 1 \text{ мкм}^2$.

Дарси крупная единица, обычно для характеристики проницаемости горных пород используют тысячную долю Дарси – 1мД, $1 \text{ мД} = 1 \text{ фм}^2$

2.3.2. СВЯЗЬ КОЭФФИЦИЕНТА ФИЗИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ С КОЭФФИЦИЕНТОМ ПОРИСТОСТИ И СТРУКТУРОЙ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА

Для простейшей модели строения порового пространства в виде трубчатых капилляров (рис.2.7) выведено простое соотношение -

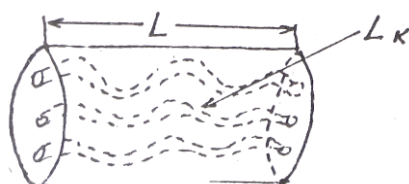


Рис.2.7. К пояснению формулы Козени—Кармана

формула Козени-Кармана

$$K_{\text{пр}} = \frac{K_{\text{пд}}^3}{S_{\text{ф}}^2 \cdot T^2 \cdot f}, \quad (2.7)$$

Где $K_{\text{пд}}$ – коэффициент динамической пористости.

$S_{\text{ф}}$ – удельная поверхность порового пространства (площадь поверхности пор в единице объема горной породы).

$T = L_{\text{к}}/L$ – удельная извилистость поровых каналов (отношение средней длины порового канала $L_{\text{к}}$ в пределах образца, к длине образца L).

f – некоторый параметр, зависящий от формы сечения порового канала (лежит в пределах от 2 до 3).

(Предупреждение. В литературе в формулах типа 2.7 часто используют обозначение $K_{\text{п}}$ или термин пористость вместо динамической пористости необходимо представлять, что движение флюидов возможно только по динамическим порам.)

Из формулы 2.7 следует сильная зависимость коэффициента проницаемости от коэффициента пористости (третья степень) и структуры порового пространства, которая для данной модели определяется величинами T и $S_{\text{ф}}$. На рис. 2.8 приведены примеры зависимости $K_{\text{пр}}$ от $K_{\text{пд}}$ (экспериментальные данные)

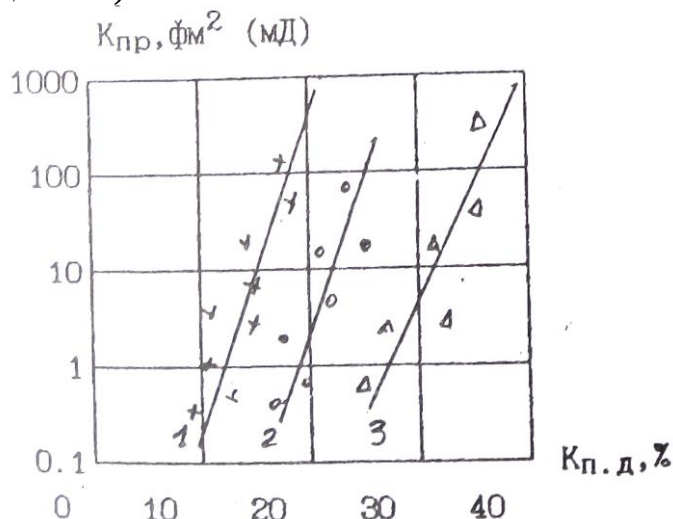


Рис.2.8. Зависимость коэффициента проницаемости от коэффициента динамической пористости 1 - песчаник, нижний вилькок, 2 – песчаник слабо сцементированный, 3 - песчаник тонкозернистый

Линейный вид зависимостей в полулогарифмическом масштабе и угол наклона подтверждают зависимость $K_{\text{пр}}$ от третьей степени $K_{\text{пд}}$. Смещение линий в горизонтальном направлении обусловлено влиянием структуры порового пространства. Величина удельной по-

нием поровых каналов, и возрастает с уменьшением сечения. У обломочных пород сечение каналов связано с размером зерен. Например в случае отсортированной породы с изометричными обломками со средним диаметром d :

$$S_{\phi} \approx 3.6/d \quad (2.8)$$

Таким образом, уменьшение размера зерен приводит к уменьшению проницаемости. Это объясняет непроницаемость глин (тонкодисперсные породы), хотя коэффициент пористости у них составляет десятки процентов. Рис. 2.9 иллюстрирует подобную зависимость.

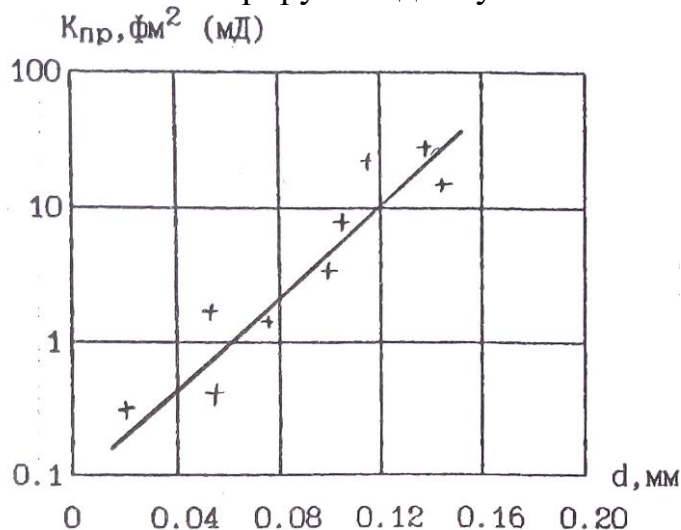


Рис. 2.9, Зависимость коэффициента проницаемости от среднего диаметра и зерен песчано—алевритово—глинистых пород

В случае трещинной пористости проницаемость определяется приближенным выражением:

$$K_{пр} \approx 8.45 b^2 \quad (2.9)$$

где b — средний размер поперечного сечения трещин (раскрытость трещин) в мкм,

$K_{пт}$ - коэффициент трещиной пористости в %.

По величине коэффициента проницаемости все породы подразделяются на три группы:

1. Проницаемые — грубообломочные породы (галечники, гравии), хорошо отсортированные, слабо сцементированные песчано—алевритовые породы, кавернозные и трещиноватые карбонатные породы, трещиноватые магматические породы, Это породы с высоким коэффициентом пористости (20-40%). сверхкапиллярными и капиллярными порами, существенным преобладанием свободной воды в поровом пространстве, Коэффициент проницаемости их лежит в пределах $10 - 10^6$ фм² (мД).

2. Полупроницаемые — менее отсортированные песчано-алевритово-глинистые породы, мелкотрещинные меловидные карбонатные породы. поровое пространство представлено субкапиллярными порами, преобладает связанная вода. $K_{пр}$ в пределах 0,1-10 фм² (мД).

3. Практически непроницаемые - глины, аргиллиты, сильно сцементированные песчаники и алевролиты, неветрелые кристаллические карбонатные и магматические породы. $K_{пр} < 0,1$ фм² (мД).

2. 3. 3. ФАЗОВАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ

Это способность горной породы, насыщенной неоднородной жидкостью или смесью жидкостей и газов, пропускать ту или иную фазу при наличии градиента давления. Для обычных в горных породах фаз (вода, нефть, газ) количественно фазовая проницаемость характеризуется коэффициентами Фазовой проницаемости для воды ($K_{пр.в}$), нефти ($K_{пр.н}$) и газа ($K_{пр.г}$), которые являются коэффициентами пропорциональности в аналогах уравнения Дарси:

$$V_B = K_{пр.в} \frac{\Delta P}{L} \frac{1}{\mu_n} \quad V_H = K_{пр.н} \frac{\Delta P}{L} \frac{1}{\mu_n} \quad V_G = K_{пр.г} \frac{\Delta P}{L} \frac{1}{\mu_n}, \quad (2.10)$$

где V_B , V_H , V_G - удельные расходы воды, нефти и газа соответственно.

Часто используют коэффициенты **относительной** фазовой проницаемости, которые определяют как отношение коэффициента фазовой проницаемости к коэффициенту абсолютной проницаемости в процентах. Например, коэффициент относительной Фазовой проницаемости воды ($\bar{K}_{пр.в}$) запишется:
 $\bar{K}_{пр.в} = \left(\frac{K_{пр.в}}{K_{пр}} \right) 100 \%$.

Фазовая проницаемость отличается рядом особенностей, которые мы проиллюстрируем примером двухфазной смеси вода-нефть (Рис.2.10). На рис. Представлены зависимости коэффициентов относительной фазовой проницаемости ($\bar{K}_{пр.в}$, $\bar{K}_{пр.н}$) от соотношения фаз.

Последнее выражено через коэффициент вод насыщенности порового пространства (K_B) — отношение объема воды в поровом пространстве к объему пор. Полагаем, что все поровое пространство заполнено смесью вода—нефть, следовательно коэффициент нефтенасыщенности $K_H = 1 - K_B$. Отметим:

1) Графики зависимостей имеют в целом вогнутость вниз, т.е.

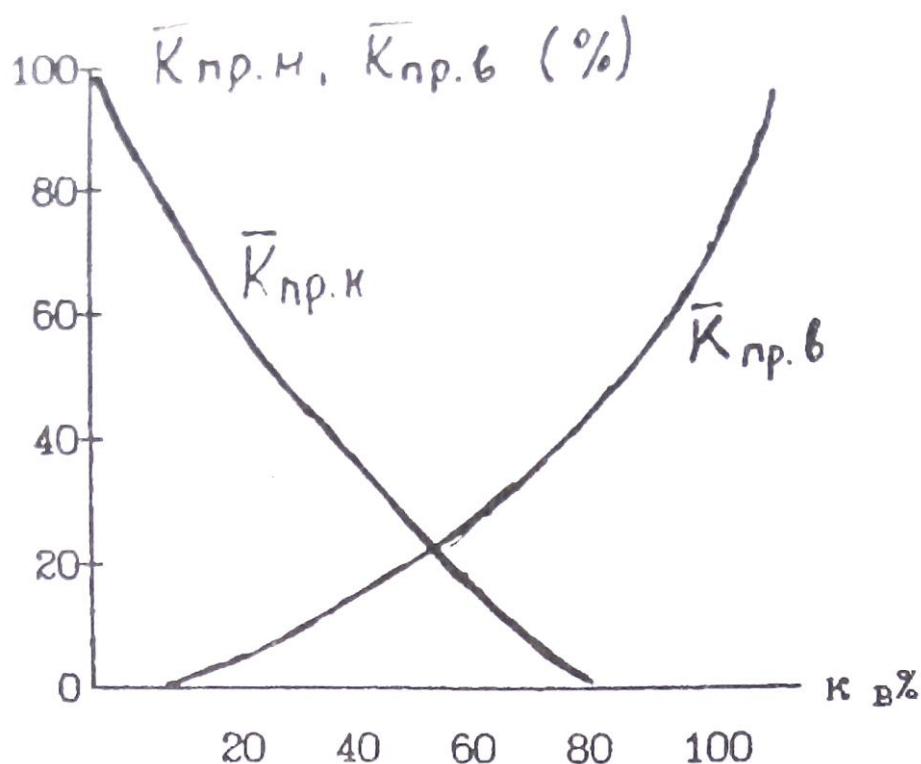


Рис.2.10. Зависимость коэффициентов относительной проницаемости по воде ($K_{пр.в}$) и нефти ($K_{пр.н}$) от соотношения фаз в смеси вода-нефть

сумма $K_{пр.в} + K_{пр.н} < 100$. Смеси фильтруются хуже, чем однородные жидкости.

2) При определенном соотношении фаз возможен расход какой-либо одной фазы (при $K_{в} < 20\%$ вода не фильтруется через породу, а при $K_{в} > 80\%$; не фильтруется нефть).

3. ПЛОТНОСТНЫЕ СВОЙСТВА

Эта группа свойств определяет возможность применения ряда геофизических методов. Например, гравиразведки для изучения геологических структур, поисков и разведки полезных ископаемых, ядерно-геофизических методов (гамма—гамма-каротаж) для расчленения разрезов скважин.

3.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Плотность - это масса единицы объема вещества. **Удельный вес** - вес единицы объема вещества. По определению плотность (δ):

$$\delta = \frac{m}{V}, (3.1)$$

Удельный вес (Δ):

$$\Delta = \frac{P}{V}, \quad (3.2)$$

где m , P , V - соответственно масса, вес и объем вещества. Так как $P=mg$ (g - ускорение силы тяжести), то плотность это константа а удельный вес зависит от силы тяжести. В системе СИ единицей плотности является кг/м^3 удельного веса - Н/м^3 . В системе СГС единица массы — грамм ($г$), внесистемная единица веса граммсила ($Г$) единицы объема - см^3 . Плотности в системе СГС (г/см^3) и удельный вес во внесистемных единицах (Г/см^3) численно совпадают на поверхности Земли с точностью до 0.2-0.4% (изменения удельного веса связаны с изменениями ускорения силы тяжести по поверхности Земли).

Понятия плотность и удельный вес, строго говоря, применимы для однородных сред. Для неоднородных сред вводятся усредненные характеристики — объемная плотность (δ) и объемный вес (d), которые определяются также по Формулам (3.1 и 3.2). Следует иметь в виду, что при определении объемных параметров размер изучаемого объекта должен быть много больше размеров неоднородностей. Соотношение между единицами в различных системах:

$$1\text{Г/см}^3 = 1000\text{ кг/м}^3, \quad 1\text{Г/см} = 9810\text{ Н/м}^3.$$

Используют так же понятие **минеральная плотность** (δ_m) — масса единицы объема твердой фазы минерала или горной породы. Следует отметить, что наряду с системой СИ в литературе при описании плотностных свойств широко используется и система СГС, которую мы будем использовать при дальнейшем изложении материала. Кроме того общепринятым является использование терминов плотность и удельный вес вместо объемная плотность и объемный вес.

3. 2 ПЛОТНОСТЬ МИНЕРАЛОВ

Плотность минералов определяется химическим составом, строением электронных оболочек атомов, составляющих различные минералы. а также условиями их образования. Эти факторы определяют соотношение в минералах атомов с различными атомными массами, характер кристаллической связи, конституцию кристаллов. Большая часть породообразующих минералов имеет ионную или ковалентную

форму кристаллической связи, состоят из атомов с низкими средними атомными массами и имеют плотность порядка $2.2 - 3.5 \text{ г/см}^3$, Среди рудных минералов преобладает ионно-металлическая и ковалентно-металлическая форма связи, часто присутствуют элементы с высокими атомными массами, ЧТО обуславливает повышение плотности до $3.5 - 7.5 \text{ г/см}^3$.

Средняя атомная масса основных породообразующим минералов (кварц, полевые шпаты, плагиоклазы, карбонаты) почти постоянна и несколько повышается в пироксенах и железистых оливинах. В связи с этим главным фактором определяющим плотность этих минералов является плотность упаковки атомов в кристаллической решетке. Например каркасные структуры силикатов (кварц, полевые шпаты, плагиоклазы) обуславливают низкую плотность. У цепочечных силикатов (пироксены) плотность выше. Еще выше плотность минералов с островной структурой (оливины). Для породообразующих минералов характерны явления **изоморфизма** и **полиморфизма**. Изоморфизм это изменение состава без изменения структуры кристаллической решетки. Целые группы минералов магматических и метаморфических пород (плагиоклазы, амфиболы, пироксены, оливины, гранаты) образуют непрерывные изоморфные ряды. Например плагиоклазовый ряд начинается с альбита ($\text{NaAl}_2\text{Si}_3\text{O}_8$) с плотностью 2.61 г/см^3 и заканчивается анортитом ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) с плотностью 2.76 г/см^3 . Соотношение между Na и Ca в ряду может быть любым, при этом образуется непрерывный ряд минералов (олигоклаз, андезин, лабрадор, битовнит) с промежуточными значениями плотности. Увеличение плотности от альбита к анортиту связано с более высокой атомной массой Ca (40) по сравнению с Na (23). В тоже время при замещении Na в альбите на K имеем минерал ортоклаз (KAlSi_3O_8) с меньшей плотностью (2.57), хотя атомная масса K (39) выше, чем Na. Это связано с большим ионным радиусом K, что обуславливает менее плотную пространственную упаковку атомов. Полиморфизм - это изменение структуры кристаллической решетки без изменения состава. Классическим примером полиморфизма являются минералы графит (плотность 2.2) и алмаз (плотность 3.52). Оба минерала имеют одинаковый состав (C), но графит имеет рыхлую слоистую структуру кристаллической решетки, а алмаз кубическую центрогранную. Полиморфизм особенно характерен для минералов метаморфических горных пород.

Плотность некоторых минералов приведена в таблице 5.

Таблица 5

Минерал	Состав	$\delta \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right)$
Кварц	SiO_2	2.65
Альбит	$\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	2.61
Анортит	$\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$	2.76
Ортоклаз	$\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	2.57
Нефелин	$\text{Na}[\text{AlSiO}_4]$	2.62
Роговая обманка	$\text{NaCa}_2(\text{Mg,Fe})_4(\text{Fe,Al})^* (\text{OH,F})_2\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{22}$	3.25
Пироксены:		
Авгит	$\text{Ca}(\text{Mg,Fe,Al})[(\text{Si,Al})_2\text{O}_6]$	3.4
Геденбергит	$\text{CaFe}[\text{Si}_2\text{O}_6]$	3.55
Эгирин	$\text{NaFe}[\text{Si}_2\text{O}_6]$	3.53
Оливин	$(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$	3.35
Мусковит	$\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}][\text{OH}]_2$	2.85
Биотит	$\text{K}(\text{Mg,Fe})_3[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}][\text{OH,F}]_2$	3.05
Сerpентенит	$\text{Mg}_6[\text{Si}_4\text{O}_{10}][\text{OH}]_8$	2.55
Кальцит	CaCO_3	2.715
Магнезит	MgCO_3	2.96
Доломит	$\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$	2.87
Барит	BaSO_4	4.5
Гипс	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	2.3
Ангидрит	CaSO_4	2.96
Магнетит	Fe_3O_4	5.11
Ильменит	FeTiO_3	4.79
Хромит	FeCr_2O_4	4.2
Пирит	FeS_2	5.1
Халькопирит	CuFeS_2	4.2
Сфалерит	ZnS	3.95
Галенит	PbS	7.57
Циркон	ZrSiO_4	4.68

Приведены средние значения плотности наиболее чистых разновидностей минералов. Можно сделать следующие выводы:

1) Плотности основных породообразующих минералов ниже плотности рудных.

2) Темноцветные породообразующие минералы (пироксены, оливины, роговые обманки) имеют более высокую плотность по сравнению со светлыми минералами (кварц, полевые шпаты, плагиоклазы)

3.3 ПЛОТНОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД

Общее выражение для плотности горной породы можно записать в виде:

$$\delta = \frac{m_T + m_{ж} + m_{г}}{V_T + V_{ж} + V_{г}}, (3.3)$$

где m_T — масса твердой фазы, $m_{ж}$ — масса жидкой фазы. $m_{г}$ - масса газовой фазы породы, $V_T, V_{ж}, V_{г}$ — объемы твердой, жидкой и газовой фаз. Сумма объемов жидкой и газовой фаз равна объему порового пространства. Масса твердой фазы равна сумме масс слагающих породу минералов, а массы жидкой и газовой фаз сосредоточены в поровом пространстве. Тогда выражение (3.3) можно преобразовать к ВИДУ:

$$\delta = (1 - K_{п}) \sum \delta_i V_i + \sum K_{п} K_{жк} \delta_{жк} + \delta_{г} \delta_{г} \quad (3.4)$$

где $K_{п}$ коэффициент пористости, δ_i и V_i - минеральная плотность и объемное содержание в твердой фазе i —го минерала, $\delta_{жк}$ плотность k —й жидкости. $K_{жк}$ —объемное содержание k —й жидкости в поровом пространстве, $\delta_{г}$ - плотность газа, $K_{г}$ - объемное содержание газа в поровом пространстве. Из 3.4 следует, что плотность горной породы зависит от минерального состава. заполнения порового пространства. Факторов может быть различной.

3.3.1 МАГМАТИЧЕСКИЕ ПОРОДЫ

Общим для магматических пород является их образование путем остывания магматического расплава. Классификация этих пород основана на двух основных признаках: а) условия образования, б) состав. По условиям образования выделяют; 1) **интрузивные** -породы, образовавшиеся при медленном остывании расплава на значительной глубине при низком теплообмене с вмещающими породами. При этом

первичный расплав теряет большую часть летучих компонентов (жидкая и газовая фазы). Формируются низкопористые полнокристаллические породы (см. Таб №4). 2) **Эффузивные** – породы, образовавшиеся при быстром остывании расплава в приповерхностных условиях (на поверхности, под водой, на малых глубинах). Расплав не успевает терять значительную часть летучих. Формируются пористые породы со стекловатой или частично кристаллической структурой. Среди эффузивов выделяют **кайнотипные** – сравнительно молодые породы в значительной степени сохранившие свой первичный облик и **палеотипные** – древние породы, подвергшиеся значительным изменениям (широко известно зеленокаменное изменение эффузивов) минерального состава и структуры. В частности типичными является уменьшение пористости с образованием миндалекаменных структур.

Состав определяется содержанием SiO_2 и номером плагиоклазов (соотношение Ca и Na). Нормальный (щелочноземельный) ряд магматических пород представлен всеми разновидностями от кислых (содержание SiO_2 около 70%), до ультраосновных (содержание SiO_2 около 40%). Щелочной ряд представлен ограниченным набором пород типа сионитов с составом, соответствующим средним -основным породам.

Таблица 6

Порода	$\delta \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right)$	Порода	$\delta \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right)$
Гранит	2.57	Сиенит	2.62
фанерозоевский		Сиенит	2.66
Гранит	2.59	нефелиновый	
докембрийский		Липарит	2.35
Гранодиорит	2.69	Кварцевый	2.60
Диорит кварцевый	2.75	порфир	
Диорит	2.81	Андезит	2.49
Габбро	2.95	Андезит-й	2.73
Пироксенит	3.2	порфирит	
Перидотит	3.2	Базальт	2.54
		Диабаз	2.79

В таб. 6 приведены средние значения плотности основных типов магматических пород. По этим данным составлена диаграмма (рис. 3.1) зависимости средней плотности от состава магматических пород. Состав выражен через содержание SiO_2 . В нижней части диаграммы приведены названия интрузивных, кайнотипных эффузивных и палеотипных эффузивных пород соответствующего состава.

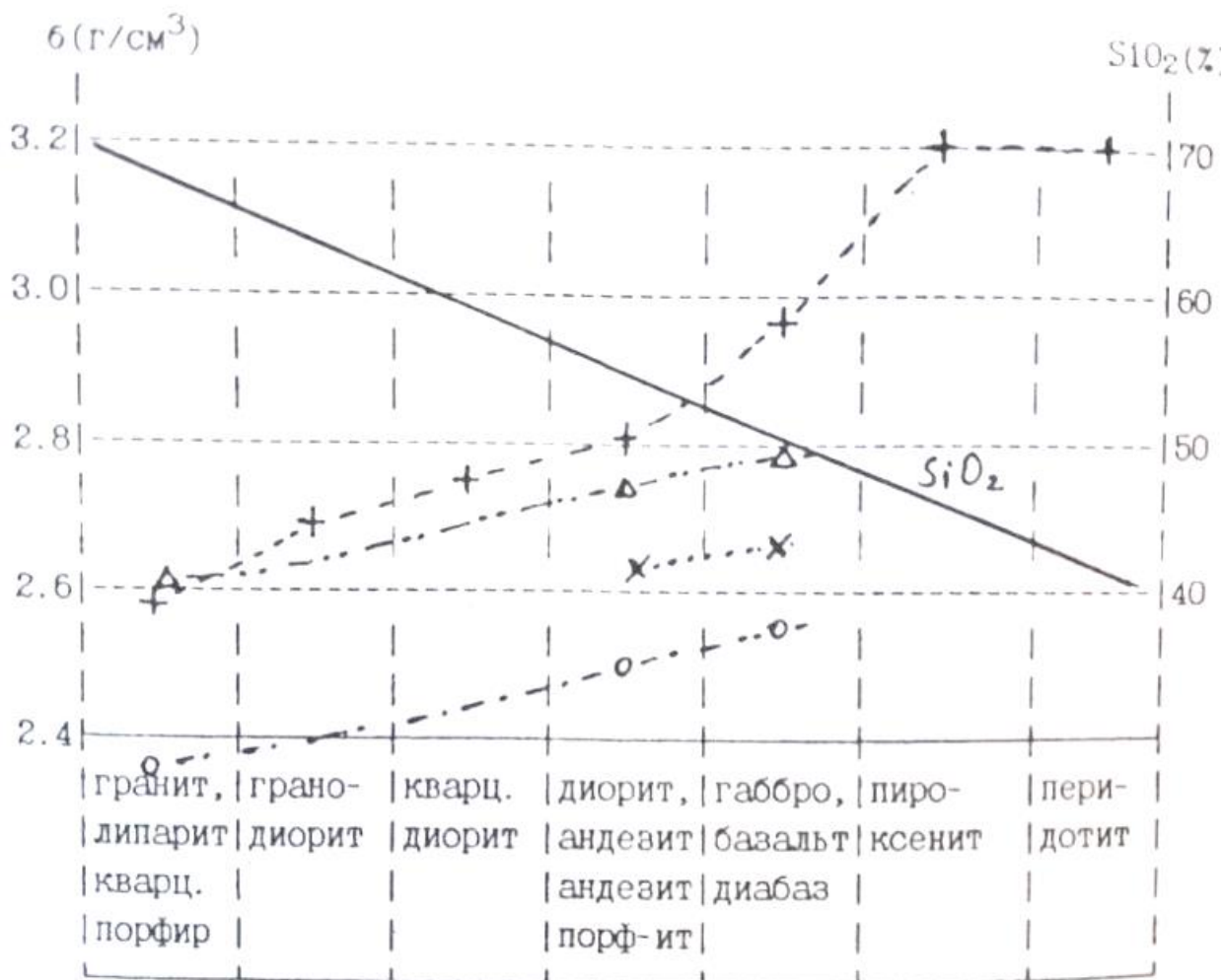


Рис.3.1. Зависимость средней меткости магматических пород от состава. (+ интрузивные породы щелочноземельного ряда, x интрузивные породы щелочного ряда, o кайнотипные эффузивы, Δ палеотипные эффузивы).

Сделаем основные вывод:

1. Из таблицы и диаграммы следует закономерное возрастание плотности по мере увеличения основности (уменьшения содержания SiO_2), что обусловлено возрастанием количества плотных темноцветных минералов.
2. Разница в средних плотностях между соседними группами по основности составляет около $\pm 0.1 \text{ г/см}^3$. т.е. является **значимой** (например, позволяет разделять эти породы по уровню гравитационного поля над ними).
3. Графики зависимости плотности от состава интрузивных и палеотипных эффузивных пород практически совпадают. Причина этого – близость составов и пористости. Исключение составляют породы основного

ионного состава. причины этого будут рассмотрены ниже.

4. Бросается в глаза существенно меньшие плотности кайнотипных зффузивов. Причина — высокая пористость.

Вероятные отклонения от средних значений в каждой группе интрузивных и палеотипных зффузивных пород составляют 0.1 г/см^3 , у кайнотипных зффузивов 0.15 г/см^3 . Эти отклонения связаны с влиянием двух основных факторов;

1. В каждой петрографической группе объединены по сути различные породы. Например. среди гранитов выделяют аляскитовые, мусковитовые, двуслюдяные, роговообманковые и т.д. Таким образом, в пределах группы возможны вариации состава породообразующих, минералов и, следовательно, плотности. Так, среди пород типа габбро есть и анортозиты (состоят на 90-95% из плагиоклаза — лабрадора) с плотностью 2.69 г/см^3 , и оливинное габбро (плагиоклаз и до 20 % оливина) с плотностью 3.07 г/см^3 .

2. Любая порода, кроме породообразующих, содержит и акцессорные (второстепенные) минералы. В кислых породах это апатит ($\delta = 3.19$), циркон ($\delta = 4.7$), магнетит ($\delta = 5.1$), ильменит ($\delta = 4.79$). В породах основного состава это магнетит, титаномagnetит ($\delta = 4.72$), сульфиды ($\delta = 4.7 - 4.9$). В ультраосновных - магнетит, титаномagnetит. Количество акцессорных минералов может меняться от тысячных долей процента до нескольких процентов, что и приводит к вариациям плотности для ряда районов установлено увеличение содержания акцессорных минералов в рудоносных магматических комплексах, что может служить поисковым признаком.

Процессы автометаморфизма (серпентинизация, амфиболизация) оказывают существенное влияние на плотность магматических пород. При серпентинизации массивов ультраосновных пород пироксены и оливин преобразуются в серпентин — минерал, содержащий гидроксильную группу. с плотностью 2.55 г/см^3 . На рис. 3.2 представлен график зависимости плотности от степени серпентинизации. Нацело серпентинизированные породы имеют плотность, соответствуют кислым магматическим породам, это обстоятельство приходится учитывать при интерпретации данных гравиразведки. дальнейший процесс метаморфизма связан с карбонатизацией, при которой плотность возрастает.

Амфиболизация характерна для пород основного состава и проявляется в преобразовании пироксена в амфиболы и плагиоклазы с выделением хлорита, эпидота, серицита — минералов с меньшей плотностью.

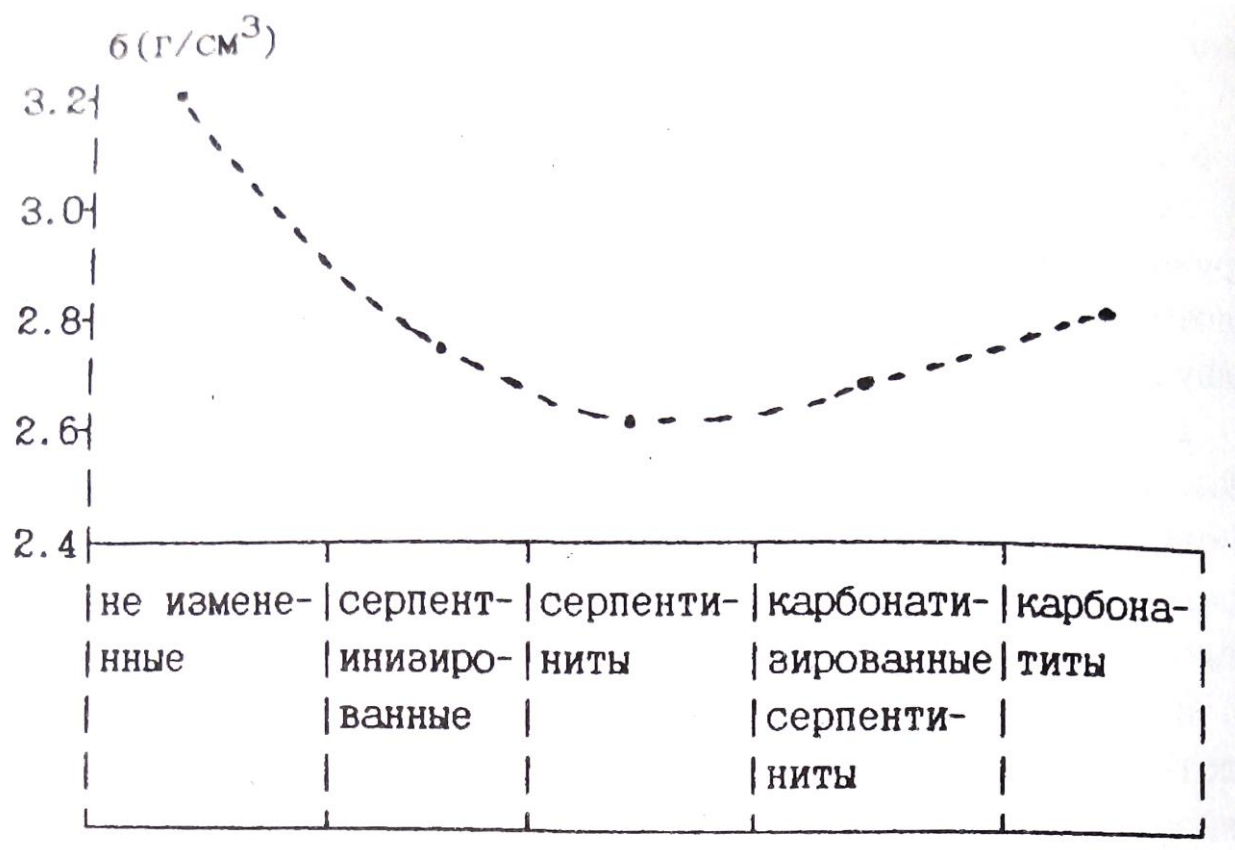


Рис 3.2. Изменение плотности ультраосновных пород в процессе серпентинизации и карбонатизации

Таким образом, амфиболизация сопровождается уменьшением плотности. Обратите внимание, что на рис. 3.1 плотность диабаз меньше плотности их интрузивного аналога — габбро. Диабаз это порода, претерпевшая метаморфические изменения, и её плотность соответствует амфиболизированному габбро. Процессы локального метаморфизма (метасоматоза) могут сопровождаться как уменьшением, так и увеличением плотности. В таблице 7 приведены данные по изменению плотности для типичных процессов.

Таблица 7

Порода	$\delta \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right)$ измененных	Процесс	$\delta \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right)$ не измененных
Гранодиорит	2.65	Серицитизация	2.55
Гранодиорит	2.67	Хлоритизация	2.61
Порфирит	2.76	Окварцевание	2.65
Диорит	2.8	Альбитизация	2.63
Гранит	2.6	Грейзенизация	2.77
Порфирит	2.7	Эпидотизация	2.85

Локальные изменения плотности используются как поисковый признак, так как процессы рудообразования сопровождаются локальным метасоматозом.

3.3.2. ОСАДОЧНЫЕ ГОРНЫЕ ПОРОДЫ

ОБЛОМОЧНЫЕ ОСАДОЧНЫЕ ГОРНЫЕ ПОРОДЫ

В таблице 8 приведены значения минеральной плотности (плотность твердой Фазы) основных типов обломочных пород.

Порода	$\delta_{\text{ср}} \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right)$	$\delta_{\text{min}} \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right)$	$\delta_{\text{max}} \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right)$
Песчаник	2.67	2.58	2.76
Алеврит	2.69	2.62	2.76
Аргилит	2.68	2.69	2.78
Глина	2.68	2.58	2.78

Отметим близкие значения $\delta_{\text{в}}$, из чего следует зависимость плотности в основном от пористости и характера заполнения порового пространства. Для водонасыщенных и газонасыщенных пород плотность ($\delta_{\text{в}}$, $\delta_{\text{г}}$) соответственно равна:

$$\delta_{\text{в}} = (1 - K_{\text{п}})\delta_{\text{т}} + K_{\text{п}} \delta_{\text{т}} \quad (3.5)$$

$$\delta_{\text{г}} = (1 - K_{\text{п}})\delta_{\text{т}} \quad (3.6)$$

где $K_{\text{п}}$ - коэффициент пористости, $\delta_{\text{т}}$ - плотность твердой фазы, плотность воды. Учитывая постоянство минеральной плотности, в Обоих случаях имеем линейную зависимость плотности от пористости. На рис. 3.3 приведены зависимости, рассчитанные для $\delta_{\text{т}}=2.68\text{г/см}^3$ и результаты изучения плотности реальных пород. Расчетные и экспериментальные данные достаточно близки. Изменение пористости на 1% приводит к изменению плотности на 0.03 и 0.02 г/см³, соответственно для газонасыщенных и водонасыщенных пород. Эти цифры полезно запомнить поскольку они определяют требования к точности измерения плотности геофизическими методами (гамма—гамма каротаж, акустический каротаж) с целью оценки пористости коллекторов.

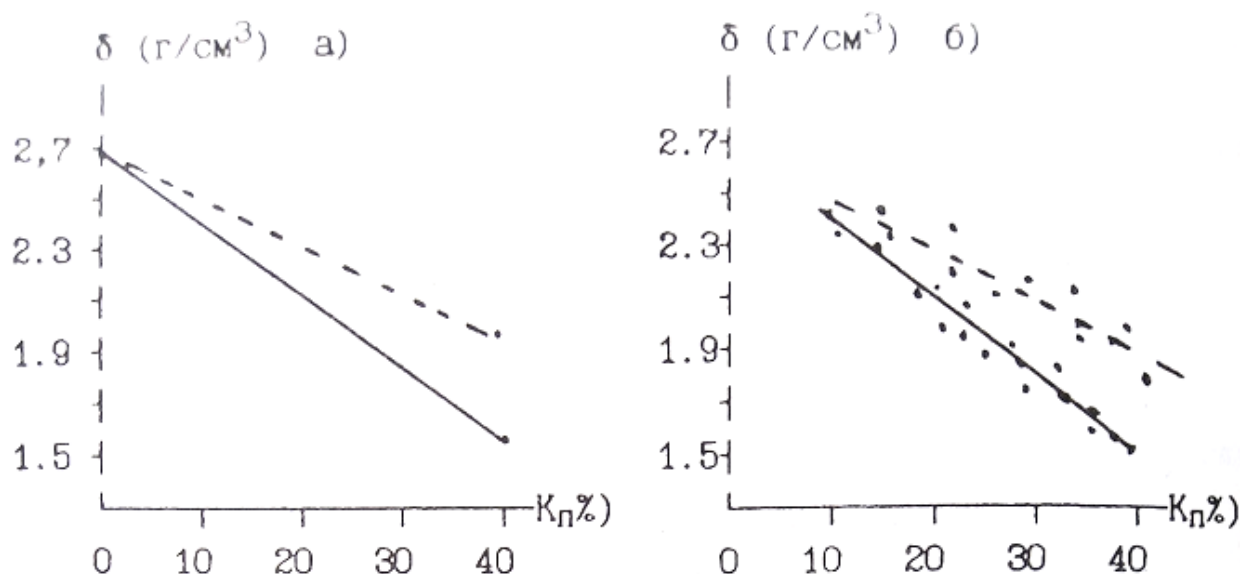


Рис. 3.3. Зависимость плотности обломочных осадочных пород от пористости, а) расчет, б) экспериментальные данные для песчано-глинистых отложений. - водонасыщенные - газонасыщенные

Как отмечалось ранее, в результате уплотнения под нагрузкой вышележащих слоев происходит закономерное уменьшение пористости обломочных пород. Если в выражении 3.5 и 3.6 подставить значения пористости из 2.5, то получим зависимость плотности от глубины залегания:

$$\delta_{\text{Г}}(H) = \delta_{\text{Т}}(1 - K_{\text{п}}(0) * \exp(-0.45 H)) \quad (3.7)$$

$$\delta_{\text{В}}(H) = \delta_{\text{Т}} + K_{\text{п}}(0) * (1 - \delta_{\text{Т}}) * \exp(-0.45 H) \quad (3.8)$$

где $K_{\text{п}}(0)$ - пористость на поверхности, H — глубина в км.

Таблица 9

Порода	$\delta \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right)$ пределы	$\delta \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right)$ наиб. вероят.
Глины	1.20-2.40	-
Аргилиты	1.70-2.90	2.30-2.40
Пески	1.30-2.00	1.50-1.70
Песчаники	2.00-2.90	2.50-2.65
Алевриты	1.80-2.80	2.30-2.50
Конгломераты	2.10-3.00	-

В таблице 9 приведены значения плотности обломочных осадочных пород.
Основные выводы:

- 1) Плотность обломочных осадочных горных пород (вероятные значения) ниже плотности магматических пород.
- 2) Плотность меняется в широких пределах. что связано с широким диапазоном возможных значений пористости.
- 3) Интервалы плотности основных типов обломочных пород в значительной степени перекрываются.

КАРБОНАТНЫЕ ОСАДОЧНЫЕ ПОРОДЫ

В таб.10 приведены значения минеральной плотности карбонатных пород.

Таблица 10

Порода	$\delta_{\text{ср}} \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right)$	$\delta_{\text{min}} \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right)$	$\delta_{\text{max}} \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right)$
Мел	2.69	2.56	2.80
Известняк	2.72	2.62	2.80
Доломит	2.80	2.76	2.88
Мергель	2.70	2.58	2.80

Отмечаются значимые различия средних плотностей. Поэтому плотность карбонатных пород будет определяться минеральным составом, пористостью и характером заполнения порового пространства. Представления о плотности этих пород иллюстрируются таб. 11.

Таблица. 11

Порода	$\delta \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right)$ пределы	$\delta \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right)$ наиб. вероят.
Известняки	1.80-2.90	2.60-2.70
Доломиты	1.90-3.00	2.60-2.80
Мергели	1.50-2.80	2.20-2.40

Для этой группы пород остаются справедливыми пункты 2 и 3 выводов, которые получены для обломочных пород. Дополнительно отметим более высокую плотность известняков и доломитов, которая близка к плотности кислых и средних магматических пород.

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ОСАДОЧНЫЕ ПОРОДЫ ,

Для этих пород характерна низкая пористость, и их плотность в основном определяется минеральным составом. Плотность гипсов лежит в пределах $2.10 — 2.50 \text{ г/см}^3$, ангидритов $2.50—2.90 \text{ г/см}^3$, каменной соли $2.15 — 2.30 \text{ г/см}^3$. Приведем пример соотношения плотностей осадочных комплексов с вытекающими из этого особенностями геофизических полей. Среди структур, вмещающих углеводородное сырье, существуют так называемые диапировые структуры или структуры протыкания. Они образуются в результате выжимания ("Всплывания") соляных куполов сквозь толщ обломочных осадочных пород. Соотношение плотностей приведено на рис. 3.4 а).

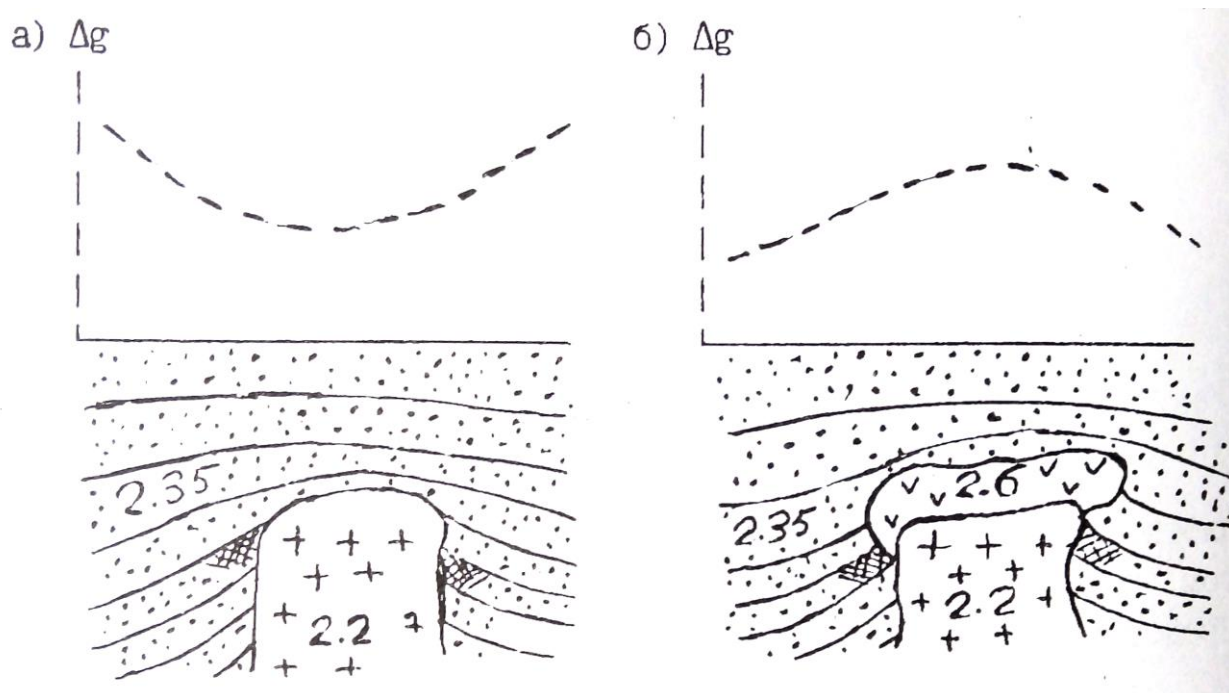


Рис. 3.4. Характер распределения плотности и ускорение силы тяжести над соляно-купольными структурами (хх песчано-глинистые отложения, + - каменная соль, v — ангидрит, --- - приращение ускорения силы тяжести, // - нефтеносность)

Плотность каменной соли (2.20 г/см^3) меньше плотности песчано-глинистых отложений (2.35 г/см^3). Это обуславливает недостаток масс соляного купола над структурой наблюдается Уменьшение силы тяжести (Кривая Δg , рис.3.4. а)). Однако, возможно и более сложное строение соляных куполов (рис.3.4. б)). В верхней части купола образуется покрывка сложенная ангидритами ("каменная шляпа") с плотностью 2.60 г/см^3 .

Избыток масс покрывки может превосходить действие недостатка масс соляного купола, и над структурой наблюдается увеличение силы тяжести. Возможно ситуация баланса этих двух факторов, и над структурой существенного изменения гравитационного поля не будет.

3.3.3. МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ ПОРОДЫ

Метаморфические породы образуются в результате регионального (охватывающего значительные площади и объемы пород) преобразования магматических и осадочных пород под действием высокой температуры и давления. В основу классификации метаморфических пород положены условия (фаия) метаморфизма, структурно-текстурные особенности и состав породы. В порядке возрастания термодинамических условий выделяют следующие фации: зеленых сланцев, эпидот-амфиболитовую, амфиболитовую, гранулитовую, эклогитовую. В начальный этап регионального метаморфизма происходит уплотнение первичных осадочных пород в результате уменьшения пористости под действием давления (катагенеза). В фацию зеленых сланцев наблюдается некоторое разуплотнение исходных магматических и подвергнутых катагенезу осадочных пород в результате образования минералов, содержащих кристаллизационную и конституционную воду. Дальнейший метаморфизм сопровождается увеличением плотности за счет полиморфных преобразований минералов. Образуются новые минералы с уплотненными кристаллическими решетками. данные о плотности метаморфических пород Приведены в таблице 12. При общем закономерном возрастании плотности с увеличением степени метаморфизма, в пределах каждой отмечаются существенные колебания плотности, что отражает влияние минерального состава пород. Интересно отметить, что при так называемом ультраметаморфизме (протекает в условиях относительно пониженного давления и высоких температур, сопровождается полной перекристаллизацией и частичным расплавлением пород) отмечаются существенное уменьшение плотности. Так амфиболиты (3.0 г/см^3) преобразуются в метасоматические граниты (2.6 г/см^3). Процесс гранитизации сопровождается кремний-калиевым метасоматозом с преобразованием плотных минералов (амфиболы, гранаты, биотит) в менее плотные (кварц, микроклин).

Таблица 12

Фация	Порода	$\delta_{\text{ср}} \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right)$	$\delta_{\text{min}} \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right)$	$\delta_{\text{max}} \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right)$
Зеленых сланцев	Филит	2.45	2.40	2.70
	Сланец:			
	Кварцево- серицитовый	2.57	2.50	2.64
	Кремнистый	2.60	2.58	2.62
	Хлоритовый	2.76	2.72	2.80
	Слюдистый	2.65	2.60	2.75
Эпидот- амфиболитовая	Сланец кристаллический:			
	Биотитовый	2.63	2.62	2.63
	Роговообманковый	2.77	2.75	2.80
	Кварцит	2.64	2.62	2.65
	Мрамор	2.70	2.68	2.72
Амфиболитовая	Гнейс:			
	Биотитовый	2.63	2.60	2.68
	Амфиболовый	2.78	2.75	2.82
	Амфиболит:			
	Полевошпатовый	2.87	2.80	2.95
	Гранатовый	3.10	3.00	3.20
Гранулитовая	Гранулит	2.72	2.60	2.85
	гиперстеновый Сланец	3.05	2.90	3.25
Эклогитовая	Эклогит	-	3.20	3.40

3.3.4. ВЛИЯНИЕ ВЫВЕТРИВАНИЯ НА ПЛОТНОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД.

Процессы гипергенеза в результате химического и механического выветривания приводят к существенному изменению состава и состояния пород. Образуется вторичная пористость в результате растрескивания и выщелачивания, которая достигает 20-30%.

Образующиеся коры выветривания глинисто-сланцевого и хлоритогидросланцевого состава с гидроокислами железа, обломками кварца, микроклина, биотита имеют пониженную плотность порядка 2.1-2.5 г/см³.

Вопросы для самопроверки:

1. *Какие причины создают неоднородность физических свойств горных пород?*
2. *Как строятся гистограммы распределения физических свойств горных пород?*
3. *Типы пористости.*
4. *Какие факторы определяют пористость обломочных пород?*
5. *Назовите группы пород с низкой и повышенной пористостью.*
6. *Как изменяется пористость с глубиной?*
7. *Что такое влажность и влагоемкость?*
8. *В каком виде присутствует вода в горных породах?*
9. *Какими особенностями обладает связанная вода?*
10. *Что такое проницаемость?*
11. *Отличие физической проницаемости от фазовой?*
12. *Как классифицируются породы по проницаемости?*
13. *Как образуется двойной электрический слой?*
14. *Каким параметром характеризуется нефтенасыщенность?*
15. *Что такое плотность и минеральная плотность?*
16. *От чего зависит плотность минералов?*
17. *Назовите основные факторы, определяющие плотность магматических (интрузивных и эффузивных) и осадочных (обломочных, карбонатных и гидрохимических) пород.*
18. *Рассчитайте плотность водонасыщенного и газонасыщенного песчаника с коэффициентом пористости 25%.*

Литература:

1. В.М. Добрынин, В.Ю. Вендельштейн, Д.А. Кожевников. Петрофизика: Учебник для вузов. -М: Недра, 1991.
2. В.Н. Кобранова. Петрофизика: Учебник для вузов -М: Недра, 1986.

Оглавление

Введение.....	3
1. Статистическая природа физических свойств.....	4
2. Коллекторские свойства.....	8
2. 1. Пористость.....	9
2.1.1. Классификация пор.....	10
2.1.2. Пористость обломочных осадочных пород.....	11
2.1.3. Пористость карбонатных осадочных пород.....	14
2.1.4. Пористость гидрохимических осадочных пород.....	15
2.1.5. Пористость магматических и метаморфических пород.....	15
2.1.6. Пористость гидротермально измененных пород.....	16
2.2. Влажность, влагоемкость.....	17
2. 3. Проницаемость	19
2.3.1. Физическая проницаемость	19
2.3.2. Связь коэффициента проницаемости с коэффициентом пористости и структурой порового пространства.....	20
2.3.3. Фазовая проницаемость	23
3. Плотностные свойства	24
3.1. Основные понятия и определения	24
3.2. Плотность минералов	25
3.3. Плотность горных пород	28
3.3.1. Магматические породы	28
3.3.2. Осадочные породы	33
3.3.3. Метаморфические породы	37
3.3.4. Влияние выветривания на плотность пород	38
Вопросы для самопроверки	39
Литература	39

Игорь Иванович Бреднев

ПЕТРОФИЗИКА

Часть 1. Коллекторские и плотностные свойства горных пород

Учебно-методическое пособие по дисциплине «Петрофизика»
для студентов профилизации «Геофизические методы поисков и разведки
МПИ» (РФ) направления 650200 «Технологии геологической разведки»

Конспект лекций

Корректурa кафедры геофизики

Подписано в печать 09.09.2004г.
Бумага писчая. Формат бумаги 60х84 1/16. Печать на ризографе.
Печ.л. 2,8. Уч-изд. л. 2,39. Тираж 100 экз. Заказ №130.

Издательство УГГГА
620144. г. Екатеринбург. УЛ- Куйбышева 30
Уральская государственная горно-геологическая академия
Лаборатория множительной техники

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

Виноградов В.Б.

ГЕОМЕТРИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Екатеринбург

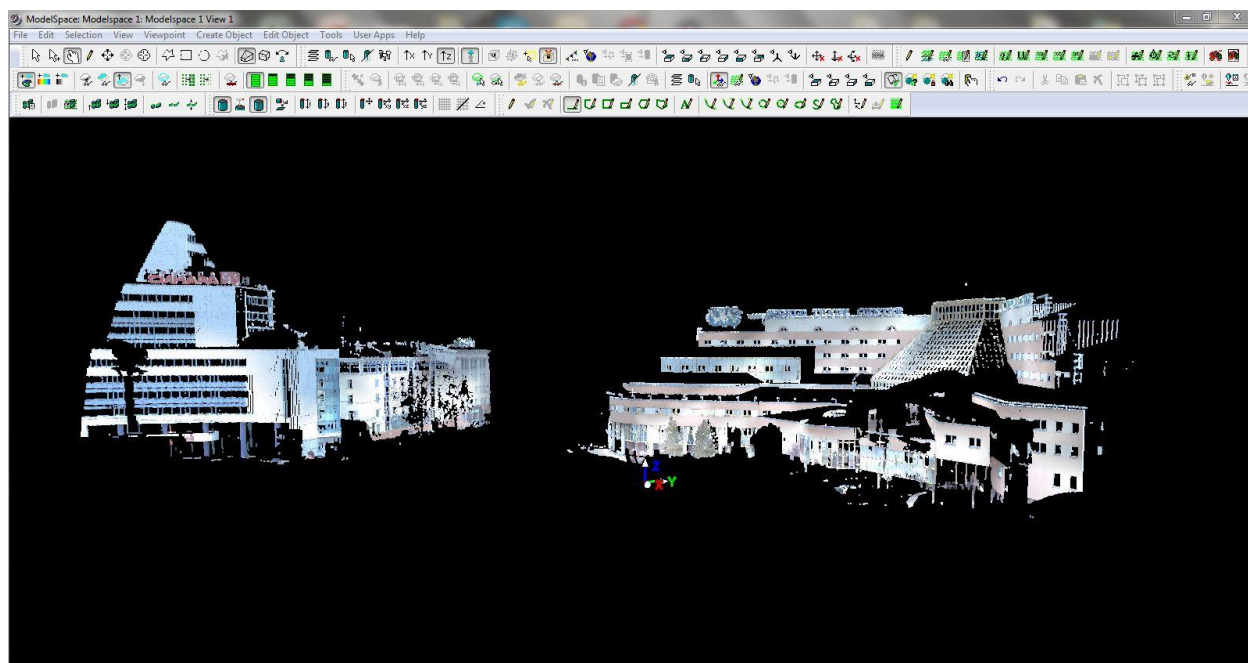
2020

Введение.

Цели, задачи и объекты дисциплины. Ознакомиться с методами геометрии, применяемыми в геофизической практике. Ознакомиться с алгоритмами, программами и математическими пакетами, используемыми при построении карт и разрезов.

Термин «Геометризация» в нашей отрасли имеет крайне широкое толкование. В широком смысле применение методов геометрии в геологии и горном деле. Часто его толкуют как описание геологических поверхностей, поверхностей карьеров и иных горных выработок на основе инструментальных измерений, а также теорию и набор технологий подсчета запасов. Геометризация это непрерывный процесс, отражающий степень изученности объекта. По мере поступления новых данных расчеты проводятся заново. На основе геометрической модели при проведении разведки корректируется сеть скважин.





Основным отчетным материалом проведенных геофизических съемок является карта. В инструкциях по каждому геофизическому методу детально прописано, каким требованиям должна удовлетворять отчетная карта (сечение, раскраска, вид изолиний, масштаб и т.д.), как должна выглядеть отчетная карта, указано с помощью каких специализированных пакетов. Более сложная задача построения геологических поверхностей по геофизическим данным. По данным ГИС строят поверхности ВНК, ГНК, ГВК, кровли резервуара, подошвы резервуара, поверхности тектонических нарушений, поверхности несогласия. Нередко строят карты параметров: пористости, эффективной нефтенасыщенной мощности, плотности и др. Для рудных месторождений строят поверхности рудных тел, карты ЗМС и т.п.

Одна из задач количественной интерпретации – определение геометрии источников поля, особенно их верхней кромки. Для разработки месторождений строительных материалов – это главная задача.

Результат существенно зависит от знания пространственной изменчивости свойств, учета расположения точек на площади, по которым они определены. Если точка определения концентрируется в подобластях, то и средние значения, и дисперсии могут оказаться ошибочными.

Геометрия сети наблюдений. Сеть наблюдений обычно представляет множество более - менее регулярно расположенных на земной поверхности пунктов наблюдений. С одной стороны пункты относятся к поверхности, т.е. к двумерному множеству. Для описания движения автомобиля достаточно указать две координаты. Например, на шаре достаточно указать две координаты. С другой стороны при описании местоположения пунктов наблюдений обычно мы используем третью координату – высоту, так как рельеф меняет рисовку карты.

Сеть наблюдений принято представлять в виде множества многоугольников. Очень часто сеть пунктов наблюдений представляют в виде триангуляционной сети – множества треугольников. Шаг измерений, расстояние между профилями оказывают определяющее влияние на качество построенных карт. Этому влиянию необходимо давать количественную оценку.

Геометризация и анализ физических полей. Геометризация геологических объектов проводится в несколько этапов:

- измерение
- создание базы данных
- создание цифровой модели геологического объекта
- сопровождение модели.

В разведочной геофизике строят не только карты изолиний, но и карты векторов поля. В гравиразведке с 20-х годов 20 века по 70-е годы 20 века строили карты проекции вектора поля на горизонтальную плоскость V которые измеряли с помощью вариометров и градиентометров.

Особенность магниторазведки в том, что намагниченность горных пород – вектор и магнитная индукция – вектор. В магниторазведке измерения с феррозондовыми магнитометрами позволяли получить все три компоненты вектора индукции. Сотрудники НГУ по результатам работ с таким прибором построили карты во всех возможных вариантах, и даже карты аномальных склонений и наклонений.

По результатам микромагнитной съемки строят карты векторов. Анализ направлений векторов позволяет судить о преимущественном направлении трещин на территории съемки. Разработана методика построения роз-диаграмм направлений изодинам. Эта методика применяется сейчас в обработке площадных съемок.

Измерение векторов полей считается перспективным направлением в разведочной геофизике. Внедрение инерциальных магнитометров приведет в возобновлению построения карт векторов. Интерпретация таких карт проще, чем карт проекций, поскольку вектор поля направлен в к источнику поля. Векторная магнитометрия в скважинах нередкое явление.

Создание пространственной модели проводится в несколько этапов. Для получения результата необходима длительная кропотливая работа. Обязательно нужно оценивать надежность и точность используемой информации. На схеме показаны возможные виды работ и последовательность операций.

Обе перечисленные выше задачи относятся к категории задач восстановления функций по эмпирическим данным. Естественно необходимо оценить качество восстановления. Помимо близости значений в отдельных точках вводится критерий близости функций:

1. Расстояние между функциями в смысле среднеквадратического отклонения:

$$R(f_1, f_2) = \sqrt{\int (f_1(x) - f_2(x))^2 P(x) dx},$$

где $P(x)$ - неотрицательная функция, такая, что $\int P(x) dx = 1$.

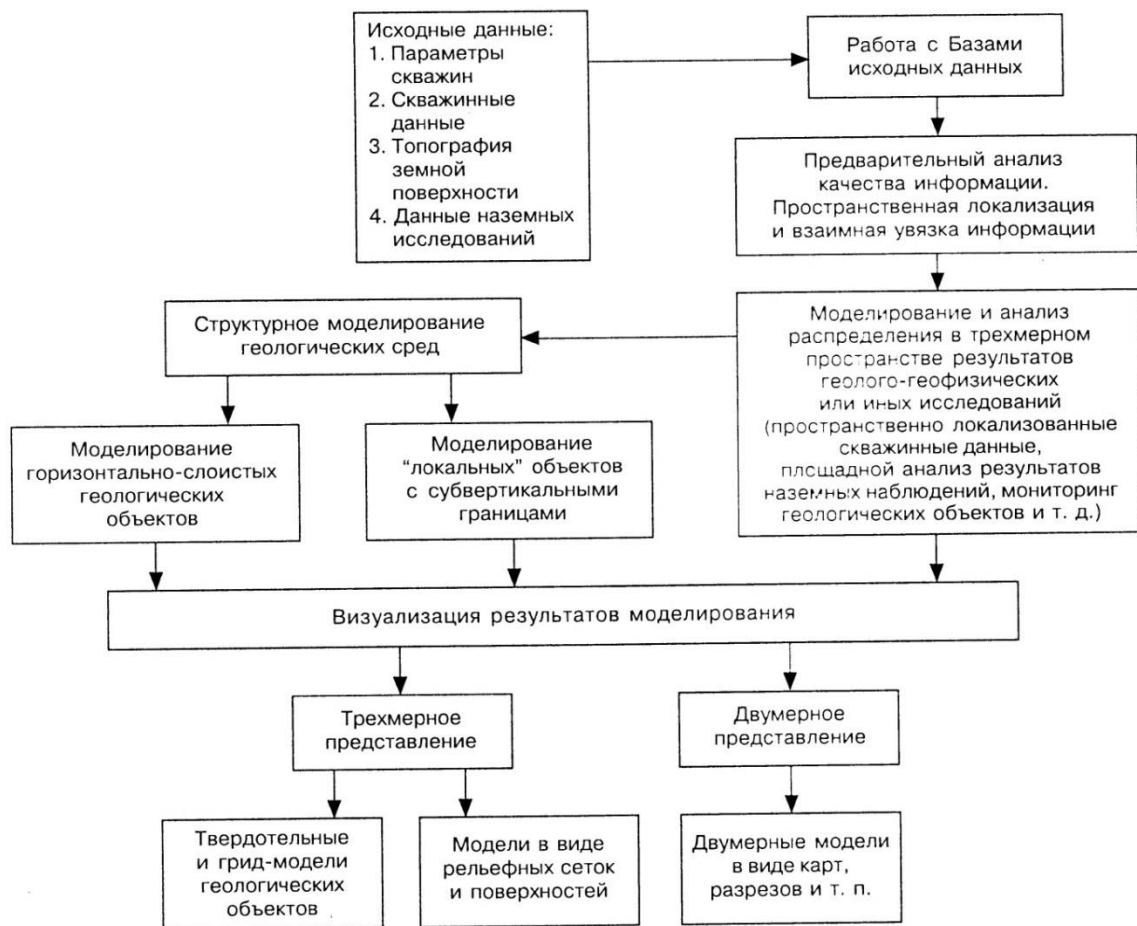
2. Расстояние в смысле равномерного отклонения:

$$R(f_1, f_2) = \sup_x |f_1(x) - f_2(x)| \leq \chi.$$

Вторая метрика сильнее, чем первая, т.е. если справедливо (2) то (1) выполняется.

Выбор меры близости определяется содержательной постановкой задачи.

После проведения полевых работ наступает этап обработки, стоимость которой непрерывно возрастает. Ниже представлена схема обработки информации:



ЛЕКЦИЯ 2 ГЕОМЕТРИЯ СЕТЕЙ НАБЛЮДЕНИЙ

Геометрия сети измерений оказывает существенное влияние на результаты работ. Как правило, стремятся к наблюдениям в узлах квадратной сети или иной правильной геометрической сети. Исходя из экономических соображений, как правило, сеть измерений прямоугольная. В процессе полевых работ на местности по разным причинам приходится отступать от проекта. Фактически сеть наблюдений квазирегулярная.

Маршрутные наблюдения проводятся вдоль некоторой линии, как правило, по пути легкого передвижения, вдоль дорог, с невысокими превышениями и т.д. Линия маршрута в этом случае, особенно при использовании навигатора, существенно отклоняется от прямой. В этом случае значения поля переносят на прямую линию профиля. Оценить ошибки восстановления поля очень трудно. Ценность таких наблюдений невысокая. Маршрутные измерения выполняют для оценки характера поля.

Сети наземных полевых измерений. Сеть пространственных наблюдений в скважинах и шахтах.

Определение координат пунктов геофизических измерений в настоящее время проводится с очень высокой точностью и трудностей не вызывает. Однако неизбежные отклонения от проекта изменяют геометрию сети измерений. Неравномерность сети оказывает значительное влияние на надежность выявления аномалий. При существенной неоднородности сети пунктов и случайных ошибках измерений появляется неустойчивость результатов интерполяции. Из-за особенностей алгоритма восстановления функции (интерполяции) на карте могут появиться ложные аномалии или сильно искажаться реальные аномалии. И, наоборот, из-за сильного сглаживания, на карте могут не появиться реальные аномалии.

ЛЕКЦИЯ 3 Построение карт

Геометрия сети наблюдений. Как правило, стремятся к наблюдениям в узлах квадратной сети или иной правильной геометрической сети. Исходя из экономических соображений, как правило, сеть измерений прямоугольная. В процессе полевых работ на местности по разным причинам приходится отступать от проекта. Фактически сеть наблюдений квазирегулярная.

Маршрутные наблюдения проводятся вдоль некоторой линии, как правило, по пути легкого передвижения, вдоль дорог, с невысокими превышениями и т.д. Линия маршрута в этом случае, особенно при использовании навигатора, существенно отклоняется от прямой линии. В этом случае значения поля переносят на прямую линию профиля. Оценить ошибки восстановления поля

очень трудно. Ценность таких наблюдений невысокая. Маршрутные измерения выполняют для оценки характера поля.

Сети наземных полевых измерений. Сеть пространственных наблюдений в скважинах и шахтах.

Определение координат пунктов геофизических измерений в настоящее время проводится с очень высокой точностью и трудностей не вызывает. Однако неизбежные отклонения от проекта изменяют геометрию сети измерений. Неравномерность сети оказывает значительное влияние на надежность выявления аномалий. При существенной неоднородности сети пунктов и случайных ошибках измерений появляется неустойчивость результатов интерполяции. Из-за особенностей алгоритма восстановления функции (интерполяции) на карте могут появиться ложные аномалии или сильно искажаться реальные аномалии. И, наоборот, из-за сильного сглаживания, на карте могут не появиться реальные аномалии.

Построение карт проводится по результатам измерений (геофизические поля) и наблюдений (геологические объекты). Карты могут быть представлены в виде изолиний или проекций векторов на горизонтальную или вертикальную плоскость (рис. 1). Чтобы правильно оценить надежность карты рассматривают расстояния между пунктами, плотность распределения пунктов на площади, характер распределения пунктов (регулярное, равномерное, случайное, групповое).

Гипотезу о равномерности пунктов измерений на территории проверяют с помощью критерия хи-квадрат:

$$\chi^2 = \sum_1^N \frac{(o_i - E)^2}{E}.$$

Гипотезу о случайном распределении точек проверяют с помощью критерия Пирсона:

$$\text{Pr} = \frac{e^{-\gamma} \gamma^r}{r!}.$$

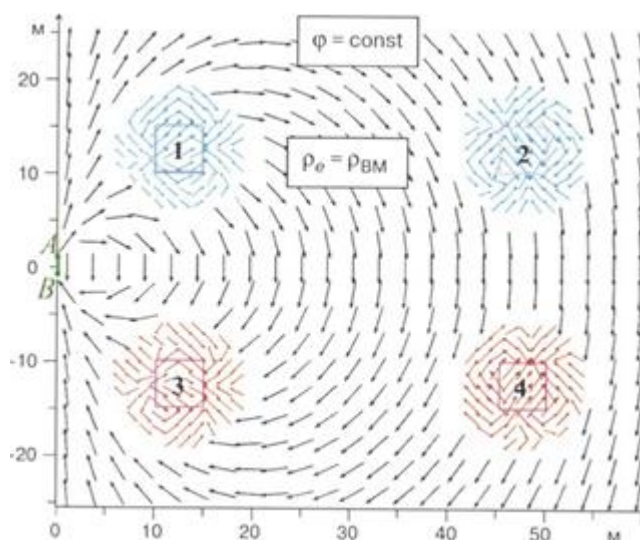


Рис. 1 Карта векторов

Метод ближайшего соседа предназначен для изучения характера распределения подобластей (точек), на которые разделена изучаемая территория. Математическое ожидание расстояния между N точками на территории площадью S равно:

$$D = \frac{\sqrt{S}}{2\sqrt{N}}.$$

Обозначим среднее расстояние между соседними точками на территории d . Величина:

$$R = \frac{d}{D},$$

Является статистикой метода ближайшего соседа. Ее значение меняется от 0 до 2,15. $R=2,15$ соответствует расположению точек в вершинах шестиугольников (регулярному размещению точек). Критерием проверки о случайном расположении точек служит величина:

$$Z = \frac{(d - D)\sqrt{nN}}{0.26136\sqrt{S}},$$

где n – число измерений расстояний между точками. Величина Z распределена по нормальному закону.

Геофизические карты отражают распределение функций, которые мы считаем непрерывными и гладкими (имеющими в каждой точке поверхности измерения производную). Нередко приходится анализировать структурные карты геологических поверхностей (баженовская свита), которые построены по редкой сети скважин. Геологическая карта, несет отпечаток представлений автора о геологической истории территории.

До появления ЭВМ карты изолиний поля строили вручную. Качество карты зависело от квалификации техника, который ее строил. Эту карту редактировал и утверждал старший геофизик партии. В то время не было необходимости

преобразования измеренных значений в узлы регулярной сети. Построение осуществляли по нерегулярной сети. Карта отражала субъективное мнение автора. Т.е. разные авторы строили разные карты по одним и тем же измерениям.

С появлением ЭВМ задача построения карты решается, как правило, с помощью ЭВМ. Экономический эффект применения ЭВМ для построения карт велик, время на создание карт уменьшилось в сотни раз. Построение карт с помощью математических пакетов считают объективным, однако легко убедиться, что карты, построенные с помощью разных программ и математических пакетов, различаются. Алгоритм построения карты включает предположение автора алгоритма о закономерностях поведения поля. Интерполяция между пунктами наблюдений проводится, как правило, на основе полиномиального представления изучаемой функции и непрерывности производных изучаемой функции.

Как правило, ЭВМ сначала проводит интерполяцию измеренных значений поля в узлы квадратной сети (грид-файлы), а затем строит по этим значениям карту. В отличие от карт, построенных вручную, в математических пакетах предусмотрено вычисление погрешности построения изолиний. Специализированные пакеты основаны на алгоритмах, учитывающих свойства поля (гладкость, характер убывания с удалением от объекта и т. д.) и требования инструкции для соответствующего метода разведочной геофизики. В некоторых инструкциях указаны пакет и его версия, в которой необходимо строить карту поля. Их нельзя применять для построения других карт. Например, топографические карты изолиний содержат разрывы (отвесная скала), а производные геофизические поля непрерывны и бесконечное число их производных. Изображение аномалии на карте зависит от рельефа местности. Поэтому на картах нередко приводится упрощенное изображение топографической ситуации.

Инструкция предписывает, при построении графиков погрешность измерений на нем не может отображаться отрезком длиной более 1 мм. Это требование служит для того, чтобы при визуальном восприятии ошибки не казались аномалией. По той же причине на картах изолиний сечение не может быть меньше 2,5 погрешностей измерений. В этом случае на картах гарантировано не появятся аномалии (замкнутые изолинии), обусловленные ошибками измерений. Отчетная карта строится в масштабе съемки. На участках, где сеть измерений не обеспечивает надежной межпрофильной корреляции, изолинии поля не строят. При построении карт трансформаций также необходимо соблюдать требования инструкции. Оформление карт

магнитного поля масштабов 1:50000 и 1:25000 и карт силы тяжести масштабов 1:50000 и 1:20000 проводится по специальным инструкциям.

При построении карт от источников, подобранных в результате решения обратной задачи, расчет поля проводят в узлах регулярной сети. Если для тех же источников вычислить поле в пунктах измерений, вид карты будет иным. Сеть расчета для прямой задачи не может быть более густой, чем сеть наблюдений (рис. 1).

Для построения карты поля создают набор данных, содержащий плановые координаты и высоту пункта измерения, а также измеренное значение или его преобразование в этом пункте. Получаем матрицу $5 \times N$.

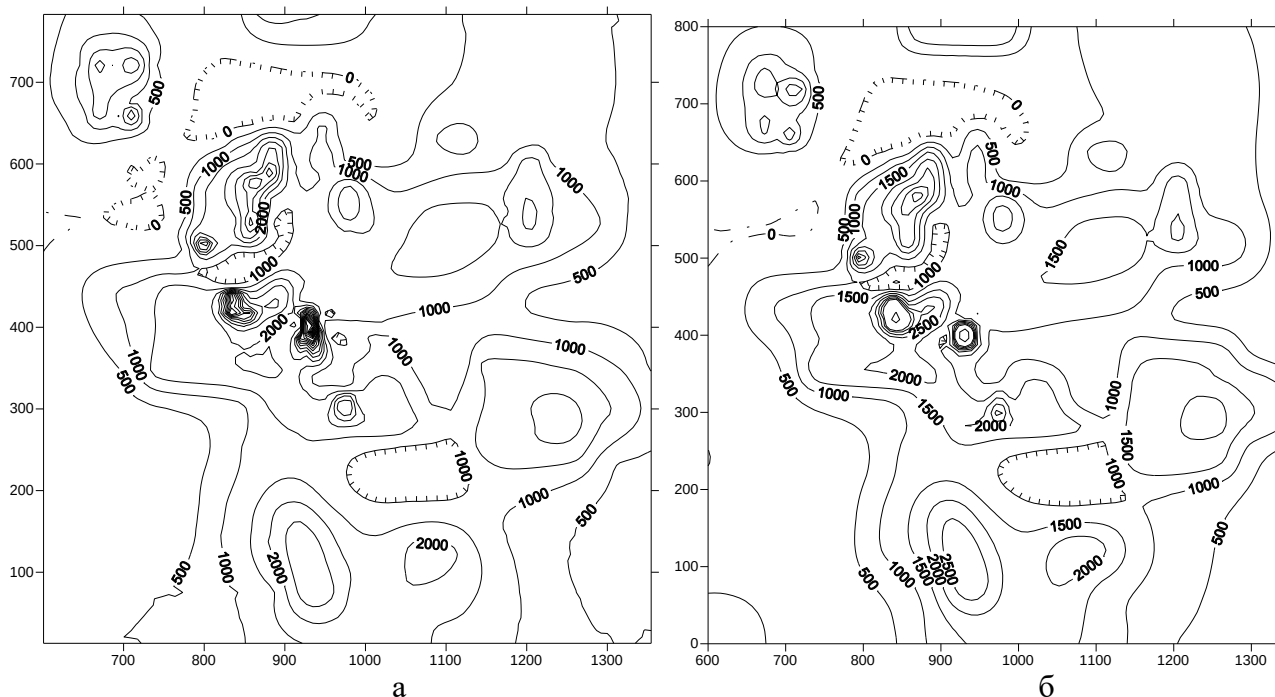


Рис. 1 Планы изодинам, построенные по результатам вычислений в точках измерения (а) и в узлах прямоугольной сети (б)

Пусть задана нерегулярная сеть измерений с координатами пунктов $\{x_i, y_i\}$ и измеренные значения в них. Определим набор из n точек соседних с точкой k . Расстояние от точки k до точки i равно:

$$d_{ik} = \sqrt{(x_{ik} - x_{ki})^2 + (y_{ik} - y_{ki})^2}.$$

Зная расстояния до набора соседних точек, найдем значение искомой функции в точке k :

$$T_k = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{T_i}{d_{ik}}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{ik}}}.$$

По этому правилу определим значения поля t в узлах регулярной сети.

Нет ничего практичнее хорошей теории. Было бы неплохо, если бы мы могли дать аналитическое описание измеренных полей, проще говоря, написать

формулу, описывающую измеренное поле. Это во многом бы облегчило дальнейшую обработку измеренных полей, например аналитическое продолжение поля.

На практике встречаются случаи, когда геофизические поля не меняются или меняются незначительно. Такие незначительные отклонения могут быть вызваны ошибками измерения или влиянием объектов небольших размеров, которые нас не интересуют. В этом случае поле с хорошим приближением можно описать выражением:

$$U(x, y) = \text{const}.$$

Нередко такую аппроксимацию принимают для региональных и фоновых полей.

Гораздо чаще для описания полей на отдельных площадях и участках применяют линейные функции. Для полей измеренных вдоль прямой линии:

$$U(x) = Ax + B.$$

Эту же функцию можно представить в виде тригонометрического ряда Фурье:

$$U(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_1^{\infty} (a_n \cos \frac{\pi nx}{L} + b_n \sin \frac{\pi nx}{L}),$$

$$\text{где } a_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L U(\xi) \cos \frac{\pi nx}{L} d\xi, \quad b_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L U(\xi) \sin \frac{\pi nx}{L} d\xi.$$

Интерполяция. Через две точки можно провести только одну прямую. Через три точки можно провести параболу, а через четыре точки – кубическую параболу. Далее с увеличением числа пунктов измерения можно повышать степень интерполирующего полинома. График кривой пройдет через все точки. Однако полученная функция не будет отражать реальное поле. Аналитическое описание должно отражать физическое содержание задачи.

Поскольку измерения проведены в дискретных пунктах, на практике используют дискретное преобразование Фурье.

Для описания полей измеренных вдоль линии можно использовать рациональные дроби:

$$U(x) = \frac{Q}{Ax + B}, \quad U(x) = \frac{Q}{Ax^2 + Bx + C}, \quad U(x, y) = \frac{Q}{Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F}.$$

В задачах восстановления функции по значениям заданным на сетке используют экспоненциальные функции:

$$U(x) = a_1 e^{\alpha_1 x} + a_2 e^{\alpha_2 x} + \dots + a_M e^{\alpha_M x},$$

где a_j, α_j искомые величины. Экспонента быстро увеличивается с ростом аргумента, поэтому ошибки измерения сильно влияют на результат.

При приближенном описании геофизических полей необходимо учитывать их специфичность. При удалении от источника электрический потенциал убывает обратно пропорционально расстоянию, сила тяжести убывает обратно пропорционально квадрату расстояния, магнитная индукция обратно пропорционально кубу расстояния. Функции приближенного описания гравитационного поля не пригодны для описания магнитного поля. При большой горизонтальной мощности объекта гравитационное поле постоянно, а магнитное поле меняется.

Для полей, измеренных на площади, и меняющихся вдоль одного какого либо направления применяют формулы:

$$U(x, y) = Ax + B, \quad U(x, y) = Ay + B, \quad U(x, y) = Ax + By + C.$$

Также часто для изолированных аномалий применяют полиномы невысоких степеней, как правило, не выше 4 степени. Например, уравнение второй степени

$$U(x, y) = Ax^2 + Bxy + Cy^2 + D$$

описывает поверхности: эллипсоиды, двуполостные гиперболоиды, однополостные гиперболоиды, конусы второго порядка, эллиптические параболоиды, гиперболические параболоиды, эллиптические цилиндры (в том числе круговые), гиперболические цилиндры, параболы цилиндры. Других поверхностей быть не может. Форма изолиний соответствует линиям, получаемым в результате сечения этих поверхностей плоскостью.

Уравнение третьего порядка имеет вид:

$$U(x, y) = Ax^3 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Hx + Wy + Q$$

или другие подобные выражения. Чаще всего они используются для описания региональных или фоновых полей. Первое уравнение описывает поверхности

На площади как правило присутствуют несколько аномалий разных размеров и интенсивности. Аномалии накладываются друг на друга, их значения известны только в дискретных пунктах наблюдения. Поле измерено на ограниченном участке. Для аналитического описания таких полей необходимо решить задачу:

- найти непрерывную на заданной площади вместе со своими производными функцию, значения которой в пунктах измерения совпадают с измеренными или отличаются от них на величину меньшую погрешности съемки.

Такую задачу называют аналитической аппроксимацией поля. Стандартное решение разложение в ряд по собственным функциям задачи.

Такое описание двумерной функции на прямоугольной площади с пунктами в узлах прямоугольной сети можно подобрать в виде двойных рядов Фурье. Статические гравитационные и магнитные поля удовлетворяют уравнению Лапласа. Решением уравнения Лапласа является потенциал $W(x, y, z) = e^{-iax - iby - cz}$,

где $c^2 = a^2 + b^2$. Линейная комбинация таких функций с произвольными коэффициентами также будет решением уравнения Лапласа. В том числе решением будет:

$$W(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{P_1} S(a, b) e^{-cz - iax - iby} da db \quad (1),$$

где $S(a, b)e^{-cz}$ - преобразование Фурье функции $W(x, y, z)$ относительно переменных x и y . Обратное преобразование Фурье

$$S(a, b) = \iint_{P_0} e^{iax + iby} W(x, y) dx dy \quad (2).$$

Предположим, что после проведения процедуры интерполяции наблюдаемых данных получаем значения поля в узлах квадратной сети с шагом Δx . Тогда измеренная гармоническая функция $W(x, y)$ – функция с ограниченным спектром, так как она известна только в узлах квадратной сети со стороной Δx . Поэтому она может быть представлена в виде функции значения которой в узлах совпадают с данными измерений:

$$W(x, y) = \sum_k \sum_n W(k\Delta x, n\Delta x) \frac{\sin \pi(x / \Delta x - k)}{\pi(x / \Delta x - k)} \frac{\sin \pi(y / \Delta x - n)}{\pi(y / \Delta x - n)}.$$

Переход к прямоугольной сети тривиален. Обобщением может служить ряд:

$$U(I, J) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} a_{nm} \cos \frac{2\pi n x_i}{L_x} \cos \frac{2\pi m y_j}{L_y} + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} b_{nm} \cos \frac{2\pi n x}{L_x} \sin \frac{2\pi m y}{L_y} + \\ + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} c_{nm} \sin \frac{2\pi n x_i}{L_x} \cos \frac{2\pi m y_j}{L_y} + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} b_{nm} \sin \frac{2\pi n x}{L_x} \sin \frac{2\pi m y}{L_y}.$$

При практических вычислениях ряд не может быть бесконечным, поэтому верхним пределом суммирования будет конечное число. После записи уравнений для всех точек измерения получим СЛАУ для определения коэффициентов ряда.

Общим недостатком всех выше перечисленных способов приближения является то, что они никак не соотносят подобранную функцию с источником поля. В.И. Ароновым предложено использовать в качестве приближающих функций поле материальной точки, Цирульский А.В. – для магнитного поля элементарным источником выбрал поле диполя. Однако и в этом случае переход от аппроксимирующей конструкции к реальным источникам очень затруднен. Е.Г. Булах предложил использовать поля горизонтальных цилиндров и уступов.

Трудности приближения полей одной функцией на участке в целом состоят в том, что значение функции в одной точке определяет поведение функции во всей области приближения. Эти недостатки вынудили обработчиков обратиться к локальному описанию. При таком описании участок делится на подобласти, на которых поле приближают простой функцией. На разных подобластях поле описывают разными функциями.

ЛЕКЦИЯ 4 ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ И КАРТ

Нет ничего практичнее хорошей теории. Было бы неплохо, если бы мы могли дать аналитическое описание измеренных полей, проще говоря, написать формулу, описывающую измеренное поле. Это во многом бы облегчило дальнейшую обработку измеренных полей, например аналитическое продолжение поля.

На практике встречаются случаи, когда геофизические поля не меняются или меняются незначительно. Такие незначительные отклонения могут быть вызваны ошибками измерения или влиянием объектов небольших размеров, которые нас не интересуют. В этом случае поле с хорошим приближением можно описать выражением:

$$U(x, y) = \text{const}.$$

Нередко такую аппроксимацию принимают для региональных и фоновых полей.

Гораздо чаще для описания полей на отдельных площадях и участках применяют линейные функции. Для полей измеренных вдоль прямой линии:

$$U(x) = Ax + B.$$

Эту же функцию можно представить в виде тригонометрического ряда Фурье:

$$U(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_1^{\infty} (a_n \cos \frac{\pi n x}{L} + b_n \sin \frac{\pi n x}{L}),$$

$$\text{где } a_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L U(\xi) \cos \frac{\pi n \xi}{L} d\xi, \quad b_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L U(\xi) \sin \frac{\pi n \xi}{L} d\xi.$$

Интерполяция. Через две точки можно провести только прямую. Через три точки можно провести параболу, а через четыре точки – кубическую параболу. Далее с увеличением числа пунктов измерения можно повышать степень интерполирующего полинома. График кривой пройдет через все точки. Однако полученная функция не будет отражать реальное поле. Аналитическое описание должно отражать физическое содержание задачи.

Поскольку измерения проведены в дискретных пунктах, на практике используют дискретное преобразование Фурье.

Для описания полей измеренных вдоль линии можно использовать рациональные дроби:

$$U(x) = \frac{Q}{Ax + B}, \quad U(x) = \frac{Q}{Ax^2 + Bx + C}, \quad U(x, y) = \frac{Q}{Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F}.$$

В задачах восстановления функции по значениям заданным на сетке используют экспоненциальные функции:

$$U(x) = a_1 e^{\alpha_1 x} + a_2 e^{\alpha_2 x} + \dots + a_M e^{\alpha_M x},$$

где a_j, α_j искомые величины. Экспонента быстро увеличивается с ростом аргумента, поэтому ошибки измерения сильно влияют на результат.

При приближенном описании геофизических полей необходимо учитывать их специфичность. При удалении от источника электрический потенциал убывает обратно пропорционально расстоянию, сила тяжести убывает обратно пропорционально квадрату расстояния, магнитная индукция обратно пропорционально кубу расстояния. Функции приближенного описания гравитационного поля не пригодны для описания магнитного поля. При большой горизонтальной мощности объекта гравитационное поле постоянно, а магнитное поле меняется.

Для полей, измеренных на площади, и меняющихся вдоль одного какого либо направления применяют формулы:

$$U(x, y) = Ax + B, \quad U(x, y) = Ay + B, \quad U(x, y) = Ax + By + C.$$

Также часто для изолированных аномалий применяют полиномы невысоких степеней, как правило, не выше 4 степени. Например, уравнение второй степени

$$U(x, y) = Ax^2 + Bxy + Cy^2 + D$$

описывает поверхности: эллипсоиды, двуполостные гиперболоиды, однополостные гиперболоиды, конусы второго порядка, эллиптические параболоиды, гиперболические параболоиды, эллиптические цилиндры (в том числе круговые), гиперболические цилиндры, параболические цилиндры. Других поверхностей быть не может. Форма изолиний соответствует линиям, получаемым в результате сечения этих поверхностей плоскостью.

Уравнение третьего порядка имеет вид:

$$U(x, y) = Ax^3 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Hx + Wy + Q$$

или другие подобные выражения. Чаще всего они используются для описания региональных или фоновых полей. Первое уравнение описывает поверхности

На площади как правило присутствуют несколько аномалий разных размеров и интенсивности. Аномалии накладываются друг на друга, их значения известны только в дискретных пунктах наблюдения. Поле измерено на ограниченном участке. Для аналитического описания таких полей необходимо решить задачу: найти непрерывную вместе со своими производными на заданной площади функцию, значения которой в пунктах измерения совпадают с измеренными или отличаются от них на величину меньшую погрешности съемки. Такую задачу называют аналитической аппроксимацией поля. Стандартное решение разложение в ряд по собственным функциям задачи.

Такое описание двумерной функции на прямоугольной площади с пунктами в узлах прямоугольной сети можно подобрать в виде двойных рядов Фурье.

Статические гравитационные и магнитные поля удовлетворяют уравнению Лапласа. Решением уравнения Лапласа является потенциал $W(x, y, z) = e^{-iax-iby-cz}$, где $c^2 = a^2 + b^2$. Линейная комбинация таких функций с произвольными коэффициентами также будет решением уравнения Лапласа. В том числе решением будет:

$$W(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{P_1} S(a, b) e^{-cz-iax-iby} da db \quad (1),$$

где $S(a, b)e^{-cz}$ - преобразование Фурье функции $W(x, y, z)$ относительно переменных x и y . Обратное преобразование Фурье

$$S(a, b) = \iint_{P_0} e^{iax+iby} W(x, y) dx dy \quad (2).$$

Предположим, что после проведения процедуры интерполяции наблюдаемых данных получаем значения поля в узлах квадратной сети с шагом Δx . Тогда измеренная гармоническая функция $W(x, y)$ – функция с ограниченным спектром, так как она известна только в узлах квадратной сети со стороной Δx . Поэтому она может быть представлена в виде функции значения которой в узлах совпадают с данными измерений:

$$W(x, y) = \sum_k \sum_n W(k\Delta x, n\Delta x) \frac{\sin \pi(x / \Delta x - k)}{\pi(x / \Delta x - k)} \frac{\sin \pi(y / \Delta x - n)}{\pi(y / \Delta x - n)}.$$

Переход к прямоугольной сети тривиален. Обобщением может служить ряд:

$$U(I, J) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} a_{nm} \cos \frac{2\pi x_i}{L_x} \cos \frac{2\pi y_j}{L_y} + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} b_{nm} \cos \frac{2\pi x}{L_x} \sin \frac{2\pi y}{L_y} + \\ + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} c_{nm} \sin \frac{2\pi x_i}{L_x} \cos \frac{2\pi y_j}{L_y} + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} b_{nm} \sin \frac{2\pi x}{L_x} \sin \frac{2\pi y}{L_y}.$$

При практических вычислениях ряд не может быть бесконечным, поэтому верхним пределом суммирования будет конечное число. После записи уравнений для всех точек измерения получим СЛАУ для определения коэффициентов ряда.

Общим недостатком всех выше перечисленных способов приближения является то, что они никак не соотносят подобранную функцию с источником поля. В.И. Ароновым предложено использовать в качестве приближающих функций поле материальной точки, Цирульский А.В. - поле диполя. Однако и в этом случае переход от аппроксимирующей конструкции к реальным источникам очень затруднен. Е.Г. Булах предложил использовать поля горизонтальных цилиндров и уступов.

Трудности приближения полей одной функцией на участке в целом состоят в том, что значение функции в одной точке определяет поведение функции во всей области приближения. Эти недостатки вынудили обработчиков обратиться к локальному описанию. При таком описании участок делится на подобласти,

на которых поле приближают простой функцией. На разных подобластях поле описывают разными функциями.

Широкое применение в задачах восстановления функций нашли сплайны. Сплайны – это функции, склеенные из кусков некоторого заранее определенного набора функций. Самый распространенный пример сплайна – кусочно-линейный - ломанная. Параболический сплайн имеет на каждом звене описание в виде полинома второй степени $Ax^2 + Bx + Cy^2 + D$. На 3 узлах строится парабола, далее проводится гладкое продолжение. Недостатки параболического сплайна: осцилляции, не приближает вторую производную, неоднозначность построения.

Наиболее широкое применение в задачах приближения нашли кубические сплайны, тригонометрические сплайны, параметрические сплайны.

Определение. Интерполяционным кубическим сплайном $S(x)$ называют дважды непрерывно-дифференцируемые, которые удовлетворяют в узлах условиям интерполяции и на каждом отрезке совпадает с некоторым полиномом третьего порядка:

$$S(x) = A_i x^3 + B_i x^2 + C_i x + D_i.$$

Таким образом, кубический сплайн на n отрезках определена $4n$ параметрами. Для их определения используют $2n$ условия интерполяции, $n-1$ -склейка первой производной, $n-1$ – склейка второй производной. Два необходимо добавить: либо $S'(x_0) = 0$, $S'(x_N) = 0$, либо $S''(x_0) = 0$, $S''(x_N) = 0$. Введем обозначение $M_i = S''(x_i)$, длину расстояния между узлами $h_i = x_i - x_{i-1}$.

Выражение второй производной примет вид:

$$M(x) = -M_{i-1} \frac{(x_i - x)}{h_i} + M_i \frac{(x_i - x)}{h_i}$$

Первая производная примет вид:

$$P'_i(x) = -M_{i-1} \frac{(x_i - x)^2}{2h_i} + M_i \frac{(x_i - x)^2}{2h_i} + C_i.$$

Отсюда интерполяционный полином примет вид:

$$P_i(x) = -M_{i-1} \frac{(x_i - x)^3}{6h_i} + M_i \frac{(x_i - x)^3}{6h_i} + C_i x + D_i.$$

Представим сумму двух последних слагаемых в виде:

$$C_i x + D_i = A_i (x_i - x) + B_i (x - x_{i-1}), \text{ что означает, что } C_i = A_i + B_i \text{ и } D_i = A_i x_i - B_i x_{i-1}$$

Интерполяционный полином примет вид:

$$P_i(x) = -M_{i-1} \frac{(x_i - x)^3}{6h_i} + M_i \frac{(x_i - x)^3}{6h_i} + A_i (x_i - x) + D_i (x - x_{i-1}).$$

$$\text{Тогда } P_i(x_{i-1}) = M_{i-1} \frac{h_i^2}{6} + A_i h_i = y_{i-1}. \Rightarrow A_i = \frac{y_{i-1}}{h_i} - M_{i-1} \frac{h_i}{6}.$$

$$P_i(x_i) = M_i \frac{h^2}{6} + B_i h = y_i, \Rightarrow B_i = \frac{y_i}{h} - M_i \frac{h_i}{6}$$

$$P'_i(x) = -M_{i-1} \frac{(x_i - x)^2}{2h_i} + M_i \frac{(x_i - x)^2}{2h_i} + \frac{y_i - y_{i-1}}{h} - \frac{h}{6}(M_i - M_{i-1})$$

$$P'_i(x_i) = M_i \frac{h_i}{2} + \frac{y_i - y_{i-1}}{h_i} - \frac{h}{6} M_i + \frac{h_i}{6} M_{i-1}, \quad P'_i(x_i) = M_i \frac{h_{i-1}}{2} + \frac{y_{i+1} - y_i}{h_{i+1}} - \frac{h_{i+1}}{6} (M_{i+1} - M_i).$$

Получили СЛАУ вида

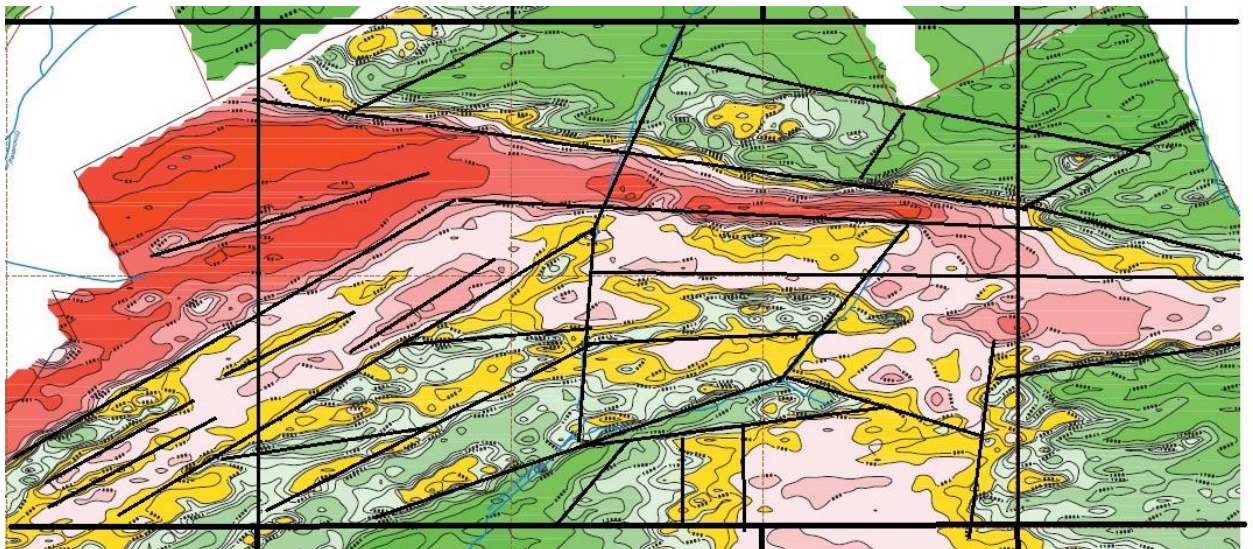
$$\frac{h_i}{6} M_{i-1} \frac{h_i + h_{i+1}}{3} M_i + \frac{h_{i+1}}{6} = -\frac{y_{i+1} - y_i}{h_{i+1}} - \frac{y_i - y_{i-1}}{h_i}.$$

Добавляем условия $M_0 = 0$ и $M_n = 0$ получаем трехдиагональную матрицу:

$$\begin{array}{cccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{h_1}{6} & \frac{h_1 + h_2}{3} & \frac{h_2}{6} & 0 \\ 0 & \frac{h_2}{6} & \frac{h_2 + h_3}{3} & \frac{h_3}{6} \\ 0 & 0 & \frac{h_3}{6} & \frac{h_3 + h_4}{3} \end{array}.$$

Это матрица с диагональным преобладанием. Решение таких СЛАУ устойчиво.

Полученное аналитическое описание результатов измерений позволяет восстановить значение поля или положение поверхности в любой точке, с высокой точностью и малыми вычислительными затратами проводить обработку данных. Например, операции дифференцирования и интегрирования проводятся по правилам для аналитических функций. Для поверхностей сеть разбиения может быть треугольной, прямоугольной, квадратной.



ЛЕКЦИЯ 5 Построение разрезов

При изучении осадочных разрезов мы замечаем, что появление выше по разрезу некоторых пород зависит от характера предшествующего разреза. Процессы, в которых наблюдают влияние предшествующих событий на последующие, в математике называют цепями Маркова. В цепях Маркова вероятность перехода из одного состояния в другое зависит от предшествующего состояния. В цепях Маркова вероятности перехода считают постоянными. Если наблюдается зависимость только от предшествующего состояния, цепь Маркова называют цепью первого порядка. Возможно построение цепей более высокого порядка.

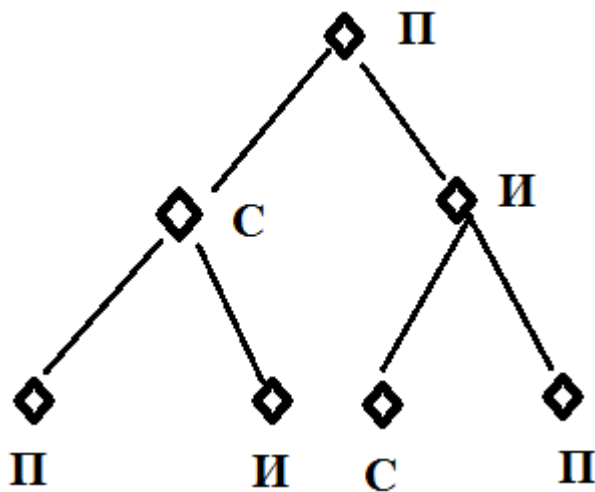
Вероятности перехода принято представлять в виде матриц:

Песчаник	0	0,5	0,5
Сланец	0	0,3	0,7
Известняк	0,5	0,5	0

При подсчете вероятностей берут несколько интервалов фиксированной длины.

В таблице указаны условные вероятности. Точнее в таблице статистические оценки этих вероятностей - частоты. Матрица переходных вероятностей полезный метод анализа и способ описания. Такие описания широко используются для моделирования литологической колонки.

Другой способ описания стратиграфической колонки – построение деревьев.



Вероятность появления литотипа через этап рассчитывается умножением вероятностей (частот) вдоль пути по дереву. Для учета мощности слоев в разрезе вводят скорости перехода.

При моделировании двухмерных разрезов с помощью цепей Маркова можно моделировать соответствующие геофизические поля.

При оценке запасов углеводородов необходимо описывать стратиграфические подразделения. Результаты исследования стратиграфических показывает, что изменчивость свойств горных пород в зависимости от глубины недостаточно точно для практических задач описывается случайными процессами. Необходимо эту изменчивость аппроксимировать суммой случайной и детерминированной составляющих. Характер этой изменчивости влечет такую же изменчивость геофизических параметров: физических свойств и полей.

Отображение структуры разреза вскрытого одной скважиной на разрез другой скважины сложнейшая задача. При этом, может вдоль скважины вскрыт весь разрез или часть разреза. Изначально эту задачу решали на основе корреляционного анализа кривых ГИС, в частности путем вычисления функций взаимной корреляции. Существенное влияние на решение задачи оказывает шаг измерений. Задача значительно усложняется тем, что отражение вещественного состава на свойства косвенное. Малое изменение вещественного состава часто вызывает значительное изменение свойств и наоборот. Сложное отражение в полях имеет мощность слоев и размер исследуемой площади..

Вайнберг предложил применять для анализа флиша марковские цепи. Другие специалисты применяют прослеживание реперов в разрезах скважин. Определяющую роль будет играть выбор опорного разреза (реперов). Для геофизических методов необходимо оценить информативность геофизических признаков. Волков А.М. рассмотрел информативность 14 методов исследования скважин. Он показал, что 2 признака практически полностью исчерпывают возможности каротажа.

Цепи Маркова.

ЛЕКЦИЯ 9 НЕФТЕГАЗОНОСНОСТЬ

При вычислении прогнозных ресурсов оценивают перспективы крупного региона. При вычислении оценки учитывают сходство с районами с установленной нефтегазоносностью, площадь территории, вещественный состав осадков, их вертикальную мощность, дислоцированность осадков. Одна из предлагаемых оценок:

$$\lg Q = 1.613 \lg W + 2.813,$$

где Q – общие ресурсы, W – средняя объемная скорость осадконакопления (тыс. км³/млн. лет).

Для подсчета запасов нефти в первом приближении необходимо вычислить:

$$Q = \iiint_V \alpha(x, y, z) m(x, y, z) \sigma(x, y, z) \eta(x, y, z) dV,$$

где переменные в порядке следования: коэффициент нефтенасыщенности, коэффициент открытой пористости, плотность нефти, коэффициент нефтеотдачи. Известно, что плотность нефти увеличивается при приближении к границе залежи, в том же направлении плотность газа уменьшается.

Для оценки прогнозных ресурсов используют уравнения регрессии:

$$\ln Q = \ln S + 0.1 \ln D + 0.61 \ln M - 0.5 \ln \tau + 2 \ln T - 0.5 \ln C + 2 \ln \vartheta + 2 \ln \theta,$$

где переменные в порядке следования в уравнении: прогнозные ресурсы, площадь нефтесбора, мощность резервуара, доля сапропелевой составляющей, температура пород, время погружения резервуара на глубину более 300 м, содержание органического вещества, коэффициент структурного экранирования, коэффициент литологического экранирования.

Другое уравнение:

$$\ln Q = \alpha_1 \ln KC + \alpha_2 \ln B + \alpha_3 \ln \Pi + \alpha_4 \ln S + \alpha_5 \ln \Gamma + \alpha_6 y + \alpha_7 \ln r + \alpha_8 \ln \frac{A+a}{A},$$

переменные в порядке следования в уравнении: КС катагенное преобразование РОВ, В - отношение растворенных в воде органических кислот к содержанию гидрокарбонат-иона, $\Pi = \frac{h-l}{h}$, где h – общая мощность пласта в пределах ловушки, l – суммарная мощность глинистых прослоев в пласте, S – сорбционные свойства пласта, Γ – нефтесборная площадь, y – мощность гидродинамически связанной толщи, r – частота возникновения условий для выделения углеводородов, A – амплитуда наиболее резкого регионального поднятия, a – амплитуда ловушки.

Набор признаков в уравнении регрессии для каждого района специфичен. Коэффициенты при признаках в уравнении регрессии для разных регионов разные.

Результат прогноза зависит от исполнителя работ и стадии геологоразведочной стадии.

При решении задач прогноза необходимо учитывать дисперсию признаков.

Основной результат геологоразведочных работ – промышленные запасы. Объем резервуара насыщенного нефтью вычисляют как произведение площади залежи на среднюю эффективную нефтенасыщенную мощность. Если результат умножить на пористость получим объем порового пространства. Если его умножить на коэффициент нефтенасыщенности получим объем нефти. Умножая плотности нефти на объем получим вес. Эту величину необходимо умножить на коэффициенты нефтеотдачи и коэффициент усадки – получим балансовые запасы. Для получения промышленных запасов необходимо балансовые запасы умножить на коэффициент извлечения.

Последовательность оценки запасов:

1. Определяют проницаемые интервалы в пласте. Строят карту эффективной мощности

2. Строят структурные карты кровли и подошвы пласта.
3. Определяют положение водно-нефтяного контакта.
4. Строят карту эффективной нефтенасыщенной мощности.
5. Находят объем нефтенасыщенных пород
6. Определение извлекаемых запасов.

В формуле подсчета запасов:

$$Q = Shm\eta\chi K_{но} K_{yc} .$$

используются средние постоянные значения параметров. Нередко изменчивость свойств не позволяет использовать это выражение для подсчета запасов, поскольку ошибки могут достигать десятков процентов.

ЛЕКЦИЯ 10 ПОДСЧЕТ ЗАПАСОВ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Рудное тело понятие не геологическое, а экономическое. Граница тела проводится, ограничивая объем, добыча в котором приносит прибыль или условно рентабельна (экономически выгодна для месторождения в целом или группы месторождений в целом). С развитием технологий добычи отвалы старых месторождений переходят в категорию месторождений. Полное представление о месторождении мы получаем по окончании разработки.

Обычно рудные тела разбивают на отдельные блоки – тела достаточно простой геометрической формы с некоторым постоянным содержанием полезного компонента – железа, окиси хрома и т. д. На рис. показано содержание серебра вдоль штольни на одном из месторождений. Видно, что содержание серебра меняется нелинейно, быстрее, чем линейная зависимость, дисперсия содержаний с увеличением содержаний увеличивается. При подсчете запасов такие зависимости сглаживают в скользящем окне. Формула расчета:

$$C(0) = \sum_1^T w_i C_i .$$

Выбор весов проводится на основе практического опыта, например, обратно пропорционально расстоянию от оцениваемой точки или линейной зависимостью.

Крайгинг – один из методов скользящего среднего. В нем обоснованно выбирают размер окна и весовые коэффициенты для узлов. Метод оценки пространственно распределенных величин и погрешности этой оценки. Успешно применялся для подсчета запасов серебра. Назовем переменную величину регионализированной, если она непрерывно меняется, но неизвестно ее аналитическое описание.

Пусть в нерегулярной сети измерений получены значения параметра. Значение в некоторой точке связано со значениями в соседних точках. Степень влияния зависит от направления и расстояния. Степень зависимости в каком либо направлении (по профилю) можно определить ковариацией $K(\Delta j)$. Для той же точки можно определить полудисперсию:

$$\chi = \frac{1}{2} \sum_1^N (y_{i+1} - y_i)^2.$$

Полудисперсия и ковариация связаны соотношением $\chi(\Delta j) = K(0) - K(\Delta j)$. С уменьшением расстояния до бесконечно малого определяются практически одними и теми же точками, т.е. при малых расстояниях они почти одинаковы, при увеличении расстояния полудисперсия асимптотически стремится к предельному значению $-K(0)$. Расстояние на котором эта величина достигается (почти) называют рангом. Ранг – расстояние на котором значения параметра можно считать независимыми. Если между точками расстояние больше ранга, в центре интервала находятся точки, значения параметра в которых никак не связано со значениями на концах. Оценку запасов проводить нельзя.

График полудисперсии методом наименьших квадратов аппроксимируют функциями

$$\chi(h) = 3\alpha \lg |h|, \quad \chi(h) = \alpha |h|.$$

Выбор правильной модели этой зависимости самый главный этап обработки. График этой зависимости называют вариограммой. Вариограммы рассчитывают как минимум по трем направлениям, чтобы убедиться в том, что распределение переменной изотропное. На практике чаще всего данные считают изотропными и стационарными.

Для точечного крайгинга необходимо построить уравнение скользящего среднего, а следовательно необходимо определить весовые коэффициенты в этом уравнении. Составляют СЛАУ для определения весовых коэффициентов.

Крайгинг позволяет получить более надежные оценки содержаний, чем полиномиальный тренд-анализ. Кроме того крайгинг позволяет дать оценку вероятной ошибки

При вычислении прогнозных ресурсов углеводородов оценивают перспективы крупного региона. При вычислении оценки учитывают сходство с районами с установленной нефтегазоносностью, площадь территории, вещественный состав осадков, их вертикальную мощность, дислоцированность осадков. Одна из предлагаемых оценок:

$$\lg Q = 1.613 \lg W + 2.813,$$

где Q – общие ресурсы, W – средняя объемная скорость осадконакопления (тыс. км³/млн. лет).

Для подсчета запасов нефти в первом приближении необходимо вычислить:

$$Q = \iiint_V \alpha(x, y, z) m(x, y, z) \sigma(x, y, z) \eta(x, y, z) dV,$$

где переменные в порядке следования: коэффициент нефтенасыщенности, коэффициент открытой пористости, плотность нефти, коэффициент нефтеотдачи. Известно, что плотность нефти увеличивается при приближении к границе залежи, в том же направлении плотность газа уменьшается.

Для оценки прогнозных ресурсов используют уравнения регрессии:

$$\ln Q = \ln S + 0.1 \ln D + 0.61 \ln M - 0.5 \ln \tau + 2 \ln T - 0.5 \ln C + 2 \ln \vartheta + 2 \ln \theta,$$

где переменные в порядке следования в уравнении: прогнозные ресурсы, площадь нефтесбора, мощность резервуара, доля сапропелевой составляющей, температура пород, время погружения резервуара на глубину более 300 м, содержание органического вещества, коэффициент структурного экранирования, коэффициент литологического экранирования.

Другое уравнение:

$$\ln Q = \alpha_1 \ln KC + \alpha_2 \ln B + \alpha_3 \ln \Pi + \alpha_4 \ln S + \alpha_5 \ln \Gamma + \alpha_6 y + \alpha_7 \ln r + \alpha_8 \ln \frac{A+a}{A},$$

переменные в порядке следования в уравнении: КС катагенное преобразование РОВ, В - отношение растворенных в воде органических кислот к содержанию гидрокарбонат-иона, $\Pi = \frac{h-l}{h}$, где h – общая мощность пласта в пределах ловушки, l – суммарная мощность глинистых прослоев в пласте, S – сорбционные свойства пласта, Γ – нефтесборная площадь, y – мощность гидродинамически связанной толщи, r – частота возникновения условий для выделения углеводородов, A – амплитуда наиболее резкого регионального поднятия, a – амплитуда ловушки.

Набор признаков в уравнении регрессии для каждого района специфичен. Коэффициенты при признаках в уравнении регрессии для разных регионов разные.

Результат прогноза зависит от исполнителя работ и стадии геологоразведочной стадии.

При решении задач прогноза необходимо учитывать дисперсию признаков.

Основной результат геологоразведочных работ – промышленные запасы. Объем резервуара насыщенного нефтью вычисляют как произведение площади залежи на среднюю эффективную нефтенасыщенную мощность. Если результат умножить на пористость получим объем порового пространства. Если его умножить на коэффициент нефтенасыщенности получим объем нефти. Умножая плотности нефти на объем получим вес. Эту величину необходимо умножить на коэффициенты нефтеотдачи и коэффициент усадки – получим балансовые запасы. Для получения промышленных запасов необходимо балансовые запасы умножить на коэффициент извлечения.

Последовательность оценки запасов:

1. Определяют проницаемые интервалы в пласте. Строят карту эффективной мощности
2. Строят структурные карты кровли и подошвы пласта.
3. Определяют положение водно-нефтяного контакта.
4. Строят карту эффективной нефтенасыщенной мощности.
5. Находят объем нефтенасыщенных пород
6. Определение извлекаемых запасов.

В формуле подсчета запасов:

$$Q = Shm\eta\chi K_{no} K_{yc}.$$

используются средние постоянные значения параметров. Нередко изменчивость свойств не позволяет использовать это выражение для подсчета запасов, поскольку ошибки могут достигать десятков процентов.

Подсчет запасов золота

Подсчет запасов угля.

ЛЕКЦИЯ 13 ПРИНЦИПЫ ИЗУЧЕНИЯ НЕДР И ЭТАПЫ АНАЛИЗА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Практикой выработаны принципы изучения недр:

1 Принцип последовательных приближений. Изучение геологического строения осуществляется последовательно в разных масштабах от мелкого к крупному, т. е. от общего к частному. Этот принцип обеспечивает оптимальность финансовых затрат, временных затрат и информационной содержательности получаемых результатов. Принцип последовательных приближений означает, что изучение проводится в последовательности: провинции, зоны, районы, структуры, участки. Министерством природных ресурсов Российской Федерации установлены стадии геологоразведочных работ:

1 стадия. Региональное геологическое изучение недр и прогнозирование полезных ископаемых (масштаб работ 1:500000 и мельче).

2 стадия. Поисковые работы. Цель работ - выявление проявлений полезных ископаемых.

3 стадия. Оценочные работы. Цель работ – отбраковка проявлений полезных ископаемых, не представляющих промышленной ценности.

4. Разведка месторождения. Цель работ – изучение месторождения для составления ТЭО освоения месторождения.

5. Эксплуатационная разведка.

2 Принцип аналогии – один из самых главных и давно применяемых принципов. Он предполагает сравнение с эталонами, например со

стратотипами. Для оценки перспектив площади проводят сравнение с хорошо изученными территориями со сходным геологическим строением.

3 Принцип выборочной детализации – проведение работ на выделенных участках с большей детальностью. На таких участках в больших объемах проводится бурение, изучение образцов лабораторными методами.

4 Принцип равной достоверности. На всей площади степень изученности должна быть одинаковой.

5 Принцип полноты исследования. Территорию необходимо всесторонне изучать всеми доступными методами. Например, изучить изменчивость физических свойств, ее связь с изменчивостью вещественного состава пород.

6 Принцип разумных затрат – оптимизация времени и финансовых затрат.

В разных методах изучения недр эти принципы приобретают свои особенности. Например, В.Н. Страхов сформулировал принципы при изучении недр потенциальными геофизическими методами, которые, в основном, справедливы и для других геофизических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых.

Предварительная схема анализа геофизических полей указана в проекте работ. Несмотря на то, что геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых все более приближаются к стандартным технологиям, выполняемым в соответствии с установленным стандартом и инструкциями, они в значительной степени имеют исследовательский характер. Поэтому после проведения съемки уточняют последовательность анализа физических полей и перечень процедур и алгоритмов обработки и истолкования.

Анализ геофизических полей проводится в следующей последовательности:

1. Изучение работ предшественников. Анализ региональной геологической обстановки и всех имеющихся региональных геофизических полей. Постановка задач геологического истолкования геофизических полей. Определение сотрудников, своих и привлеченных из других организаций, способов и средств (программных пакетов), необходимых для истолкования геофизических материалов. Решение прямых задач и имитационное моделирование.

2. Обработка и анализ результатов измерений физических свойств горных пород. Определение законов распределения и величин эффективных параметров. Выявление корреляционных связей и зависимостей между свойствами. Построение уравнений регрессии вида:

$$\chi = A\sigma + B, \rho = C\chi + D.$$

3. Выделение структурно-вещественных комплексов (СВК) – выделение групп горных пород, которые можно определить по выбранному комплексу геофизических методов.

4. Качественная интерпретация. Предварительное определение геометрических и физических параметров СВК, с небольшим объемом вычислений, без решения объемных обратных задач. Составление схем геофизических полей

5. Количественная интерпретация для каждого метода – решение обратных задач для каждого физического поля с применением методов регуляризации. Создание однометодных физико-геологических объемных моделей. Увязка результатов истолкования данных полевых и скважинных измерений.

6. Комплексная интерпретация – согласование решений обратных задач. Выявление корреляционных связей между разными полями, между полями и геологическими границами. Результативные материалы содержат все объекты, выделенные по разным полям.

7. Геологическое истолкование – наделение геологическим содержанием выделенных объектов, результаты геофизических работ формулируются в геологических терминах: гранит, дайка, песчаник, пласт, падение, простирание и т. д. Составление геолого-геофизических разрезов и трехмерных моделей.

8. Разработка рекомендаций для дальнейших исследований. Выделение перспективных участков для изучения в крупном масштабе, перечень рекомендуемых методов изучения, прогнозные ресурсы.

Существует несколько **методообразующих идей** на основе которых разрабатывают методы истолкования:

Идея аналитической аппроксимации – приближенное описание реальных объектов. При обработке интегрирование заменяют суммированием, производные конечно-разностными схемами, широко применяются итерационные вычислительные схемы. Геологическая среда сложная, поэтому ее описывают простыми математическими конструкциями. Метод подбора – аналитическая аппроксимация.

Идея алгебраизации – описание задачи численными параметрами, сведение поставленных задач к решению алгебраических задач. Описание геологических поверхностей уравнениями. Определение параметров свести к решению уравнений.

Идея критериальности – решение задач и достижение цели должно оцениваться критериями, сформулированными на этапе планирования геологоразведочных работ. ДОЛЖЕН БЫТЬ ЗАДАН КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ ВЫПОЛНЕННЫХ РАБОТ.

Длительное время основным критерием был критерий наименьших квадратов. В последнее время рассматриваются другие критерии принятия решений:

1. В условиях неопределенности
 - а) критерий равнозначных состояний Лапласа основан на построенной функции потерь
 - б) максимина Вальда – поиск минимальных наибольших потерь (природа ведет себя как враг)
 - в) минимакса сожалений – потери в результате упущенных возможностей на основе построения функции сожаления
 - г) критерий пессимизма-оптимизма Гурвица
выбор либо все плохо либо все отлично
2. В условиях риска
 - а) критерий максимума ожидаемой полезности
 - б) Критерий Ходжи – Лемана строится функция полезности
 - в) критерий наиболее вероятного состояния
 - г) критерий минимума ожидаемых сожалений

Идея согласования множества решений – усреднение характеристик по множеству решений, не противоречащих известным данным. Комплексное геологическое истолкование данных нескольких методов Один из подходов – обезразмеривание полей разной природы, их нормирование и переход к анализу произведений и сумм относительных величин. Другой подход – вычисление производных и интегралов (псевдополей).

Идея распознавания образов – процедуры принятия решений, суть которых надделение полученного набора параметров геологическим содержанием.

Задачу распознавания образов по геофизическим данным можно сформулировать следующим образом:

1. С помощью имитационного моделирования создать физико-геологические модели возможных типов месторождений.
2. Разбить изучаемую площадь на участки, отличающиеся по геофизическим данным.
3. Выделение признаков, которые свидетельствуют о возможном рудном процессе
4. Отнесение участков к группе заслуживающих дальнейшего изучения и бесперспективных.
5. Геологическое истолкование с помощью процедур искусственного интеллекта, Окончательное решение принимается естественным интеллектом, основанным на квалификации, интеллекте, эрудиции и интуиции интерпретатора (информация мать интуиции).

Существует два подхода: с использованием эталона искоемых объектов – образа геологического объекта в многомерном пространстве. Для создания надежного эталона необходимо иметь сведения о десятках месторождений, что крайне редко возможно. Безэталонная классификация – задача естественного расслоения многомерных данных. Выделенные классы могут не иметь геологического содержания.

Идея гарантированного подхода.

Опыт истолкования геолого-геофизических данных позволил выделить принципы анализа: выделение областей заведомо не содержащих источники и областей гарантировано содержащих искомые источники (геологические тела).

ЛЕКЦИЯ 11 ПРИНЦИПЫ АНАЛИЗА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

1.Целеноправленности – любые геологоразведочные работы проводятся для достижения цели поставленной в проекте работ, например, поиска мелких по запасам месторождений угля до глубины 500 м. Сеть измерений, алгоритмы обработки, граф истолкования геолого-геофизических данных – должны обеспечить достижение цели.

Цель работ определена геологическим заданием, она указана на обложке проекта работ: Проект на проведение геофизических работ масштаба 1:10000 в Коркинском районе Челябинской области в 2018 г. с целью поисков месторождений угля. Анализ геофизических данных направлен на достижение поставленной цели.

Для достижения цели необходимо поставить задачи каждому геофизическому методу комплекса геологоразведочных работ, решение которых приведет к успеху. Например, провести электроразведку, ВСП, РВП с целью выделения зон метасоматоза.

2. Системности – анализ проводится с учетом всех связей, всех геолого-геофизических данных, а не только того поля, которое изучают. Принцип системности основан на двух базовых положениях:

1 Всеобщей связи – система представляет собой набор элементов взаимодействующих друг с другом. Особенно ярко это проявляется на месторождениях высокомагнитных руд.

2 Иерархии – упорядоченности объектов, находящихся на территории, в некоторой последовательности, например, по перспективности для дальнейшего изучения и масштабу проводимых работ.

Построение системной модели геологической среды проводят по:

- противоречивым данным, поскольку геофизические поля обусловлены различными физическими свойствами,

- отрывочным данным, на различных участках в нашем распоряжении не все поля, на некоторых участках съемку провести невозможно (болото, обрыв, техногенные помехи),

- при отсутствии некоторых данных, (не было проведено измерение остаточной намагниченности)

- несогласованным данным, измерения чаще всего по разным сетям пунктов,

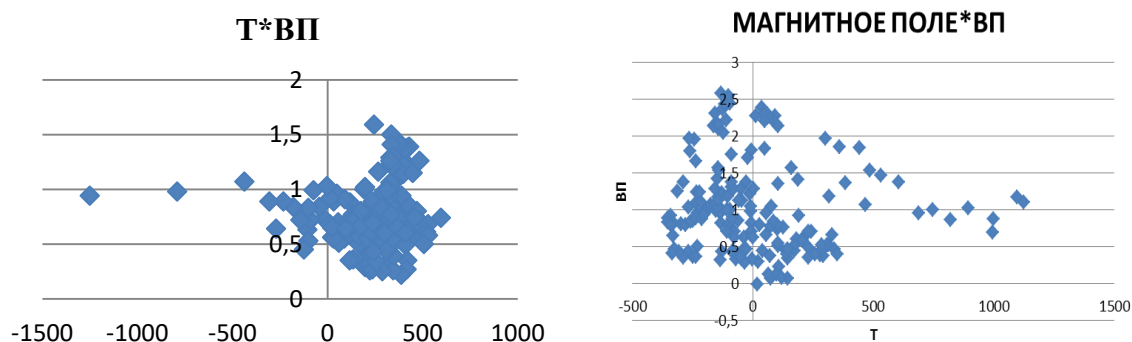
- неопределенности, свойства горных пород на площади меняются в некотором диапазоне,

- при невозможности формализации некоторых данных (окраска породы, цвет черты, текстура, структура породы, открытая пористость, закрытая пористость, и т. д.).

- геологическая среда представляет собой набор многокомпонентных сложно построенных объектов, связанных множеством взаимосвязей, причем некоторые взаимосвязи не всегда можно описать количественными соотношениями.

Выявление этих связей часть процесса истолкования. Геологическая среда не механический набор элементов, а единый объект, состоящий из взаимодействующих элементов, что приводит к новому качеству. Это свойство наиболее ярко проявляется в геофизических полях. Изменение одного элемента модели влечет изменение всей модели. При поисках золота при приближении к рудной зоне, часто устанавливают резкое увеличение дисперсии полей, противоположное изменение кажущегося сопротивления, поляризуемости, магнитного поля (рис. 11.1).

Использования корреляционных связей – при проведении комплексной интерпретации необходимо учитывать связи между физическими параметрами, которые отражают вещественный состав геологических объектов. На основе выявленной корреляционной связи плотности и скорости упругих волн в горных породах по данным сейсморазведки создают объемную плотностную модель, для которой решают обратную задачу гравиразведки.



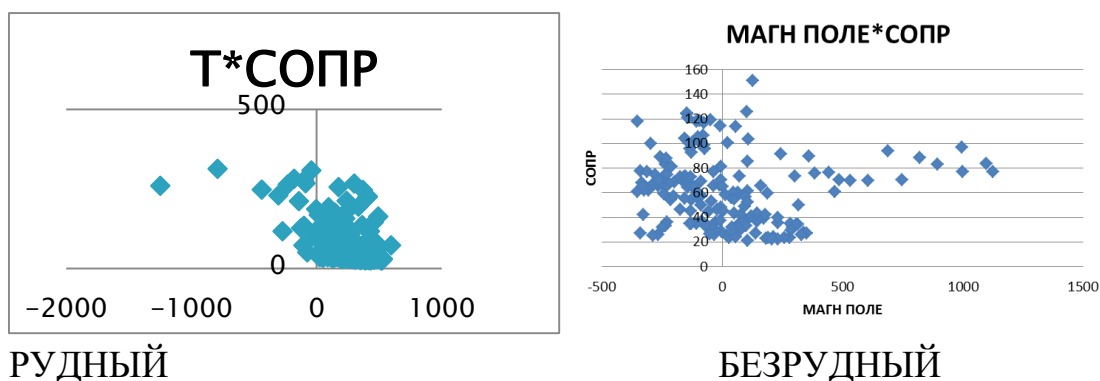


Рис.11.1 Поле корреляции рудных и безрудных участков

Многостадийности – одну и ту же территорию изучают в соответствии со стадиями геологоразведочных работ. Работы проводят в последовательности соответствующей стадиям геологического изучения и масштабам: региональной - 1:100000, 1:50000, поисковой - 1:10000 и так далее. Сначала изучают региональное поле, потом локальное. Изучение площади завершают детальными работами и измерениями на интерпретационных профилях с меньшим шагом наблюдений и повышенной точностью на перспективных участках. Геологические работы на одной площади направлены на решение разных геологических задач: геологическое картирование, поиски и т.д. Сначала изучают структуры, затем СВК, затем поиск МПИ, затем изучение отдельных рудных тел и залежей.

3. Определяющей роли интерпретационного процесса – весь процесс изучения построен под имеющиеся технологии истолкования. Прежде чем проводить полевые работы необходимо определить, какие процедуры обработки и в какой последовательности будут применены к результатам измерений и полученным данным. Процесс истолкования полезно изображать в виде сетевого графика (графа) или диаграммы Грамма. Процесс анализа результатов и перечень процедур обработки предусматривается проектом, их корректируют в ходе выполнения работ.

Предварительная схема анализа геофизических полей указана в проекте работ. На основе схемы составляется смета, т. е. выделяют деньги, в том числе на заработную плату. Несмотря на то, что геологоразведочные работы все более приближаются к стандартным технологиям, выполняемым в соответствии с установленным стандартом, они в значительной степени имеют исследовательский характер. Поэтому после проведения съемки определяют последовательность анализа физических полей и корректируют граф обработки (принципы 7 и 8).

4.Формализации – поставленные задачи необходимо перевести на язык математики. Это идеализация, следует помнить, что геологическая задача не

тождественна математической задаче. Геологические границы аппроксимируют и описывают линейными функциями, что конечно является приближением и идеализацией реальной геологической обстановки.

Геологические термины и понятия нельзя выразить в строгой математической форме, как впрочем биологические, исторические и другие. В ином случае осталась бы одна наука – математика. Название горной породы изначально допускает широкий диапазон изменения минерального состава, что находит отражение в физических свойствах и полях и приводит к необходимости описания среды усредненными характеристиками. Возможно и обратное – существенное изменение физических свойств с геологической точки зрения ничего не меняет. Например, небольшое изменение содержания магнетита в горной породе существенно меняет интенсивность магнитного поля.

В методе подбора стремятся к близости измеренного поля и теоретического. До появления ЭВМ степень близости (качество подбора) оценивалась интерпретатором. При компьютерной обработке необходимы математические оценки. Формальное выражение идеи подбора:

$$\sum_{i=1}^N (g_{i_i}^{ИЗМЕР} - g_i^{ТЕОР})^2 \rightarrow MIN$$

Выбор критерия минимизации не отражает геологическое содержание задачи. Его заимствуют из другой отрасли знаний – математики. Критериев близости функций, используемых в разведочной геофизике много: МНК, минимакса и другие.

Линеаризации – сведение нелинейных уравнений при небольшом изменении аргументов или параметров задачи к линейным уравнениям, использование самых простых линейных зависимостей, методика работы с которыми хорошо разработана:

$$\text{для плотности } \sigma = Av + B,$$

$$\text{положение плотностной границы } H = C\Delta g + D.$$

Часто используют разложение аналитических функций в ряд и выделение линейной части ряда:

$$\text{ряд Тейлора } f(x + \Delta x) = f(x) + f'(x)\Delta x + \dots$$

Это разложение применяется при выводе формулы электрического потенциала диполя:

$$\text{бином Ньютона } (1 + x)^n = 1 + nx + \dots$$

Разложение применяется при выводе формулы расчета влияния небесных тел на величину силы тяжести и при выводе формулы влияния наклона оси чувствительности гравиметра. Пример: взаимосвязь плотности и магнитной

восприимчивости, глубины геологической границы свит с разной плотностью и интенсивности физического поля.

Регуляризации - применение методов преодоления некорректности (отсутствие решения в выбранном модельном классе, множественности решений, неустойчивости) обратных задач. Формальная запись регуляризующего алгоритма:

$$\sum_{i=1} (f_{ИЗМ} - f_{ТЕОР})^2 + \sum (P_{i0} - P_{ПОДБОРА})^2 \Rightarrow MIN ,$$

В этом выражении второе слагаемое обеспечивает не слишком большое отклонение от начальной модели геологического строения.

Параметризации – сведение поставленной геологической задачи к отысканию относительно небольшого числа параметров (десятки в 60-е годы XX века, 30000 – 40000 в современное время). Чем меньше параметров, тем устойчивее решение, т.е. уменьшение влияния изменения начального приближения на решение. Чем меньше параметров, тем грубее аппроксимация среды. **Уменьшение числа определяемых параметров основной путь снижения степени некорректности обратной задачи.**

Шар и круговой горизонтальный цилиндр определяются 3 параметрами, прямоугольный параллелепипед – 7 параметрами, усеченная 4-хугольная пирамида – 9.

Редукции математической задачи к СЛАУ – методы решения СЛАУ разных типов хорошо разработаны, чего нельзя сказать о системах нелинейных. Описание поля с помощью кубических сплайнов сводят к решению СЛАУ размерности $4N$, где N – число звеньев. Также подбирают региональный фон в виде линейной функции – по характерным не искаженным локальными аномалиями значениям поля. Задача аналитической аппроксимации сводится к решению СЛАУ. К решению СЛАУ сводят решение интегральных уравнений.

Упрощение задачи путем использования эквивалентных источников для решения частных задач – аналитическая аппроксимация. Под аналитической аппроксимацией подразумевают замену значений поля набором сингулярных источников, т. е. источниками, не имеющими объема (стержни, полосы, точки и т.п.). Определение мощности источников приводит к решению СЛАУ. Окончательное решение формулируют в геологических терминах. Сингулярные источники применяют для формального описания поля, в тех случаях, когда не ставят задачу определения геологического строения.

5. Модельности – на основе априорной информации формируют геологическую модель, геометрическую модель среды, модель поля, модель связи физических параметров:

$$\chi = A\sigma + B, \quad \rho = C\chi + D,$$

модель интерпретации. В геологии, моделирование – процесс уточнение усовершенствования ранее существующей модели на основе полученных новых данных (рис. 11.2). Модель отражает только существенные свойства прототипа. Лучшая модель кота – это кот, желательно тот же самый. Модель всегда отражает часть свойств объекта, другая часть свойств не рассматривается. Особенность геологоразведки в том, что цель и результат работ – создание модели.

Широкое использование **имитационного моделирования** – необходимо провести решение прямых задачи для большого числа геологических ситуаций, как рудных, так и безрудных, для разных масштабов оруденения и уровня эрозионного среза. Имитационное моделирование позволяет рассмотреть большое количество возможных ситуаций, в том числе таких которые ранее на рассматриваемом объекте не зафиксированы. Имитационное моделирование позволяет оценить несколько конкурирующих гипотез о геологическом строении территории.

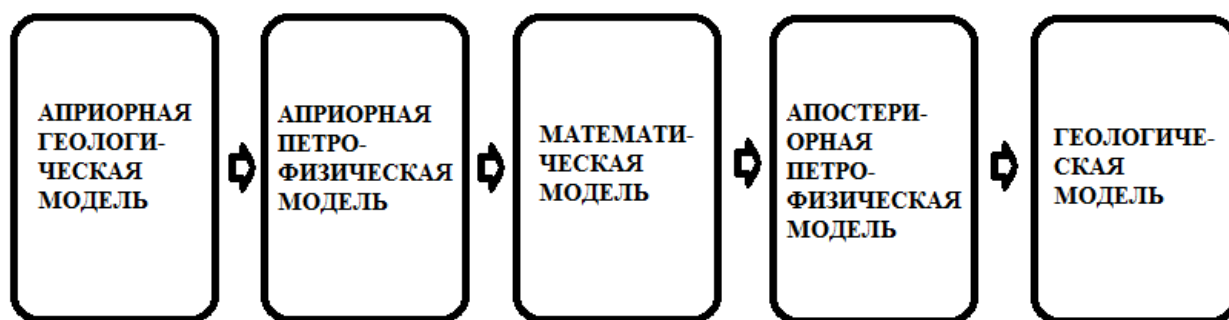


Рис.11.2 Схема создания геолого-геофизической модели

6. Принцип обратной связи – в процессе анализа по мере накопления новых знаний в результате проведенных работ или обнаружения новых данных необходимо корректировать исходные модельные представления или менять цель работ и задачи отдельных методов ГРР. На рис. 11.3 представлена модель месторождения, в которой направление падения рудного тела после проведения гравirazведки изменено на противоположное. Падение рудного тела не совпадает с падением границ вмещающих комплексов.

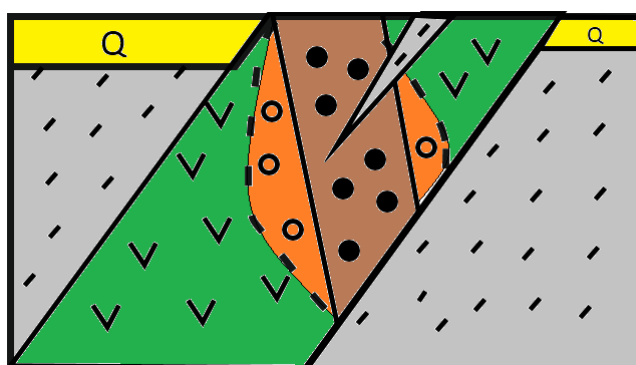


Рис. 11.3 Модель месторождения

7. Адекватности используемого инструментария – методы истолкования не должны противоречить реальной ситуации. Например, при изучении горных районов нельзя использовать идеализацию плоской поверхности наблюдений. Всегда необходимо учитывать конечность области, на которой измерено поле (при использовании интегральных методов учитывают только конечную область), поскольку наши континуальные теории решения обратных задач предполагают измерения на бесконечной площади. Измерения проводятся неточно с некоторой погрешностью. Поэтому проводить подбор поля проводят с погрешностью не меньшей чем утроенная погрешность съемки. При значительных размерах территории ($L > 200$ км) необходимо учитывать сферичность нашей планеты. В континуальных теории принято, что поле известно в каждой точке. При полевых работах измерения проводятся в узлах дискретной сети пунктов.

8. Простоты и общности используемых средств – не следует использовать сложные процедуры там, где можно обойтись простыми средствами, особенно если это не приводит к приросту получаемой информации. Для описания связей физических параметров используют полиномы 1 или 2 степени, редко 3 степени. Для описания геологических поверхностей применяют полиномы невысоких степеней. Чаще всего в геофизике применяют для аппроксимации линейные функции, тригонометрические функции, логарифмические функции.

9. Использование искусственного интеллекта. Применение алгоритмов имитирующих разумные действия человека, направленные на распознавание образов. Искусственный интеллект это программы реализующие алгоритмы самообучения. Такие программы должны реагировать на изменение ситуации, отчасти моделирующие эволюцию. Например, алгоритм отжига (отсечение лишнего), алгоритм нейронных сетей, алгоритм муравья (задача коммивояжера), генетические алгоритмы, алгоритмы нечеткой логики, алгоритм систем с правилами, марковские цепи, умные агенты. Признаком интеллекта логические операции, процедуры выбора из нескольких возможных вариантов, описывающие правила принятия решения. Особенно популярны алгоритмы интерпретации нейронных сетей при геофизических исследованиях скважин.

В ближайшем будущем технологии искусственного интеллекта будут доминировать во всех геофизических методах и на полевых работах, и при проведении геологического истолкования, и особенно при истолковании комплексных данных.

10. Изучения помех – без правильной оценки погрешности в измеренных данных истолкование проводить нельзя. Например, требование к сечению изолиний исключают появление аномалий, обусловленных инструментальной

погрешностью и методикой измерений. Необходимо оценивать географические и геологические помехи. Геологические помехи создают объекты, поле которых при выбранной сети измерений значимо не более чем в двух пунктах измерений. Существуют помехи связанные с поверхностью наблюдения и сферической формой нашей планеты, их величина может существенно исказить поле объекта.

В настоящее время распределение помех описывают нормальным законом распределения. Практика указывает на то, что распределение помех на площади неравномерное по величине и в пространстве.

11. Исключения известного – эффекты, обусловленные известными объектами, необходимо исключить из рассмотрения. Такая процедура носит название геологическое редуцирование. Из измеренного поля вычитают поле известных объектов, полученные в результате решения прямых задач, что подчеркивает значимость большого набора процедур решения прямых задач в интерпретационных пакетах. Это неизбежно уменьшит область неоднозначности и неустойчивость решения обратной задачи. Этот процесс самый эффективный способ уменьшения степени некорректности обратной задачи. Исключение регионального фона с помощью геологического редуцирования – самый точный способ его учета.

12. Геологической содержательности – результат работ должен соответствовать поставленной геологической цели. Результат истолкования необходимо представлять в геологических терминах (рис. 11.3). Например, выделение участков для дальнейшего детального изучения, признание территории бесперспективной, аномалия обусловлена дайкой порфиритов, аномалия обусловлена железными рудами (магнетитовыми).

13. Оптимизации – разработка критериев оценки эффективности проведенного анализа. Оптимум это согласование противоречивых требований. Рациональный комплекс геофизических методов должен отвечать требованиям:

- наименьшие затраты,
- получение полной информации об объекте поисков,
- наименьшее время выполнения работ.

Можно построить целевую функцию, минимум или максимум которой необходимо найти:

$$F = \alpha I + \beta Z + \gamma T.$$

Часто математические критерии не отражают геологическую суть задачи. Например, при использовании гарантированного подхода не ищут минимум целевой функции.

Следует помнить, что оптимизация приводит к абсурду, если не учитывать содержание задачи.

14. **Адаптации** – любая методика!!! анализа в конкретных условиях видоизменяется, приспособляется к геологической ситуации, сети измерений, рельефа, мощности рыхлых отложений. Например, для КМА используют пластовые элементарные тела, для кимберлитовых тел вертикальные эллиптические цилиндры, усеченные конусы и др.

Анализ геофизических полей проводится в следующей последовательности:

1. Изучение работ предшественников. Анализ региональной геологической обстановки и региональных геофизических полей. Постановка задач геологического истолкования геофизических полей. Определение сотрудников, своих и привлеченных из других организаций, способов и средств (программных пакетов), необходимых для истолкования геофизических материалов. Решение прямых задач и имитационное моделирование.

2. Обработка и анализ результатов измерений физических свойств. Определение законов распределения и величин эффективных параметров. Выявление корреляционных связей и зависимостей между свойствами.

$$\chi = A\sigma + B, \rho = C\chi + D.$$

Построение уравнений регрессии вида:

$$\chi = A\sigma + B, \delta f = \alpha H + \eta$$

3. Выделение структурно-вещественных комплексов (СВК) – выделение групп горных пород, которые можно определить по выбранному комплексу геофизических методов.

4. Качественная интерпретация. Предварительное определение геометрических и физических параметров СВК, с небольшим объемом вычислений, без решения объемных обратных задач. Составление схем геофизических полей.

5. Количественная интерпретация для каждого метода – решение обратных задач для каждого физического поля с применением методов регуляризации. Создание однометодных объемных моделей. Увязка результатов истолкования данных полевых и скважинных измерений. Создание комплексных объемных моделей.

6. Комплексная интерпретация – согласование решений обратных задач. Выявление корреляционных связей между разными полями, между полями и геологическими границами. Результативные материалы содержат все объекты, выделенные по разным полям.

7. Геологическое истолкование – наделение геологическим содержанием выделенных объектов. Составление геолого-геофизических разрезов и трехмерных моделей.

8. Разработка рекомендаций для дальнейших исследований. Выделение перспективных участков для изучения в крупном масштабе.

Распознавание образов.

Любой метод истолкования геолого-геофизических данных, по сути, комбинация идеи аналитической аппроксимации и идеи распознавания образов. Распознавание образов предполагает создание образов, образов месторождений, структурно-вещественных признаков, тектонических нарушений, зон метасоматоза. Образ определен значениями интенсивности полей, характеристиками полей и. т. п. т. е. набором признаков. Таким образом, первый этап распознавания - формирование набора признаков искомого объекта. Второй этап отнесение выявленного объекта к конкретному классу.

Один из алгоритмов классификации – ART1- **алгоритм адаптивного резонанса** предназначен для:

определение числа классов, максимально возможное число.

набор признаков класса, побитовый набор

отнесение объекта к классу.

1 Формирование группы векторов признаков для каждого класса. Вектор прототип относится к центру класса.

2 Вводится параметр внимательности ρ со значениями из интервала (0, 1).

3 β -параметр – параметр разрушения связей – небольшое положительное число.

4 Значимость вектора – количество элементов вектора не равных 0

5 Е-вектор признаков

Пример:

Алгоритм нейронные сети. Основы конструирования искусственных нейронных сетей. Искусственные нейронные сети чрезвычайно разнообразны по своим конфигурациям, но основу каждой НС составляют относительно простые, в большинстве случаев - однотипные, элементы (ячейки), имитирующие работу нейронов головного мозга. Далее под нейроном будет подразумеваться искусственный нейрон, т. е. ячейка НС. Каждый нейрон характеризуется своим текущим состоянием по аналогии с нервными клетками головного мозга, которые могут быть возбуждены или заторможены. Он обладает группой синапсов - односторонних входных связей, а также имеет аксон - выходную связь данного нейрона, с которой сигнал (возбуждения или торможения) поступает на синапсы следующих нейронов. Каждый синапс характеризуется величиной синаптической связи или ее весом W_i , который по физическому смыслу эквивалентен электрической проводимости.

Текущее состояние нейрона определяется как взвешенная сумма его входов:

$$S = \sum X_i W_i. \quad (2.1)$$

Выход нейрона есть функция его состояния: $Y = f(S)$, где f - активационная функция.

Все НС работают по принципу параллельной обработки сигналов, который реализуется путем объединения большого числа нейронов в так называемые слои и соединения нейронов различных слоев, а также, в некоторых конфигурациях, и нейронов одного слоя между собой, причем обработка взаимодействия всех нейронов ведется послойно.

Теоретически число слоев и число нейронов в каждом слое может быть произвольным, однако фактически оно ограничено ресурсами компьютера или специализированной микросхемы, на которых обычно реализуется НС. На рис. 11.4 приведен пример трехслойной сети (трехслойного персептрона).

Вопрос о необходимых и достаточных свойствах сети для решения того или иного рода задач представляет собой целое направление нейрокомпьютерной науки. Так как проблема синтеза НС сильно зависит от решаемой задачи, дать общие рекомендации затруднительно. В большинстве случаев оптимальный вариант получается на основе интуитивного подбора.

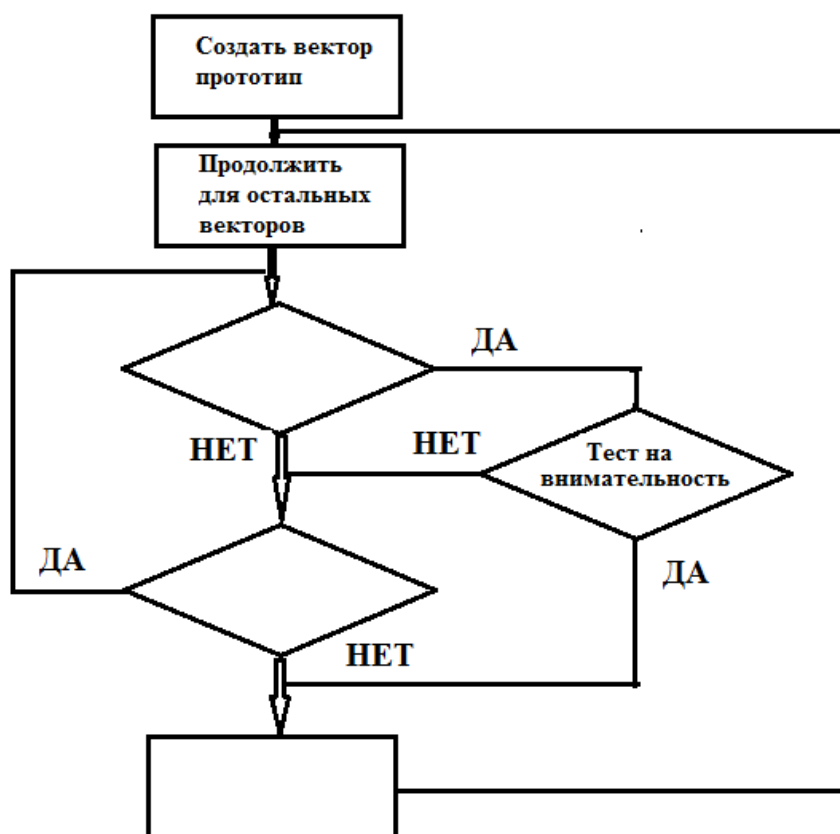


Рис. 11.4 Схема трехслойного персептрона.

ЛЕКЦИЯ 15 ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Метод исследований: математическое моделирование. Составлена трехслойная модель, отражающая различные уровни эрозионного среза. Проведено исследование модели.

Модель среды состоит из 9 блоков с размером сечения 400×400 м. Полный геологический разрез, представлен в центральном блоке рисунок 1, состоит из нижней свиты преимущественно андезитового состава мощностью 160 м с магнитной восприимчивостью 200010 ед. СИ, средней свиты сложенной кислыми вулканитами мощностью 160 м с магнитной восприимчивостью 0 ед. СИ, и верхний слой сложенный осадочными породами мощностью до 40 м с магнитной восприимчивостью -1000 ед. СИ. На территории распространены дайки и штоки андезитов и дацитов, достигающие в поперечнике первых сотен метров. На участке широко проявлены процессы пропилитизации, окварцевания, аргиллизации, сульфидизации, карбанитизации и гематитизации.

Все остальные блоки составлялись в соответствии с эрозионным процессом, с уменьшением мощности верхнего слоя в 2 раза, допустимая минимальная мощность 20 м. Исходя из этих условий, были рассчитаны параметры геологической модели (табл. 1) по данным которой был составлен рисунок 1.

Таблица 1 – Параметры геологической модели.

№ Блока	№ Слоя	Глубина до верхней кромки, м	Глубина до верхней кромки, м	Магнитная восприимчивость среды ед. СИ
1	1	0	40	-1000
	2	40	200	0
	3	200	360	2000
2	1	0	20	-1000
	2	20	180	0
	3	180	320	2000
3	1	0	160	0
	2	160	320	2000
4	1	0	80	0
	2	80	160	2000
5	1	0	40	0
	2	40	200	2000
6	1	0	20	0
	2	20	180	2000
7	1	0	160	2000
8	1	0	80	2000
9	1	0	40	2000

Анализ результатов. Диапазон измерений поля модели совпадает с диапазоном измеренного поля. Наименьшее значение поля соответствуют полному геологическому разрезу. На плане изодинам можно заметить, что в южной части поле плавно возрастает с запада на восток, это отражает изменение глубины залегания положительно намагниченного пласта, и в действительности в составленной мной геологической модели (рис. 1) происходит эрозионный срез в направлении с востока на запад, то есть положительная магнитная толща опускается в этом направлении. Причем на западе эту толщу на поверхности перекрывает небольшой слой осадочных пород, имеющий отрицательную магнитную восприимчивость, это так же отмечается на плане изодинам. Рассмотрев северную часть плана можно увидеть обратную картину, поле уменьшается с запада на восток, но с более высоким градиентом, нежели на юге, что является следствием уменьшения мощности намагниченного пласта. Сравнивая западную и восточную части плана изодинам, которые имеют большие значения поля, можно сделать вывод, что западная часть залегает ближе к поверхности, нежели восточная, так как максимальное значение поля в западной части на 100 нТл больше чем в восточной. Это подтверждается и заданной геологической моделью (рисунок 1), на ней блок 6 расположенный на западе имеет менее мощный, на 20 м меньше, верхний немагнитный слой, чем блок 5 расположенный на востоке.

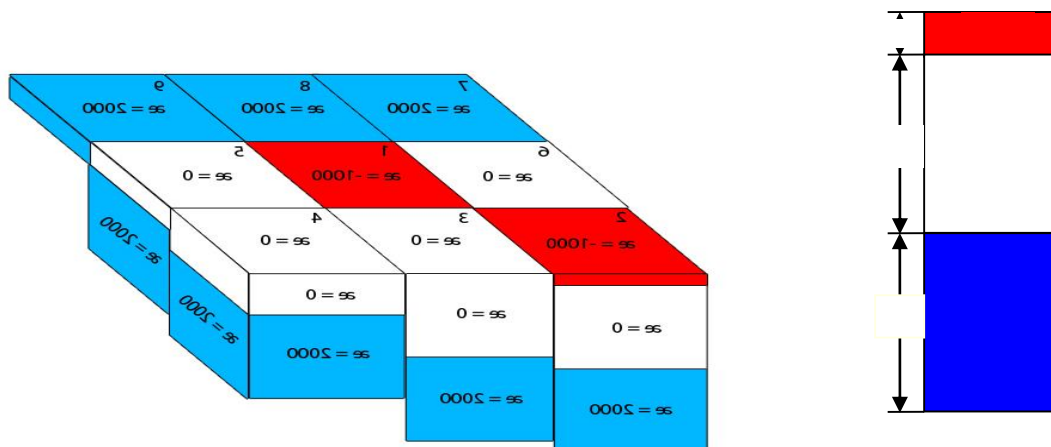
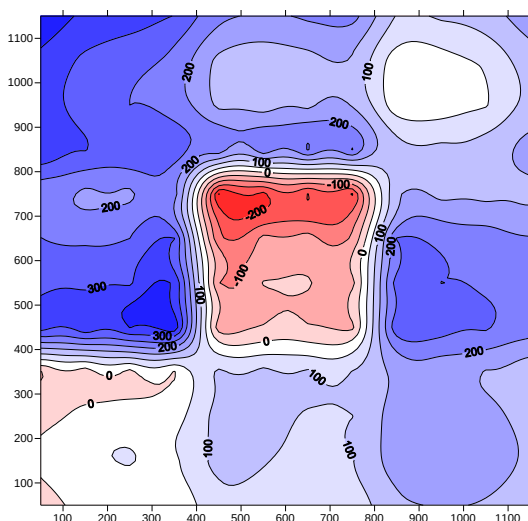
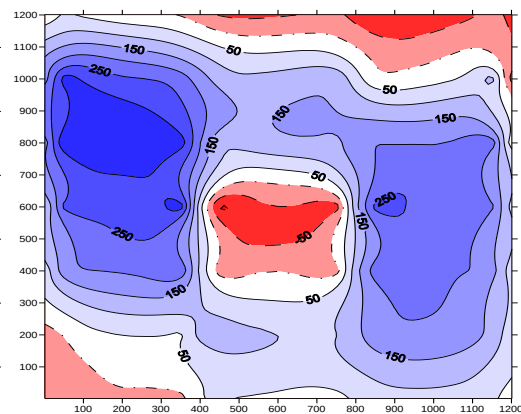
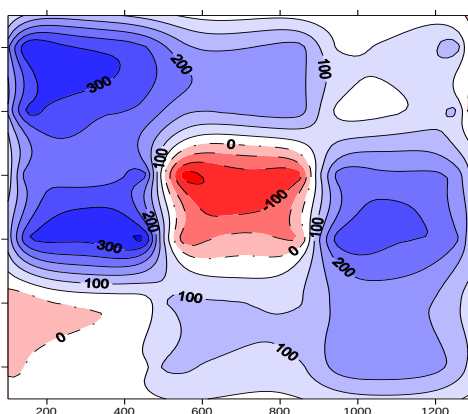
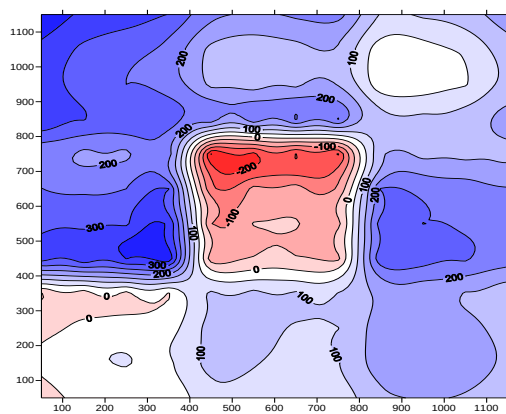
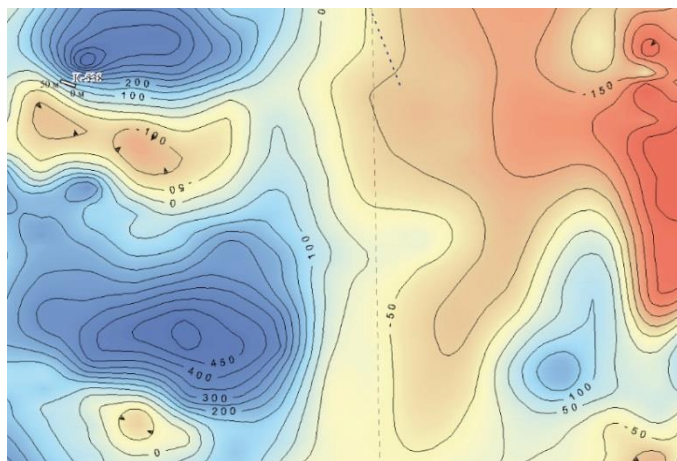
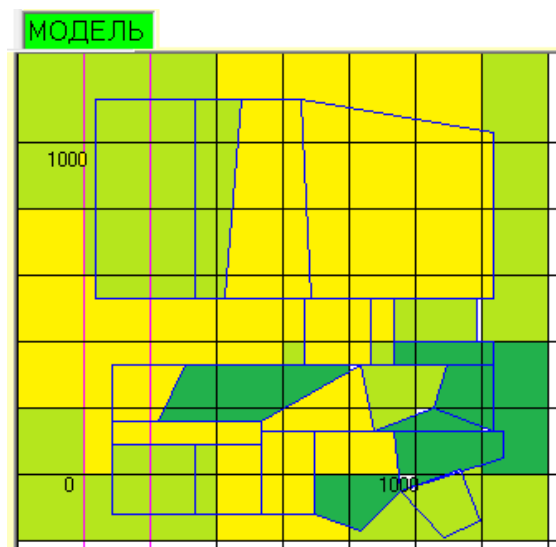
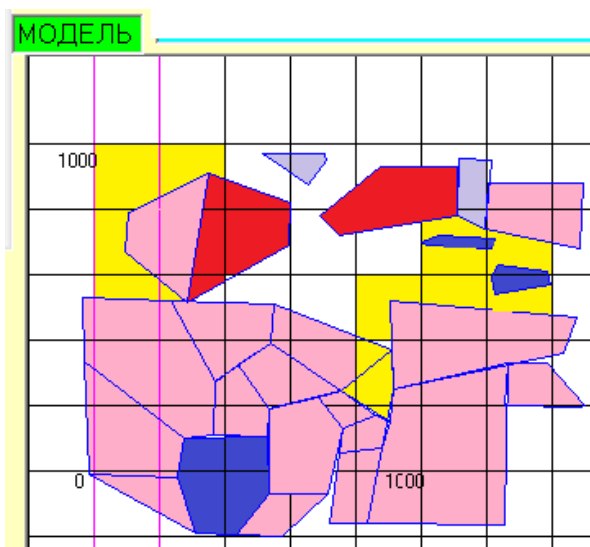


Рисунок 1 – Модель среды

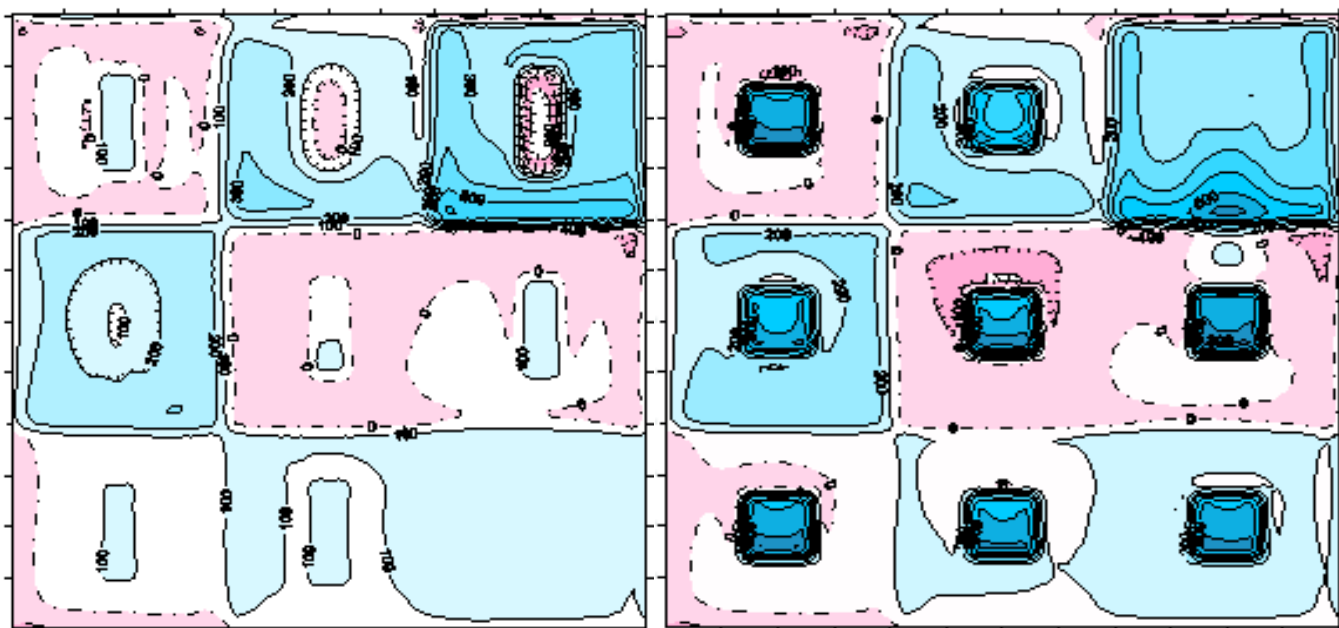
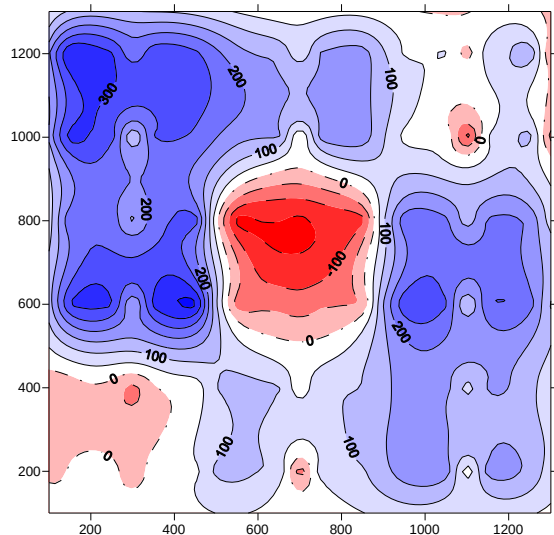
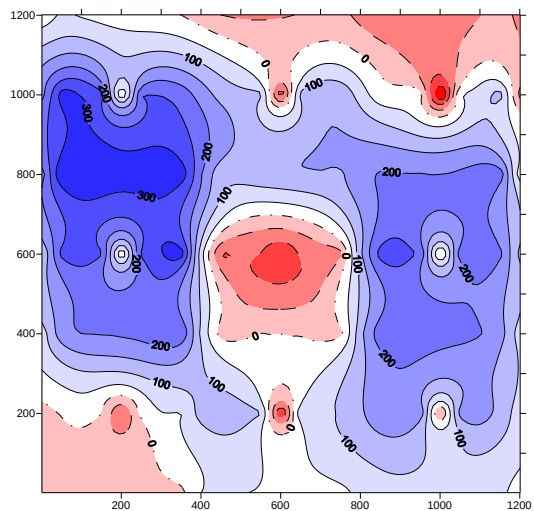


Штоки андезитов обуславливают положительные аномалии магнитного поля интенсивностью до 300 нТл.
Штоки дацитов обуславливают аномалии до -200 нТл.
Метосамитические изменения вблизи

интрузивных тел вызывают изменение интенсивности магнитных аномалий.
Выводы:



ВЛИЯНИЕ СЕТИ НАБЛЮДЕНИЙ



25 МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Ряды Фурье.

$$T_{ij} = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} a_{ij} \cos \frac{2\pi i x_i}{\Delta x} \cos \frac{2\pi j y_j}{\Delta y} + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} b_{ij} \cos \frac{2\pi i x_i}{\Delta x} \sin \frac{2\pi j y_j}{\Delta y} +$$

$$+ \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} c_{ij} \sin \frac{2\pi i x_i}{\Delta x} \cos \frac{2\pi j y_j}{\Delta y} + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} d_{ij} \sin \frac{2\pi i x_i}{\Delta x} \sin \frac{2\pi j y_j}{\Delta y} +$$

$$a_{ij} = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} T_{ij} \cos \frac{2\pi i x_i}{\Delta x} \cos \frac{2\pi j y_j}{\Delta y}$$

Решением уравнения Лапласа является потенциал $W(x, y, z) = e^{-iax-iby-cz}$, где $c^2 = a^2 + b^2$. Это решение может быть получено методом разделения переменных. Линейная комбинация таких функций с произвольными коэффициентами также будет решением уравнения Лапласа. В том числе решением будет:

$$W(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{P_1} S(a, b) e^{-cz-iax-iby} da db \quad (1),$$

где $S(a, b)e^{-cz}$ - преобразование Фурье функции $W(x, y, z)$ относительно переменных x и y . Обратное преобразование Фурье

$$S(a, b) = \iint_{P_0} e^{iax+iby} W(x, y) dx dy \quad (2).$$

Измерения поля проводят в пунктах равномерно расположенных на изучаемой площади. После проведения процедуры интерполяции наблюдаемых данных получаем значения поля в узлах квадратной сети. Тогда гармоническая функция $W(x, y)$ – функция с ограниченным спектром, так как она известна только в узлах квадратной сети со стороной Δx . Поэтому она может быть представлена в виде функции значения которой в узлах совпадают с данными измерений:

$$W(x, y) = \sum_k \sum_n W(k\Delta x, n\Delta x) \frac{\sin \pi(x/\Delta x - k)}{\pi(x/\Delta x - k)} \frac{\sin \pi(y/\Delta x - n)}{\pi(y/\Delta x - n)}.$$

Преобразование Фурье функции $S(a, b)$ в квадрате $-\pi/\Delta x < a < \pi/\Delta x$, $-\pi/\Delta x < b < \pi/\Delta x$ можно записать:

$$S(a, b) = \Delta x^2 \sum_k \sum_n W(k\Delta x, n\Delta x) e^{k\Delta x ia + n\Delta x ib},$$

а вне квадрата она равна нулю.

Без ограничения общности рассуждений можно считать сторону квадрата равной единице. Тогда после подстановки получим:

$$W(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{P_1} \sum_k \sum_n W(k, n) e^{kai + nbi - cz - iax - iby} da db = \sum_k \sum_n W(k, n) \iint_{P_1} e^{-iz + (k-x)ai + (n-y)bi} da db,$$

где P_1 квадрат $-\pi < a, b < \pi$.

Принимаем $x = y = 0$, тогда

$$W(0,0,z) = \sum_k \sum_n W(k,n) \frac{1}{4\pi^2} \iint_{P_1} e^{-cz+kai+nbi} dadb.$$

Обозначим:

$$C(k,n) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} e^{-cz+kai+nbi} dadb,$$

получим:

$$W(0,0,z) = \sum_k \sum_n W(k,n) C(k,n).$$

Учитывая симметрию задачи область интегрирования можно уменьшить вчетверо, достаточно взять область $(0-\pi, 0-\pi)$.

$$C(k,n) = \frac{1}{4\pi^2} \iint e^{-cz} (e^{ika+nbi} + e^{-kai+nbi} + e^{kai-nbi} + e^{-kai-nbi}) dadb = \frac{1}{\pi^2} \iint e^{-cz} \cos ka \cos nb dadb$$

Область интегрирования, учитывая симметрию относительно биссектрисы, квадрата можно уменьшить вдвое:

$$\begin{aligned} C(k,n) &= \frac{1}{\pi^2} \int_0^{\pi} \cos k a d a \int_0^a e^{-cz} \cos n b d b + \frac{1}{\pi^2} \int_0^{\pi} \cos n b d b \int_0^b e^{-cz} \cos k a d a = \\ &= \frac{1}{\pi^2} \int_0^{\pi} d a \int_0^a e^{-cz} (\cos k a \cos n b + \cos n a \cos k b) d b. \end{aligned}$$

Введем новую переменную $b = au$, получим:

$$\begin{aligned} C(k,n) &= \frac{1}{\pi^2} \int_0^{\pi} a d a \int_0^1 e^{-az\sqrt{1+u^2}} (\cos k a \cos n u a + \cos n a \cos k u a) d u = \\ &= \frac{1}{\pi^2} \int_0^1 d u \int_0^{\pi} e^{-az\sqrt{1+u^2}} (\cos k a \cos n a u + \cos n a \cos k u a) a d a. \end{aligned}$$

Коэффициенты преобразования для продолжения поля можно найти численным интегрированием с помощью математических пакетов MATLAB, MathCad, Mathematica. Придавая z разные значения кратные расстоянию Δx , получим коэффициенты для вычисления поля в верхнем пространстве или в нижнем пространстве. Вычисленные коэффициенты можно использовать для продолжения гравитационного и магнитного полей. Изменение коэффициентов с удалением от начала координат характеризует корректность задачи, для продолжения в нижнее полупространство они очень медленно убывают по абсолютной величине.

Вертикальная производная потенциального поля (1) равна:

$$W_z = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{P_1} S(a,b) e^{-cz-iax-iby} c d a d b.$$

Повторяя те же рассуждения, получим выражения коэффициентов для вычисления вертикальной производной поля по измеренным значениям поля на горизонтальной плоскости в узлах квадратной сети:

$$C_0(k,n) = \int_{-1}^1 \sqrt{1+u^2} \pi \left(\left(\frac{1}{\pi^2 (k+nu)^2} \right) \cos \pi(k+nu) + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi^2 (k+nu)^2} \right) \frac{\sin \pi(k+nu)}{\pi(k+nu)} + \right. \\ \left. + \left(\frac{1}{\pi^2 (n+ku)^2} \right) \cos \pi(n+ku) + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi^2 (n+ku)^2} \right) \frac{\sin \pi(n+ku)}{\pi(n+ku)} \right) d u$$

Величины этих коэффициентов вновь можно вычислить численным интегрированием. Например, $C_0(0,0) = 2,40493$. Окончательные значения коэффициентов зависят от расстояния между узлами сети наблюдения. Поэтому для конкретной сети наблюдения коэффициенты необходимо разделить на Δx , $C(k,n) = C_0(k,n) / \Delta x$. С помощью свертки полученных коэффициентов с гравитационным полем можно по наблюденному полю силы тяжести вычислить псевдомагнитное поле.

Чтобы вычислить вторую вертикальную производную наблюденного поля для расчета коэффициентов $C_{zz}(k,n)$ дифференцируем решение уравнения Лапласа дважды по z :

$$V_{zz} = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{P_1} S(a,b) e^{-cz - iax - iby} c^2 da db,$$

$$C_{zz}(k,n) = \iint_{P_0} e^{-cz + ika + inb} c^2 da db, \quad -\pi < a < \pi, \quad -\pi < b < \pi.$$

Для поверхности наблюдений $z = 0$:

$$C_{zz}(k,n) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi a^2 \cos k a da \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \cos n b db + \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \cos k a da \frac{1}{\pi} \int_0^\pi b^2 \cos n b db.$$

$$C_{zz}(0,0) = \frac{2\pi^2}{3}, \quad C_{zz}(k,0) = (-1)^k \frac{2}{k^2}, \quad k, n \neq 0 \quad C_{zz}(k,n) = 0.$$

2 АКФ

$$B(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) f(x - \tau) dx, \quad B_H = B(\tau) / B(0), \quad R(m) = \frac{1}{n - |m|} \sum_{i=1}^{n-|m|} (Z_i - \bar{Z})(Z_{i+m} - \bar{Z}).$$

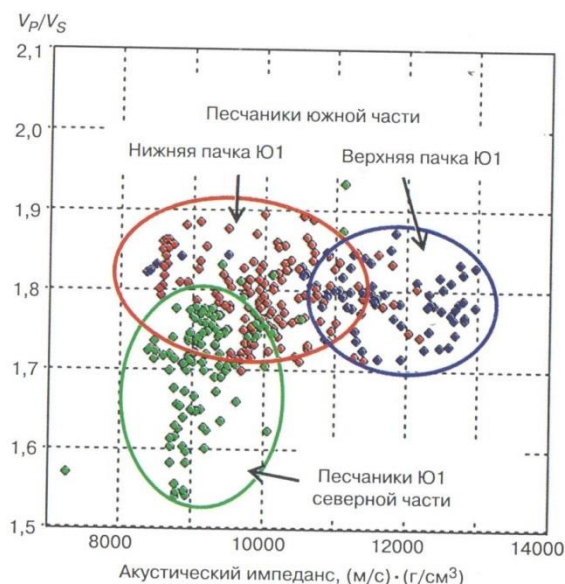


Рис. 1. Упругие свойства песчаных пород в северной и южной частях площади

3 Спектры

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-i\omega x} dx, \quad f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) e^{i\omega x} d\omega.$$

$$S(k) = \Delta x \sum_0^{N-1} f_j e^{-ij2\pi k / N}, \quad f_j = \frac{1}{N\Delta x} \sum_0^{k=N-1} S(k) e^{ij2\pi k / N}.$$

4 Вейвлет-анализ

Для обработки экспериментальных данных в последние 20 лет в гравиразведке, магниторазведке, электроразведке, сейморазведке и других отраслях геофизики применяют вейвлет-анализ. Вейвлет-анализ применяют для изучения нестационарных процессов. В отличие от Фурье-анализа вейвлет-анализ обеспечивает привязку источника в пространстве. При проведении вейвлет-анализа использует три параметра: масштаб, положение и направление. Исходные данные сравниваются со стандартными сигналами – вейвлетами $\Psi(x)$. Вейвлетом (в дословном переводе "маленькая волна", в отечественной литературе используется также термин всплеск) называют осциллирующую функцию, отличную от 0 на небольшом промежутке, удовлетворяющую условию:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(x) dx = 0.$$

Выделяют семейства все подобные вейвлеты которого получают умножением на масштабный множитель. Для вейвлетов определяют непрерывное, дискретное и быстрое вейвлет преобразования (НВП, ДВП, БВП).

Вейвлет-преобразование определяется выражением:

$$(W_{\psi} f)(\sigma, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \frac{1}{\sqrt{|\sigma|}} \psi\left(\frac{x-\tau}{\sigma}\right) dx,$$

где σ – параметр масштаба, τ – параметр сдвига. Обратное вейвлет-преобразование:

$$f(x) = \frac{1}{C_{\psi}} \int_{-\infty}^{+\infty} (W_{\psi} f)(\sigma, \tau) \psi_{\sigma, \tau}(x) \frac{1}{\sigma^2} d\sigma d\tau, \text{ где } C_{\psi} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\psi(\omega)|}{\omega^2} d\omega.$$

Основная идея вейвлет-анализа заключается в представлении дискретной функции $f(x)$, заданной на отрезке R оси абсцисс, в виде

$$f(x) = \sum_{i=1}^N c_i \psi_i(x),$$

следующего ряда: где в качестве базисной системы функций $\{\psi_i(x) : i = 1, 2, \dots, N\}$ используются перемещаемые по оси координат x и масштабируемые (сжатые или растянутые по оси x) однотипные функции с компактным носителем. Вейвлет-коэффициенты определяются скалярным произведением сигнала на вейвлет-функцию заданного типа

$c(s, n) = \int_R f(x) s^{-1/2} \psi\left(\frac{x-n}{s}\right) dx$, где s – масштаб, n – сдвиг. Метод нахождения вейвлет-коэффициентов на основе описанного интеграла свертки

называется непрерывным вейвлет-преобразованием (НВП). НВП позволяет решать задачу преобразования наблюдаемого гравитационного поля в масштабно-сдвиговую область с целью единого представления его частотных и пространственных характеристик. Можно выделить три основных элемента в этих исследованиях: анализ наблюдаемого гравитационного поля; представление данных об изучаемом объеме геологической среды; решение систем линейных алгебраических уравнений, возникающих при решении обратной задачи гравиметрии.

По существу эти стандартные сигналы отличны от нуля на небольшом интервале и имеют нулевое интегральное среднее. Вейвлетами, например, являются производные функции Гаусса:

$$g(x) = e^{(-t^2/2)}.$$

Для анализа гравитационных и магнитных полей применяется вейвлет:

$$mhat(x) = (1 - x^2)e^{-x^2/2}.$$

Система функций не является полной и ортогональной, поэтому восстановление сигнала по его спектру не всегда возможно. Алгоритм вейвлет-анализа основан на свертке поля силы тяжести с вейвлет-функцией в скользящем окне разного размера при различных сдвигах. Сдвиг по оси абсцисс берут кратным шагу наблюдений поля. Вейвлет масштабируют в соответствии с условиями задачи. Свертка производится перемножением спектров поля и вейвлета.

Вейвлет-анализ в отличие от Фурье-анализа предназначен для изучения нестационарных процессов. Другим отличием вейвлет-анализа является привязка в пространстве.

Построение вейвлет-спектров на основе НВП позволяет:

1. Локализовать в пространстве особенности поля, обусловленные геологическими объектами разного ранга (в т.ч. и визуально не выявляющимися).
2. Оценить энергетический вклад каждой частотной компоненты поля при сохранении привязки выделенных компонент к реальным пространственным координатам.
3. На основе взаимосвязи между масштабом вейвлета и глубиной залегания сингулярного источника определять эффективные параметры возмущающих объектов.

17. РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ

Под распознаванием образов (анализом многомерных данных) подразумевают создание по совокупности геолого-геофизических признаков образа изучаемых объектов и выявление этих объектов на исследуемых территориях. Синонимы термина образ:

- кластер, группа элементов, характеризующихся общим свойством,
- таксон, систематизированная группа любой категории.

В качестве образа может быть рудный район, рудный узел, рудное поле, месторождение, рудное тело, нефтяная залежь, месторождение нефти.

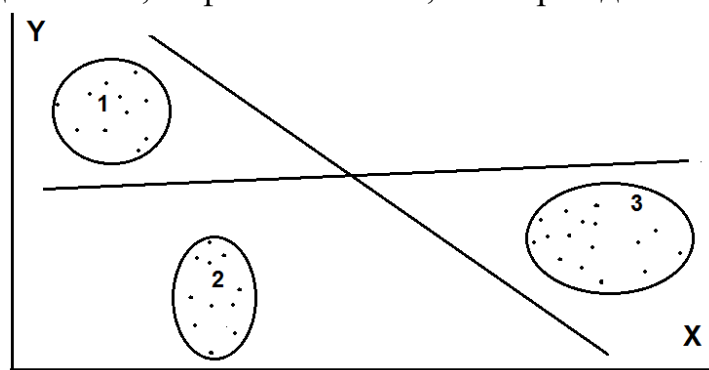


Рис. 1 Выделение областей в признаковом пространстве

Выделяют две задачи распознавания:

1. Совокупность элементов разбивают на небольшое число классов
2. Определение естественного расслоения исходных данных.

Во втором случае решения может не существовать

Для решения задачи распознавания используются:

Эвристический подход – разбиение на классы на основе интуиции исполнителя.

Оптимальный подход – разбиение на классы на основе заданного критерия разбиения.

Статистический подход - разбиение на классы на основе вероятностного подхода, использования понятия случайной величины.

При распознавании по эталонам с обучением, выбор эталонов определяет результат распознавания. Как правило, число эталонов по исследуемому району невелико, поэтому их дополняют эталонами по аналогичным объектам из других регионов.

Обычной формой представления данных при решении задач распознавания служит прямоугольная таблица, строки которой соответствуют объектам, а столбцы – признакам.

Наиболее простой подход использование интегрального показателя. Разбиение возможно по нескольким показателям.

Определение набора признаков может проводиться на основе группы эталонных объектов, либо без них исходя из теоретических представлений и опыта работ на других объектах.

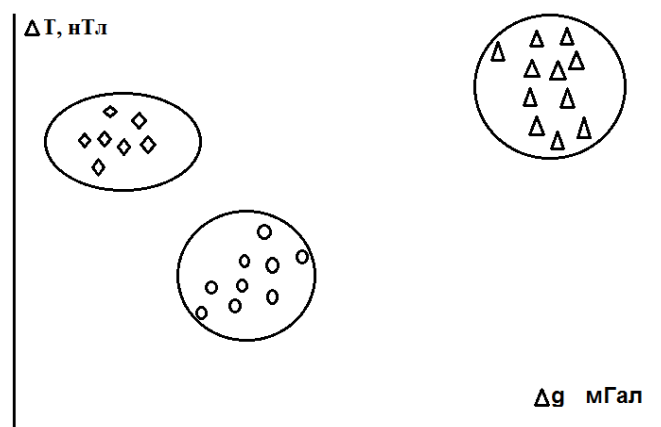


Рис. 2 Выделение классов

Наиболее простой пример – разделение горных пород на группы по величине физического параметра. Например, деление на коллекторы и неколлекторы по величине пористости. В этом случае строят полигоны частот, и разделение проводят так, чтобы возможность совершить ошибки первого рода и второго рода были одинаковы. При построении полигонов частот соблюдают следующие правила, сформулированные на основе многолетней практики:

1. Число интервалов группирования не меньше 6.
2. Число интервалов группирования не больше 12.
3. Частота в каждом интервале не может быть меньше 5.
4. Гистограммы построенные по практическим данным нередко имеют полимодальную форму.

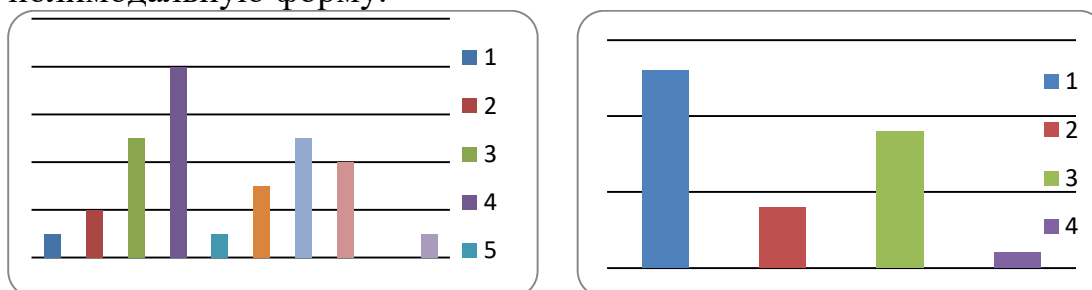


Рис. Гистограммы измеренных полей

Иногда, чтобы скрыть степень неопределенности используют интегральную кривую для одной группы пород и дополнение интегральной кривой для другой группы пород.

Важнейший элемент такого подхода – определение набора признаков. Выбор ограничивается имеющимися данными, в очень редких случаях проводятся дополнительные исследования. В качестве геологических признаков выбирают, например, наличие мантийного корня, наличие интрузивных пород кислого состава, вечной мерзлоты, зон метасоматоза, зон деструкции, геологических структур, тектонических нарушений и их пересечений, карбонатизация, различные рудоконтролирующие факторы и другие. В качестве геофизических признаков могут использоваться: интенсивность регионального поля, интенсивность локальной аномалии, вертикальный градиент поля силы тяжести, энтропия, горизонтальный градиент поля, форма аномалии, сочетание

аномалий разных полей, аномалия трубчатого типа. Эффективная плотность, эффективная намагниченность.

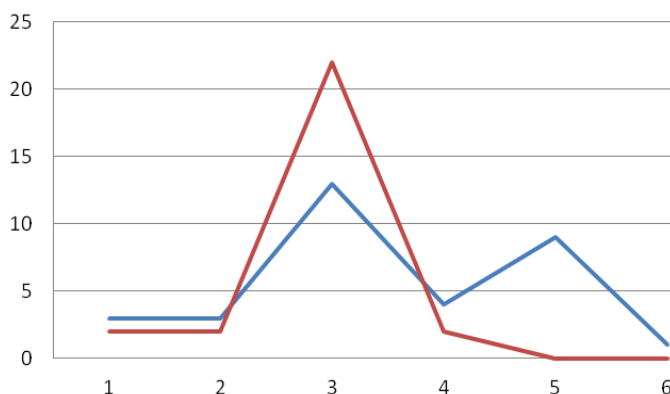


Рис. 3

Из выше приведенных примеров следует, что признаки существенно различаются между собой. Для некоторых из них можно указать численное значение (интенсивность аномалии – 5 мГал, величина градиента поля 2 мГал/км). Для других можно создать шкалу и расположить их в определенной последовательности, а затем указать место объекта в этой последовательности. Таким переменным можно поставить в соответствие число натурального ряда. Такие переменные называют категоризированными или порядковыми или ранговыми.

Для многих геологических данных нельзя сделать ни того ни другого, эти признаки качественные. Им нельзя поставить в соответствие число. Такие дихотомические переменные принимают только два значения: есть – нет, плюс – минус.

Признаки, используемые при поисках алмазов:

1. Наличие мантийного корня.
2. Пересечение более трех разломов.
3. Пониженное региональное поле
4. Повышенное гравитационное поле
5. Положительная магнитная аномалия.
6. Отрицательная гравитационная аномалия.

Необходимо учитывать взаимосвязь между признаками, чтобы один и тот же фактор не учитывался дважды. Для анализа связи двух признаков составляют таблицу:

	$\Delta T +$	$\Delta T -$	Маргинальные частоты (сумма)
G -	77	6	107
G +	75	32	83
Маргинальные частоты (сумма)	152	38	190

$$\chi^2 = N \sum_i \sum_j \frac{f_{i,j}^2}{f_i f_j} - N$$

$$\chi^2 = (77 \cdot 32 - 75 \cdot 6)^2 / 190 / (152 \cdot 38 \cdot 83 \cdot 107) = 0,08$$

Для анализа связанности признаков в многомерном случае составляют матрицы сопряженности (инцидентий):

	a	b	c	d	e	Сумма
A	f_{11}	f_{12}	f_{13}	f_{14}	f_{15}	M_1
Б	f_{21}	f_{22}	f_{23}	f_{24}	f_{25}	M_2
В						M_3
Г						M_4
Сумма	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	N

Критерии связанности

$$P = \sqrt{\frac{\chi^2}{N + \chi^2}}, \quad T = \sqrt{\frac{\chi^2}{N(K_{\Sigma} - M_{\Sigma})(M_{\Sigma} - 1)}}, \quad C = \sqrt{\frac{\chi^2}{N(\min(K_{\Sigma}, M_{\Sigma}) - 1)}}$$

Распознавание может осуществляться по расстоянию между классами в многомерном пространстве, поэтому необходимо определить характеристику определяющую меру близости между классами и объектами. Эту характеристику принято именовать расстоянием:

Расстояние Мехаланобиса

Евклидово расстояние

Взвешенное евклидово расстояние

Расстояние по Хеммингу, отражает расстояние между объектами определяемыми дихотомическими признаками:

$$R = \sum_i (X_i - X_j)$$

$$x = \sqrt{b^2 - 4ac}$$

либо на основе построенного решающего правила

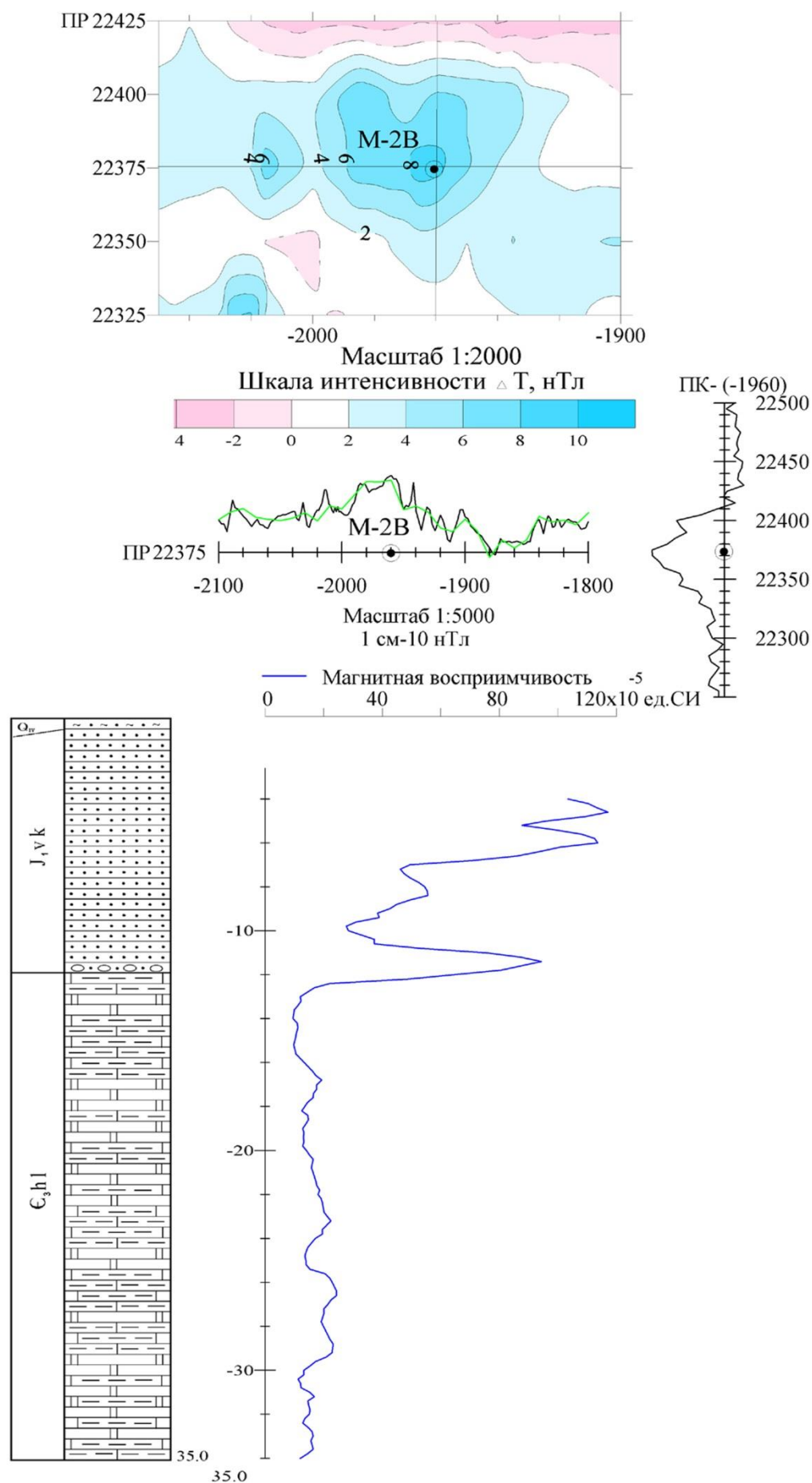


Рис. Выделение кимберлитовых трубок

Методообразующая идея: любой метод истолкования геоданных основывается на комбинации идеи аналитической аппроксимации и идеи использования распознавания образов.

Эффективное истолкование математическими методами невозможно в силу недоопределенности имеющейся информации, неустойчивости и неединственности решений обратных задач гравиразведки и магниторазведки. Поэтому компьютерные технологии включают в себя процедуры, основанные на распознавании образов. Близкие задачи к распознаванию задачи классификации: районирование полей по морфологии (типам), создание типовых модельных полей.

Распознавание образов применяют при решении задач геологического картирования (число классов большое), нефтяной геофизики (число классов 2), рудной геофизики (число классов 2). При эвристическом подходе к задаче распознавания набор признаков проводит исследователь, интуитивно исходя из своего опыта. Далее создают уравнение вида

$$f = k_1x_1 + k_2x_2 + k_3x_3 + k_4x_4 \dots$$

где k_i и x_i вес признака и значение признака (число, ранг, при дихотомии 0 или 1)

Коэффициенты k_i в таком уравнении подбираются экспериментальным путем последовательным включением в регрессионную модель новых признаков с одновременной проверкой целесообразности их включения.

1. Вычисляется матрица парных коэффициентов корреляции всех признаков.
2. Выбирается наиболее значимая переменная
3. Проводится дисперсионный анализ.
4. Вычисляется матрица коэффициентов корреляции для оставшихся признаков.
5. Выбирается следующий признак.

Включение признаков проводится до исчерпания всех признаков, либо до превышения табличного значения критерия Фишера.

Полученное значение критерия определяет принадлежность объекта (точки, участка) к тому или иному классу. Эффективность решающего правила определяется на известных объектах.

Если признаки характеризуются числом, то процесс деления на классы можно организовать следующим образом. Мету сходства между признаками можно характеризовать матрицей парных коэффициентом корреляции.

	А	Б	В	Г	Д
А	1	0,33	0,25	0,55	0,10

Б	0,33	1	0,63	0,07	0,14
В	0,25	0,63	1	0,21	0,72
Г	0,55	0,07	0,21	1	0,22
Д	0,10	0,14	0,72	0,22	1

Далее объединяем элементы Д и В и для новых элементов вычисляем матрицу парных коэффициентов корреляции.

Иерархические (древовидные) кластер-процедуры широко используются в многомерном анализе. В таких процедурах либо начальное разбиение на классы в процессе деления приводит в конечном счете к множеству одноэлементных классов, либо одноэлементные классы объединяются до создания одного класса. Разбиение проводится на основе принятого правила определения расстояния между элементами. Вычислительные процедуры очень громоздкие.

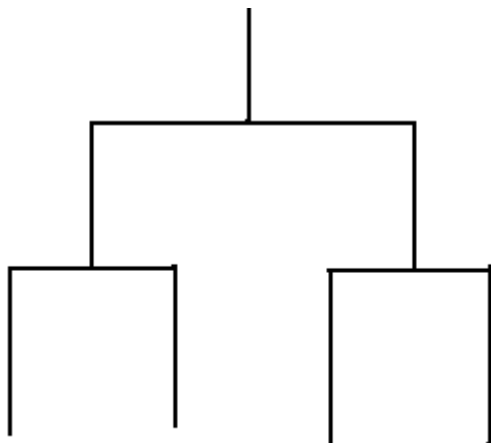
Пример. На первом этапе каждое измерение рассматривается как отдельный кластер. Далее определяются расстояния между всеми элементами. Затем два ближайших элемента объединяются в единый кластер.

	1	2	3	4
А	5	8	6	9
Б	6	9	5	7

Матрица расстояний

0	4,3	1,41	4,2
4,3	0	4,4	2,1
1,41	4,4	0	2,1
4,2	2,1	2,1	0

Объединяем 3 и 4 элементы



Дендограмма

В многомерный анализ включают процедуру анализа равенства средних векторов нескольких наборов данных. Метод главных компонент.

Факторный анализ.

Если признак принимает только два значения, то для его описания можно использовать биномиальное распределение. Оценки математического ожидания и среднеквадратического отклонения

Для 95% надежности $t=1,96$. Для оценки связи между признаками определяется точным критерием Фишера

Мерой степени сходства между признаками

Коэффициенты связанности Юла

Рассмотрим частоты двух дихотомических признаков FLT и NPM1

	FLT+	FLT-	Маргинальные частоты
NPM1+	4	5	9
NPM1-	4	41	45
	8	46	54

Точный критерий Фишера=7,51

Мера сходства $\Phi=0,37$. Коэффициенты связанности $Q=0,76$ $Y=0,48$

Признаки слабо связаны

Признаки

	NPM1+	NPM1-	
KIT+	1	7	8
KIT-	2	34	36
	3	41	44

Значение точного критерия Фишера=0.50 Мера сходства $\Phi=0.1$

Коэффициенты связанности

Обобщенная схема иерархической оценки перспективных площадей, выделяемых на прогнозно-геофизических картах

- Анализ результирующих прогнозно-геофизических карт, построенных методом аналогий с использованием различных эталонов («натурных», «модельных», «ситуативных»);
- Пространственное сопряжение перспективных площадей с элементами структурно-тектонического строения, выявленными по комплексу данных;
- Непротиворечивость прогнозных построений общей геологической модели перспективной территории;
- Пространственная совмещенность прогнозируемых объектов разных иерархических уровней (рангов);

- Использование минерагенической информации в качестве «внешнего» критерия оценки результатов геофизического прогноза

- Детализация общей геологической модели перспективной территории в виде содержательных текстовых и картографических описаний (качественных признаков)

Многоуровневый прогноз на основе последовательной пространственной совмещенности аномальных геологических объектов соседних иерархических уровней (конгруэнтности)

ВНИМАНИЕ! Усреднение вероятностей правомерно лишь при сравнительно одинаковой информативности используемых геофизических критериев прогноза. В противном случае результаты интерпретации с использованием формальной оценки перспективности могут оказаться ошибочными (переоцененная перспективность одних площадей и недооцененная перспективность других).

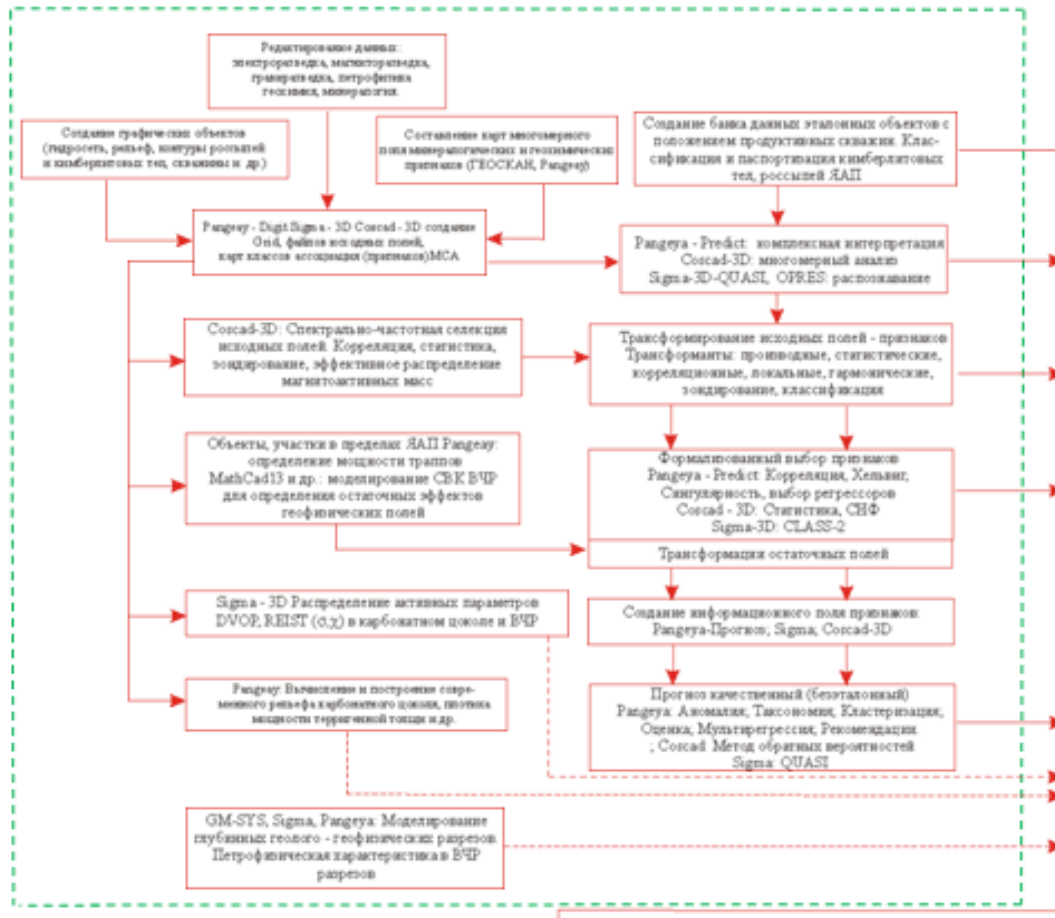
Результаты формализованной камеральной оценки перспективных площадей пространственно сопрягаются с имеющимися в наличии слоями минерагенической информации и позволяют обоснованно выбирать *интерпретационные* профили в качестве прообразов реальных заверочных профилей

При оценке перспективных площадей настоятельно рекомендуется использовать статистические алгоритмы с возможностью учета *различной* информационной содержательности геоданных. Использование вероятностных моделей соответствует нечетким представлениям об искомым объектах прогноза в реальных геологических условиях

Для сокращения многозначности при сопоставлении результатов прогнозного районирования перспективных территорий, обусловленной несоответствием применяемых моделей реальным геологическим объектам, предлагается *синтез* автоматизированных методов безэталонной и эталонной классификации

Блок-схема многомерной интерпретации геолого-геофизических данных для ЯАП

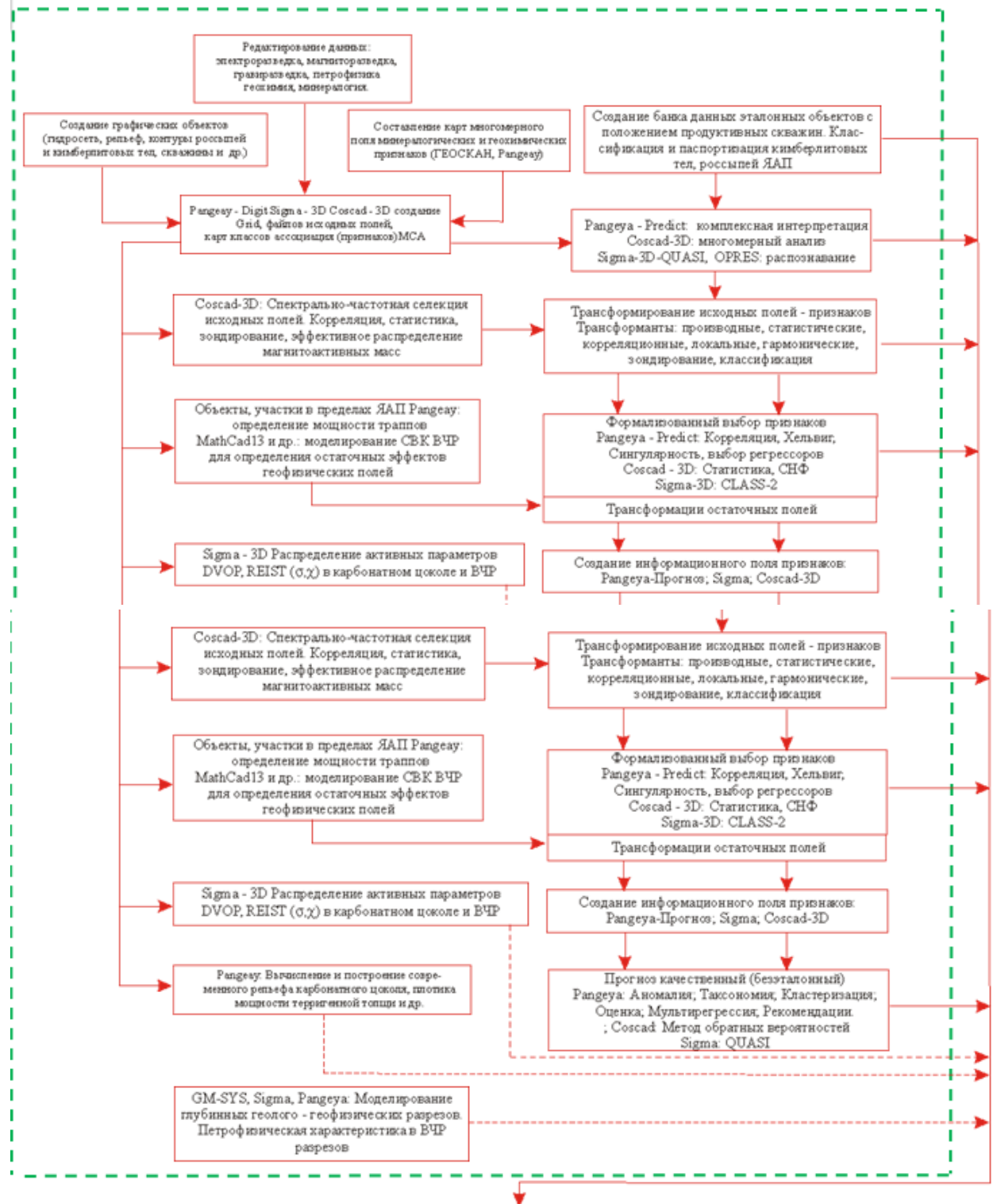
I Этап - качественный



Результаты I этапа

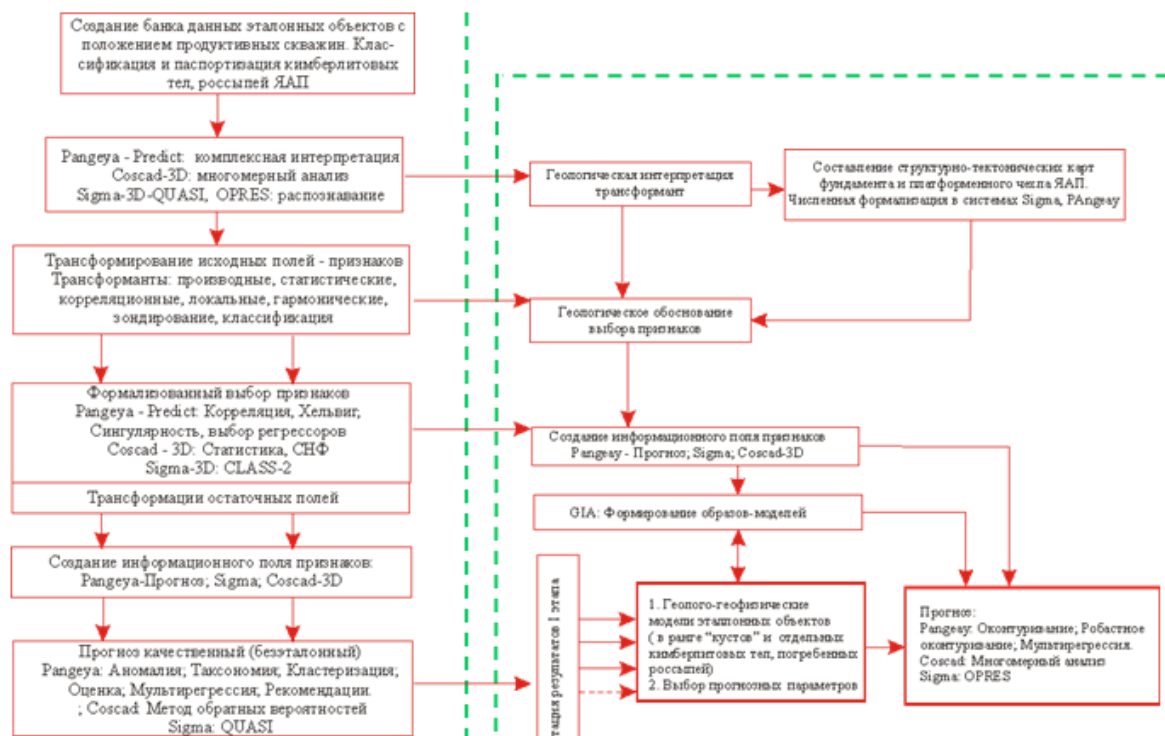
1. Трансформации остаточных полей
2. Карта таксонов
3. Карта кластеров
4. Карта безэталонной классификации
5. Карта распределения статистических параметров
6. Карта перспективности участков

I Этап - качественный



Блок-схема многомерной интерпретации геолого-геофизических данных для ЯАП

II Этап - интерпретация



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебно-методическому
комитету
С.А. Уиоров



МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТА

по дисциплине

ЭЛЕКТРОННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Специальность:

21.05.03 Технология геологической разведки

форма обучения: очная, заочная

Автор: Сковородников И. Г., Кузин А. В.

Екатеринбург

2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	5
1. Назначение первичных преобразователей, их характеристики и классификация.....	5
Контрольные вопросы.....	11
2. Преобразователи параметрического типа.....	12
2.1. Резистивные преобразователи.....	12
2.1.1. Контактные преобразователи.....	12
2.1.2. Реостатные преобразователи.....	13
2.1.3. Тензометрические преобразователи.....	16
2.1.4. Электролитические преобразователи.....	19
2.1.5. Терморезистивные преобразователи.....	21
2.1.6. Магниторезистивные преобразователи.....	23
2.1.7. Фотоэлектрические преобразователи.....	25
2.2. Индуктивные преобразователи.....	26
2.2.1. Индуктивные преобразователи с изменяемым воздушным зазором.....	27
2.2.2. Магнитоупругие преобразователи.....	29
2.2.3. Магнитомодуляционные преобразователи.....	30
2.3. Емкостные преобразователи.....	34
Контрольные вопросы.....	35
3. Преобразователи генераторного типа	36

3.1. Преобразователи индукционной э.д.с.....	36
3.1.1. Преобразователи индукционной э.д.с. со взаимным перемещением магнита и катушки индуктивности.....	36
3.1.2. Преобразователи индукционной э.д.с. со стационарным размещением магнита и катушки индуктивности.....	38
3.2. Преобразователи гальваномагнитной э.д.с.....	41
3.2.1. Преобразователи Холла.....	41
3.2.2. Преобразователи Виганда.....	42
3.3. Преобразователи пьезоэ.д.с.....	44
3.4. Преобразователи термоэ.д.с.....	45
3.5. Преобразователи фотоэ.д.с.....	46
Контрольные вопросы.....	49
4. Радиационные преобразователи.....	49
4.1. Газоразрядные детекторы.....	50
4.2. Сцинтилляционные детекторы.....	53
4.3. Полупроводниковые детекторы.....	56
Контрольные вопросы.....	56
Литература.....	57

ПРЕДИСЛОВИЕ

Цель данного пособия – познакомить студентов с применением различных электрических датчиков в геофизической аппаратуре, облегчить им усвоение соответствующих разделов курса «Геофизическая аппаратура» и выполнение курсового проектирования по нему.

Необходимость издания пособия обусловлена тем, что в опубликованных работах по первичным преобразователям рассматриваются датчики общетехнического применения, в то время, как датчики разнообразной геофизической аппаратуры имеют ряд особенностей, связанных со спецификой условий их эксплуатации.

В пособии рассмотрены физические основы и устройство датчиков всех типов, входные и выходные параметры, указаны их достоинства и недостатки и приведены примеры применения в конкретной геофизической аппаратуре.

В качестве примеров в ряде случаев использованы оригинальные разработки автора.

В конце каждой главы приведен перечень контрольных вопросов для самостоятельной проверки усвоения материала студентами.

1. НАЗНАЧЕНИЕ ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ И КЛАССИФИКАЦИЯ

Первичные преобразователи в геофизической аппаратуре (ГА) являются теми элементами, которые вырабатывают сигнал информации об измеряемой величине. По этой причине первичные преобразователи ГА называются также измерительными преобразователями. Другими синонимами термина «первичный преобразователь» являются «датчик», «детектор», «чувствительный

элемент», «сенсор», «трансмиситтер» [4,15,23]. Правда, в специальной литературе существуют различные толкования термина «датчик», наиболее распространенного из перечисленных терминов. Так, например, в монографии К. Бриндли [4], датчик рассматривается как пассивный преобразователь, т.е. преобразователь получающий энергию для своей работы от измеряемой величины. В других источниках [1,16] под датчиком понимается конструктивно законченное устройство, которое, кроме первичного преобразователя, может содержать и другие элементы (усилитель сигнала, источник питания и т.п.) и которое устанавливается на удалении от наблюдателя. В данном пособии, как и в большей части специальной литературы, термин «датчик» будет использоваться как синоним первичного или измерительного преобразователя.

Важнейшими характеристиками датчиков служат: чувствительность, точность (достоверность) информации об измеряемой величине, надежность и долговечность, стабильность работы при изменении внешних условий, быстродействие, вид зависимости выходного сигнала от измеряемой величины (линейная, нелинейная, реверсивная, нереверсивная и т.п.).

Поясним некоторые из перечисленных характеристик.

Чувствительность преобразователя, которую также называют **коэффициентом передачи**, представляет собой отношение изменения выходного сигнала y , к изменению входного сигнала x . Различают три вида коэффициентов передачи: статический, относительный и дифференциальный.

Статический коэффициент передачи используется для определения свойств преобразователей с линейной характеристикой: $K_{ст}=y/x$.

Дифференциальный коэффициент передачи применяется для датчиков с нелинейной характеристикой: $K_{диф}=\lim \Delta y/\Delta x \approx dy/dx$. Значение этого коэффициента непостоянно и зависит от величины входного сигнала x .

Относительный коэффициент передачи равен отношению относительного изменения сигнала на выходе датчика к относительному изменению сигнала на его вход $K_{отн}=(\Delta y/y)/(\Delta x/x)$. Этот коэффициент является величиной

безразмерной и удобен для сравнения свойств преобразователей, различных по принципу действия и конструкции.

У некоторых измерительных преобразователей вследствие трения покоя, шумов измерительной схемы, гистерезиса и др. причин изменение выходного сигнала появляется только тогда, когда измеряемая величина достигает определенного уровня. Этот уровень называется порогом **чувствительности** x_n .

Во время работы первичного преобразователя на него, кроме измеряемой величины, воздействуют и другие сигналы – помехи, например, изменения температуры, внешнего давления, вибрации, изменения напряжения питания и пр. Результаты воздействия помех проявляются в виде погрешностей измерений: абсолютных, относительных, приведенных.

Абсолютная погрешность – это разность между измеренным y и действительным (расчетным) значениями выходной величины y_0 : $\Delta y = y_{\text{изм}} - y_0$.

Относительная погрешность – это отношение абсолютной погрешности к действительному значению выходной величины в процентах: $\delta = (\Delta y / y_0) \cdot 100$.

Приведённая погрешность – это отношение абсолютной погрешности к наибольшему действительному значению выходной величины: $\varepsilon = \Delta y / y_{\text{max}}$. Для измерительных приборов приведенная погрешность определяет их класс точности.

В зависимости от режима, для которого определяется абсолютная или относительная погрешность, различаются **статические** и **динамические** погрешности (ошибки). Приведенная погрешность определяется только для установившегося (статического) режима [10].

Характер зависимости выходного сигнала от измеряемой величины $y = f(x)$ в установившемся режиме называется **статической** характеристикой преобразователя.

Наиболее удобными в работе и потому наиболее распространенными являются датчики, имеющие линейную характеристику. Если характеристика

датчика нелинейна, то для формирования выходного сигнала могут применяться системы линеаризации. В некоторых случаях, например, если измеряемая величина изменяется нелинейным образом, удобнее использовать преобразователи с нелинейной статической характеристикой.

В зависимости от того, как на выходную величину влияет изменение знака измеряемой величины, статические характеристики бывают: **нереверсивными** (когда знак выходного сигнала остается постоянным во всем диапазоне измерений) и **реверсивными** (когда выходной сигнал изменяет свой знак вслед за измеряемой величиной).

Следует упомянуть еще одну из характеристик измерительных преобразователей – **гистерезис**, который проявляется в несовпадении значений выходного сигнала при одном и том же значении измеряемой величины в зависимости от уменьшения или увеличения последней в момент измерения.

Надежность преобразователя – это способность работать в течение определенного периода времени при заданных условиях эксплуатации.

Надежность преобразователей, так же, как надежность, сложных электронных или механических устройств вообще, характеризуется вероятностью безотказной работы, средним временем безотказной работы и интенсивностью отказов – отношением числа отказавших устройств в определяемый промежуток времени к числу работоспособных в начале этого промежутка.

График зависимости интенсивности отказов от времени эксплуатации имеет характерную корытообразную форму. Первый участок графика ($0 - t_1$) называется "временем приработки", в этот период интенсивность отказов велика из-за того, что здесь проявляются дефекты сборки, выходят из строя некондиционные детали и т. п. Второй участок $t_1 - t_2$ называется "периодом условной долговечности», здесь отказы могут быть связаны, в основном, со случайными причинами. Третий участок $t_2 - \infty$ называется "периодом старе-

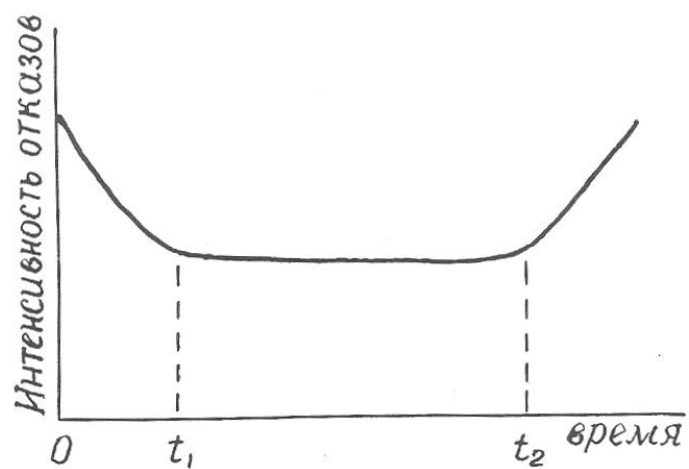


Рис. 1.1. Зависимость и интенсивности отказов от времени эксплуатации преобразователя

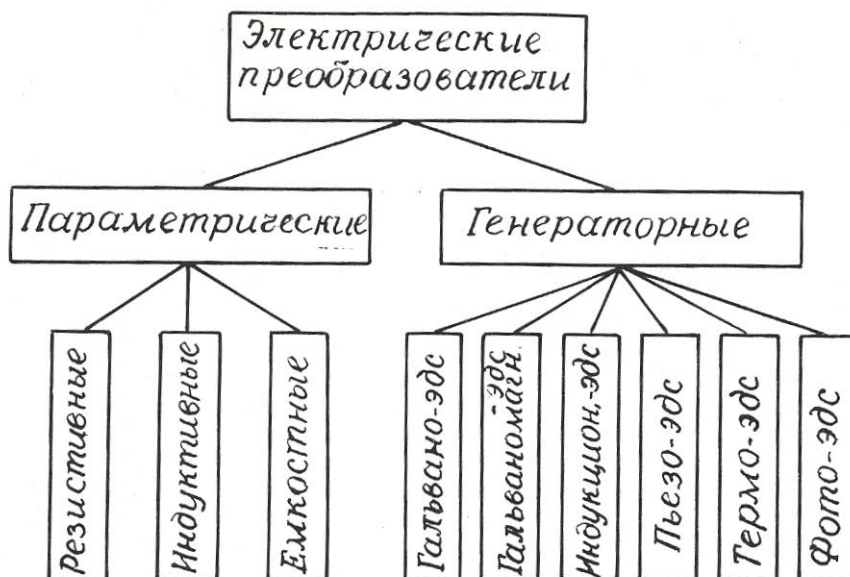


Рис. 1.2. Классификация электрических преобразователей

ния», здесь интенсивность отказов растет из-за того, что детали преобразователя вырабатывают свой ресурс (рис. 1.1).

Пути повышения надежности преобразователей – это упрощение их устройства, использование элементов с большой вероятностью безотказной работы, «разгруженный» режим эксплуатации.

подавляющее большинство датчиков геофизической аппаратуры преобразуют измеряемую величину в электрический сигнал, хотя имеются датчики, например, в гравиразведочных приборах, выходная величина которых не является электрической.

Электрические преобразователи, применяемые в геофизической аппаратуре, крайне разнообразны по принципу действия и конструкции.

Основными признаками, позволяющими классифицировать датчики, являются: назначение, принцип действия, вид входного и выходного сигналов, наличие или отсутствие источников питания.

По назначению электрические датчики делятся на преобразователи неэлектрических величин в электрические и преобразователи одних электрических величин в другие. Соответственно входные величины измерительных преобразователей могут иметь как электрическую, так и неэлектрическую природу. Это могут быть характеристики различных физических полей (например, магнитная индукция, температура, сила тяжести, э.д.с. естественных электрических полей), разнообразные свойства горных пород, руд и растворов (плотность, электрическое сопротивление, магнитная восприимчивость, радиоактивность), геометрические и технические параметры буровых скважин (их диаметр, углы искривления), скорость перемещения, механические усилия и т. д.

Выходными величинами электрических датчиков могут, быть: э.д.с., сила тока, частота тока, импульсы тока или комбинации импульсов различной длительности и амплитуды, а также сопротивление, емкость или индуктивность электрической цепи.

По принципу действия электрические преобразователи делятся на **параметрические**, изменяющие пассивные элементы электрической цепи (сопротивление, емкость, индуктивность), и **генераторные**, вырабатывающие э.д.с. различной физической природы. В свою очередь, среди параметрических датчиков выделяются: резистивные, емкостные и индуктивные, а среди генераторных: датчики гальванической, гальваномагнитной, индукционной, фото-, пьезо- и термоэ.д.с. (рис. 1.2).

Особняком стоят радиационные преобразователи (детекторы радио-активных излучений), которые имеют сложную структуру.

Каждый из видов датчиков, изображенных на рис. 1.1, имеет свои разновидности, отличающиеся по конструктивному исполнению.

По наличию или отсутствию специальных источников питания датчики подразделяются на **пассивные**, получающие энергию от измеряемой величины, и **активные**, питающиеся от внешнего источника.

В следующих разделах пособия будут рассмотрены физические свойства, особенности конструкции, достоинства и недостатки, а также примеры применения в конкретных образцах геофизической аппаратуры всех видов датчиков, представленных на рис. 1.2.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение измерительного преобразователя.
2. Какие синонимы существуют у термина «измерительный преобразователь»?
3. Что такое чувствительность преобразователя?
4. Назовите виды коэффициентов передачи датчика.
5. Назовите виды погрешностей преобразователей, укажите, какие причины их вызывают.
6. Что такое статическая характеристика преобразователя?
7. Что такое надежность преобразователя?
8. Поясните график зависимости интенсивности отказов от времени (рис. 1.1).

9. По каким признакам производят классификацию электрических преобразователей?
10. Назовите входные и выходные величины электрических преобразователей в геофизической аппаратуре.
11. На какие две большие группы делятся электрические преобразователи по принципу действия?
12. Поясните классификацию преобразователей, приведенную на рис. 1.2.

2. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА

2.1. Резистивные преобразователи

В преобразователях этого вида изменения измеряемого параметра преобразуются в изменения **активного сопротивления** электрической цепи.

В соответствии с выражением $R = \rho \cdot l / S$ (2.1) изменения сопротивления R могут происходить за счет изменения геометрических размеров проводника (длины l и поперечного сечения S) или его удельного сопротивления ρ . К преобразователям с изменяемыми размерами относятся контактные, реостатные, потенциометрические, тензометрические, угольные и электролитические датчики. К преобразователям с изменяемым удельным сопротивлением – электролитические, терморезистивные и некоторые фотоэлектрические датчики.

2.1.1. Контактные преобразователи

Контактные преобразователи представляют собой простейшую разновидность преобразователей резистивного типа. В одном крайнем положении их сопротивление равно бесконечности, в другом близко к нулю.

Работой контактных преобразователей могут управлять механические (линейное или угловое перемещение) или различные физические параметры (температура, магнитное поле, электрический ток).

Контактные преобразователи составляют основу большинства реле, широко применяемых в системах автоматического управления [8,11]. В последнее время широкое распространение получили **герконы** – миниатюрные герметизированные контактные преобразователи, управляемые магнитным полем.

Достоинства контактных преобразователей составляют их простота и малая стоимость, универсальность (они могут работать в цепях как постоянного, так и переменного тока); недостатки – искрение и «дребезг» контактов, возможность ложных срабатываний контактов от тряски.

В геофизической аппаратуре контактные преобразователи используются в различных измерителях постоянных напряжений для преобразования этих напряжений в переменные, которые потом подвергаются усилению на электронных усилителях. Примером могут служить электроразведочные измерители ЭСК-1, АТ-72, самопишущие каротажные потенциометры ПАСК-8 и ПАСК-9. Контактные преобразователи используются также в схемах управления многочисленных скважинных приборов (в пластовом наклонном НП-3, расходомерах с раскрывающимся пакером и др.).

Герконы используются в скважинных расходомерах РСМ, РГД, ДГД и др. [21].

2.1.2. Реостатные преобразователи

Простейший реостатный преобразователь – это переменный резистор, подвижный контакт которого перемещается вследствие изменения измеряемой величины – линейного перемещения, давления, угла наклона, направления магнитного поля и т.п.

Реостатный преобразователь (рис. 2.1, а) может быть включен по потенцио-метрической схеме (рис. 2.1, б), в этом случае он должен быть отнесен к преобразователям генераторного типа.

Как правило, реостатные преобразователи выполняют в виде намотки из изолированной проволоки высокого сопротивления (из манганина, константана, вольфрама) на каркасе из изоляционного материала. Форма каркаса может быть различной: прямоугольной, кольцевой или более сложной конфигурации в зависимости от входного параметра и необходимой зависимости $R = f(x)$.

Проволочные реостатные преобразователи являются дискретными, т.к. непрерывному изменению входной величины x соответствует скачкообразное изменение сопротивления R определяемое переходом подвижного контакта с одного витка провода на другой. Это обуславливает и погрешность измерений, которая уменьшается с уменьшением диаметра проволоки и увеличением числа витков W . Статический коэффициент передачи реостатного датчика $K_{ст} = z \cdot W / l$, где z – сопротивление одного витка, l – длина намотки.

Обычная относительная погрешность датчиков $\delta = 0,2 - 0,5 \%$.

Преимущества реостатных датчиков: простота конструкции, малый вес и габариты, возможность включения в цепь как постоянного, так и переменного тока, возможность получения необходимой статической характеристики $R = f(x)$, недостатки: наличие подвижного механического контакта, что уменьшает надежность датчика, необходимость какого-то усилия для перемещения этого контакта, влияние температуры.

Благодаря своей простоте и универсальности реостатные преобразователи широко используются в геофизической аппаратуре для исследования скважин: в каверномерах (КФ, КМ, СКП-1 и др.), в инклинометрах (ИК-1, ИК-2, МИР-36, ИГ-36 и др.) [2,9,12], в датчиках натяжения кабеля, в некоторых уровнемерах. Так, например, в скважинном уровнемере конструкции УГИ [18,26], изменение уровня жидкости над прибором, точнее, гидростатическое давление столба жидкости над ним преобразуется в изменение уровня токопроводящей жидкост-

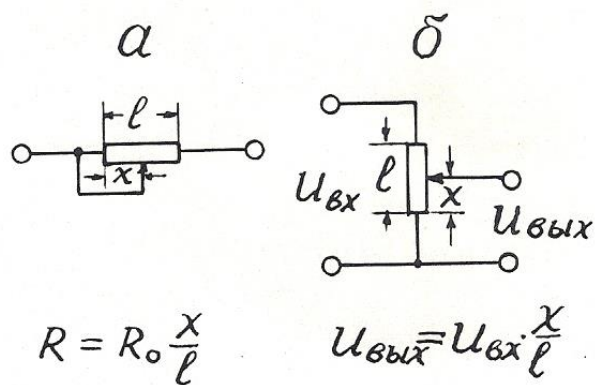


Рис. 2.1. Реостатный преобразователь (а) и его включение по потенциметрической схеме (б).

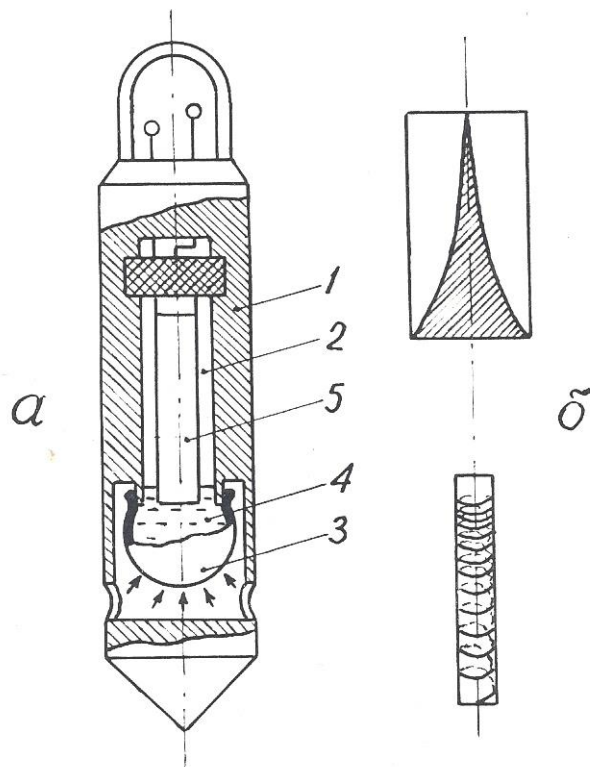


Рис. 1.2. Пример применения реостатного преобразователя в скважинном уровнемере с линейной входной характеристикой: а – конструкция уровнемера; б – варианты выполнения реостата; 1 – корпус уровнемера; 2 – измерительная камера; 3 – гибкий резервуар; 4 – токопроводящая жидкость; 5 – реостат.

ти в измерительной камере, отделенной от внешней среды гибкой оболочкой (рис. 2.2). Вдоль продольной оси камеры располагается реостатный преобразователь, подвижным контактом которого служит токопроводящая жидкость. Поскольку давление P в измерительной камере и ее объем V при постоянной температуре связаны соотношением $PV=\text{const}$ [7], то одинаковые приращения давления P (уровня жидкости) вызывают неодинаковые перемещения уровня токопроводящей жидкости в измерительной камере. Для получения линейной статической характеристики реостатный преобразователь в данном уровнемере выполнен в виде неравномерной намотки или высокоомной пленки переменной ширины таким образом, чтобы приращение сопротивления реостата было обратно пропорционально квадрату перемещения подвижного контакта, т.е. уровня токопроводящей жидкости.

2.1.3. Тензометрические преобразователи

Действие тензопреобразователей основано на изменении сопротивления проводников и полупроводников при их растяжении или сжатии [15].

Тензоэлементы (или тензорезисторы) состоят из тонкой проволоки или фольги, сложенной несколько раз в форме меандра и вклеенной между эластичными бумажными, пленочными или фетровыми подкладками. Толщина проволоки (или фольги) от 0,02 до 0,05 мм. Основные конструктивные формы тензоэлементов представлены на рис. 2.3.

Изменение электрического сопротивления тензоэлемента пропорционально относительной деформации детали в месте наклейки последнего. Относительный коэффициент передачи тензодатчика $K_{\text{отн}}=(\Delta R/R)/(\Delta l/l)$. Материал для тензоэлементов должен характеризоваться возможно большей тензочувствительностью и возможно меньшим температурным коэффициентом. Обычно используются сплавы: константан, манганин, нихром, а также чистые металлы: никель, висмут. Очень высокую тензочувствительность, в 60-80 раз

выше, чем у металлов, имеют полупроводники: германий, кремний и др. Полупроводниковые тензоэлементы получают выращиванием кристаллов полупроводника на мембране из диэлектрического металла (например, датчики «кремний на сапфире»).

Достоинства тензорезисторных преобразователей: простота конструкций, малые габариты, высокая точность, безинерционность; недостатки: невысокая чувствительность, зависимость сопротивления от температуры.

Низкая чувствительность тензорезисторных преобразователей требует применения усилителей выходного сигнала, а термозависимость – применения специальных мер для устранения влияния температуры.

Тензопреобразователи находят применение в датчиках силы натяжения каротажного кабеля с подвесным роликом ДНТ-033 ($\delta \leq 1,5\%$ при усилии до 500 Н) [2,17], в некоторых опробователях пластов в качестве измерителей пластового давления (например, в ОПД-7-10), в некоторых скважинных уровнемерах типа погружных манометров [2].

Автором тензорезисторный преобразователь применен в расходомере РГЖ-1, не содержащем вращающихся деталей [19]. Чувствительным элементом этого прибора служат две гибкие пластины, установленные вдоль измеряемого потока. Поскольку давление в движущемся флюиде понижается, пластины прогибаются навстречу друг другу тем больше, чем выше скорость потока (рис. 2.4). Прогиб пластин преобразуется в электрический сигнал с помощью наклеенных на них тензоэлементов. Для устранения влияния температуры на пластине наклеены 4 тензоэлемента (2 вдоль нее и 2 поперек), соединенные по мостовой схеме. В одну диагональ моста подается переменный ток питания (частота 1 кГц), к другой диагонали подключен усилитель. Чувствительность описанного расходомера составляет 0,05 л/с.

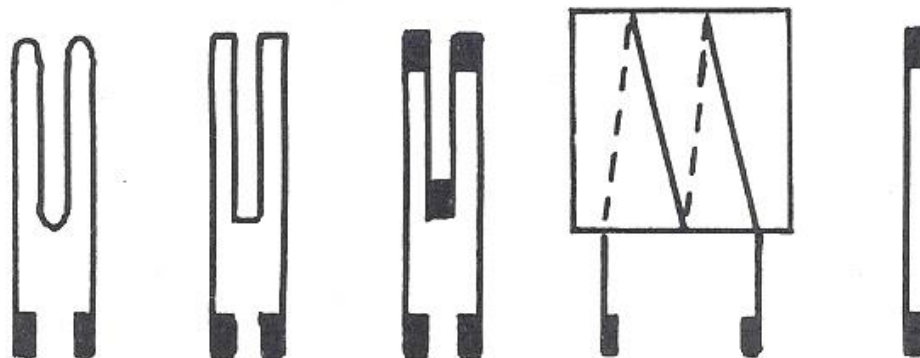


Рис. 2.3. Разновидности тензорезисторов

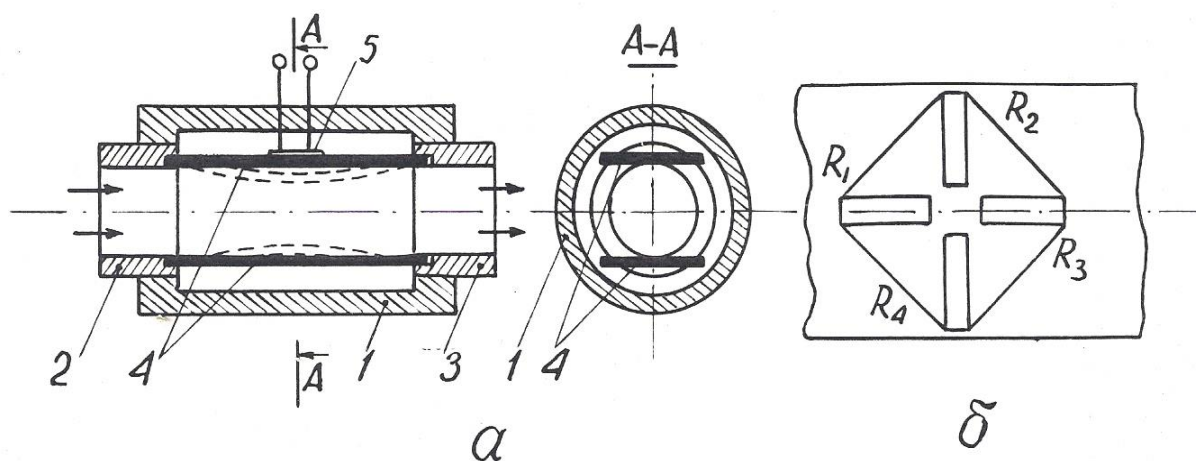


Рис. 2.4. Принцип действия расходомера РГЖ-1 (а) и размещение тензорезисторов на упругой пластине (б): 1 – корпус расходомера; 2 – входной канал; 3 – выходной канал; 4 – упругие пластины; 5 – тензометрический преобразователь прогиба пластины в электрический сигнал

2.1.4. Электролитические преобразователи

Преобразователи этого типа основаны на изменении электрического сопротивления между помещенными в электролит электродами в зависимости от расстояния между ними, площади соприкосновения с электролитом или проводимости последнего (2.1). Электролитические датчики используются для измерения угловых и линейных перемещений, а также для определения сопротивления электролита. Во избежание погрешностей, связанных с электролизом и электродной поляризацией, их включают, как правило, в цепь переменного тока.

Достоинства датчиков этого типа заключаются в простоте конструкции и способности пропускать большие токи; недостатки – в зависимости сопротивления электролита от температуры (при изменении последней на 1° электропроводность растворов изменяется на 1,5-2,5%).

В геофизической аппаратуре электролитические датчики используются в резистивиметрах всех видов: скважинных и переносных (например, в приборе ПР-1).

Еще один пример применения датчик этого типа устройство для определения направления и скорости потока подземных вод [20]. Это устройство содержит цилиндрическую измерительную камеру с перфорированными стенками, по окружности которой размещены радиальные электроды а в середине – центральный (рис. 2.5). Каждый из электродов подсоединен к своей жиле многожильного каротажного кабеля (например, кабеля КГ17-60-180ШМ. Внутри камеры располагается также магнитная стрелка с экраном из изоляционного материала на северном конце. Измерительная камера закрывается крышкой и заполняется электролитом через специальные отверстия в ней. Затем устройство опускают в скважину и устанавливают напротив исследуемого водоносного горизонта. По кабелю

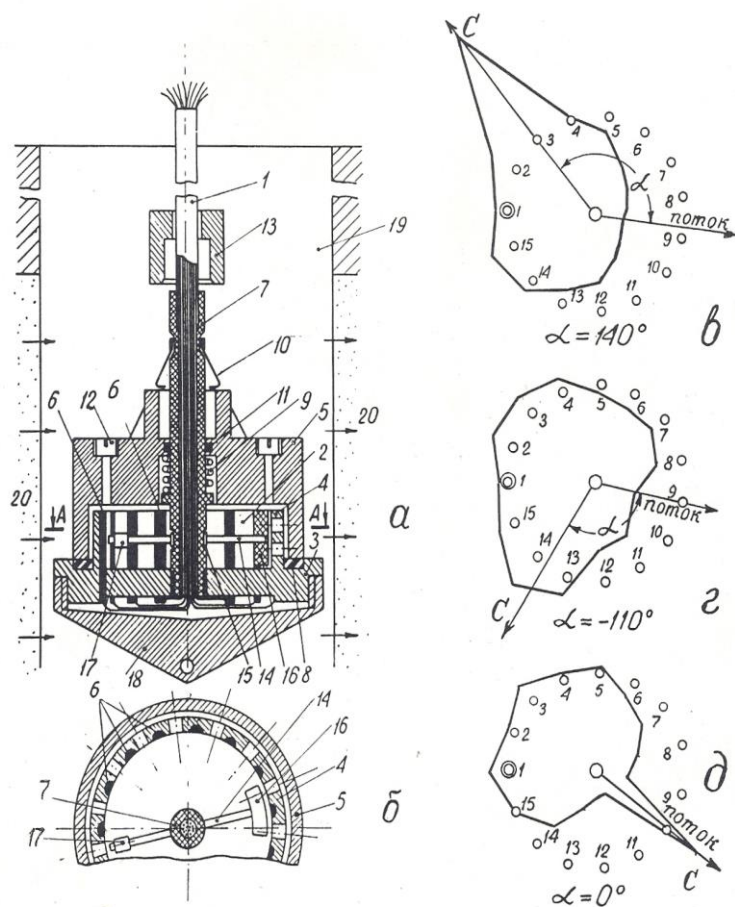


Рис. 2.5. Устройство для определения направления и скорости потока (а, б) и результаты измерений магнитного азимута потока (в-д): 1 – многожильный каротажный кабель; 2 – измерительная камера; 3 – изоляционный диск; 4 – перфорированные стенки камеры; 5 – крышка; 6 – радиальные электроды; 7 – центральный электрод; 8 – резиновая прокладка; 9 – сжатая спиральная пружина; 10 – пружинные защелки; 11 – резиновое кольцо; 12 – заливная пробка; 13 – сбивающий грузик; 14 – магнитная стрелка; 15 – скользящий подшипник; 16 – изоляционный экран; 17 – противовес; 18 – нижний наконечник.

опускают сбивающий грузик, который приводит в действие пружину, отбрасывающую крышку вверх по кабелю. Движением подземных вод электролит из измерительной камеры вымывается по направлению потока через перфорацию в стенках. Магнитная стрелка ориентируется по направлению магнитного меридиана, а экран на ее северном конце перекрывает один из радиальных электродов. На поверхности производят измерения электрического сопротивления между центральным и каждым из радиальных электродов. Минимальное сопротивление указывает направление потока подземных вод, а максимальное – направление на север. Скорость потока определяют по скорости вымывания электролита из измерительной камеры, повторяя измерения через определенные интервалы времени. При использовании 17-жильного кабеля устройство обеспечивает абсолютную погрешность в измерении направления потока, не превышающую $\pm 12^\circ$.

2.1.5. Терморезистивные преобразователи

Терморезистивные преобразователи основаны на свойстве металлов и полупроводников изменять свое сопротивление под действием температуры T .

Зависимость сопротивления металлов от температуры в общем случае нелинейна, однако, для ограниченных интервалов температур ее можно представить в виде линейной двучленной функции $R_T = R_0[1 + \alpha(T - T_0)]$, где R_0 – сопротивление при начальной температуре T_0 , а α – температурный коэффициент сопротивления для интервала $T - T_0$.

Основным материалом для терморезисторов являются чистые металлы: платина, медь, никель, которые обладают в интервале от 0 до 100°C положительным $\alpha = 0,0030 - 0,0068$ (град. $^\circ\text{C}$) $^{-1}$.

Известны также объемные полупроводниковые терморезисторы (термисторы). Их сопротивление уменьшается с повышением температуры по экспоненте, в среднем для них $\alpha = 0,03 - 0,04$ (град. $^\circ\text{C}$) $^{-1}$, но значение α сильно

зависит от температуры. Чувствительность (статический коэффициент передачи) терморезисторов $K_{ст} = \Delta R / \Delta T = \alpha R_0$.

Достоинства терморезистивных преобразователей: простота конструкции, малые габариты, возможность установки в труднодоступных местах. Однако им присущи и важные недостатки. Во-первых, это постоянство α лишь в ограниченном диапазоне температур и, во-вторых, инерционность, приводящая к большим динамическим погрешностям. Как известно, термопреобразователь приобретает температуру среды по закону $\Delta T = \Delta T_0 \cdot e^{-t/\tau}$ где ΔT_0 - начальная разность температур, t – время, τ – постоянная времени преобразователя, зависящая от его конструкции и теплопроводности, а также тепловых свойств среды.

В геофизическом приборостроении преобразователи этого типа находят применение в скважинных термометрах электрических (СТС-2, ЭТМИ-55 и др.) и электронных (ТЭГ-36, ТЭГ-60 и др.).

Чувствительный элемент всех скважинных термометров представляет собой тонкую (0,02-0,03 мм) медную проволочку, сложенную в несколько раз и помещенную в тонкостенную медную трубку длиной около 30 см, омываемую скважинным флюидом [9].

Точно так же устроен чувствительный элемент скважинных расходомеров типа термоанемометров СТД-2, СТД-4 [2]. Этот термоэлемент включается в мостовую измерительную схему и нагревается до температуры, превышающей температуру исследуемого потока. Мостовая схема балансируется при размещении чувствительного элемента в неподвижной жидкости. Когда жидкость приходит в движение, она охлаждает нагретый термоэлемент, тем сильнее, чем выше скорость ее движения.

В газокаротажных станциях (АГКС-64, АГКС-4 и др. для определения суммарного газосодержания в газовоздушной смеси эта смесь подается на термочувствительный элемент в виде тонкой платиновой проволочки, нагретой до 850° С и включенной в сбалансированную мостовую схему. Если в

анализируемой смеси имеются углеводородные газы, то при 850°C они сгорают, выделяющееся тепло повышает температуру проволоочки, увеличивая ее сопротивление и нарушая баланс мостовой схемы [17].

Аналогичным образом действуют приборы для определения содержания СО в выхлопных газах автомобиля [6].

Известны также устройства для определения направления потока подземных вод [24], содержащие нагреватель и расположенные вокруг него термисторы. По измерениям температуры последних определяют, в каком направлении идет перенос тепла, т.е. происходит движение подземных вод.

2.1.6. Магниторезистивные преобразователи

Эти преобразователи основаны на свойстве некоторых материалов изменять свое электрическое сопротивление под действием магнитного поля (эффект Гаусса). Таким свойством обладает, например, сплав пермаллой (80% никеля, 20% железа). Степень изменения сопротивления магниторезистора зависит от магнитной индукции поля B и угла θ между ее направлением и направлением тока [6,16,22].

Магниторезисторы изготавливаются по тонкопленочной технологии в форме меандров (рис. 2.6).

Еще большим магнитоэлектрическим эффектом, чем сплавы металлов, обладают полупроводники (антимонид индия InSb и арсенид индия InAs).

Увеличение сопротивления магниторезисторов объясняется увеличением пути движения электронов и дырок под действием силы Лоренца.

Чувствительность магниторезистивных датчиков $K_{\text{диф}} = \Delta R / \Delta B$ зависит от величины магнитной индукции: $\Delta R = R_0 \cdot A(vB)^n$, где A – так называемый «коэффициент формы», v – подвижность электронов: n – постоянный коэффициент ($n=1-2$), зависящий от B .

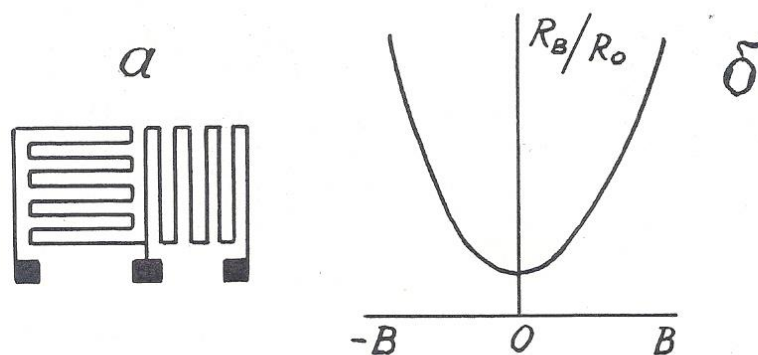


Рис. 2.6. Форма магниторезистора (а) и зависимость приращения его сопротивления от магнитной индукции (б)

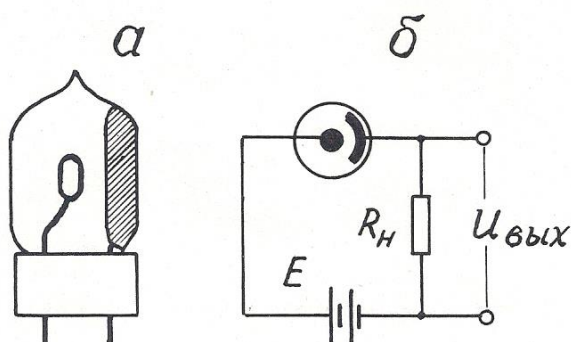


Рис. 2.7. Конструкция фотоэлемента с внешним эффектом (а) и включение его в измерительную схему (б)

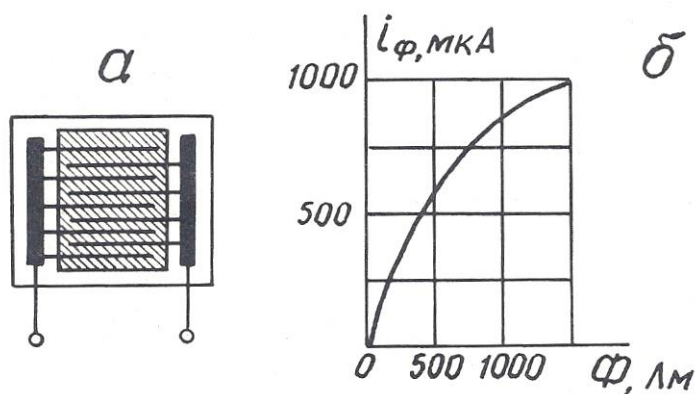


Рис. 2.8. Конструкция фотоэлемента с внутренним фотоэффектом (а) и зависимость фототока от светового потока (б)

При больших B значение $n=1$, поэтому при использовании магниторезисторов применяют магнитное смещение, помещая их в поле электромагнита с $B=0,3 - 0,5$ Тл.

Недостатки магниторезисторов: наличие температурного влияния и потребность в сильных магнитных полях.

Магниторезисторы в геофизике могут быть использованы в скважинных расходомерах и магнитных меткоуловителях каротажных станций.

2.1.7. Фотоэлектрические преобразователи

Фотоэлектрические преобразователи (фотоэлементы) основаны на явлении внешнего (электровакуумные и газонаполненные) или внутреннего (полупроводниковые) фотоэффекта.

Фотоэлемент с внешним фотоэффектом представляет собой электронную лампу с двумя электродами, один из которых (фотокатод) покрыт светочувствительным слоем (рис. 2.7). Возрастание фототока при увеличении приложенного напряжения происходит до величины тока насыщения, при котором все электроны, испускаемые фотокатодом под действием светового потока, достигают анода.

Фотоэлемент с внутренним фотоэффектом (фоторезистор) состоит из стеклянной пластины, на которой вытравлены входящие друг в друга гребневидные системы штрихов, заполненные электропроводным веществом (платина, золото). Пластина покрывается тонким слоем полупроводникового светочувствительного материала (рис. 2.8).

Чувствительность фотоэлементов $K_{\text{диф}} = \Delta R / \Delta \Phi$ непостоянна и нелинейно зависит от светового потока Φ . Кроме того, фотоэлементы обладают еще и спектральной избирательностью т.е. чувствительностью к световому излучению определенной длины волны.

Фотоэлементы могут быть использованы и в режиме источников тока, т.е. как генераторные преобразователи фотоэ.д.с.

Фотопреобразователи находят применение в приборах фотокаротажа, предназначенных для дифференциации разрезов скважин по цвету пород, в скважинных расходомерах (например, в ТСП-70Ф) в некоторых инклинометрах. Так, автором совместно с профессором. А.В.Давыдовым предложен датчик угла наклона буровой скважины для непрерывных измерений [27]. Этот датчик содержит измерительную камеру 1, частично заполненную жидкостью 2 с высоким коэффициентом поверхностного отражения, например, ртутью или сплавом Вуда, а над жидкостью соосно размещены источник света 3 и кольцевой фотопреобразователь 4 (рис. 2.9). При вертикальном положении датчика весь свет источника, отраженный от поверхности жидкости, попадает на фотопреобразователь, и сигнал на его выходе максимален. При отклонении датчика от вертикали поверхность жидкости наклоняется относительно оси камеры, и часть отраженного света уходит за пределы фотопреобразователя. Выходной сигнал уменьшается тем сильнее, чем больше зенитный угол скважины.

2.2. Индуктивные преобразователи

Принцип действия индуктивных преобразователей основан на изменении электрического сопротивления Z катушки индуктивности при изменении магнитного сопротивления ее сердечника. В свою очередь, магнитное сопротивление сердечника может быть изменено либо за счет изменения величины воздушного зазора в нем, либо за счёт изменения магнитных свойств материала, из которого он состоит.

2.2.1. Индуктивные преобразователи с изменяемым воздушным зазором

Входной величиной преобразователей этого типа обычно служат линейные или угловые перемещения. Чувствительность датчика $K_{\text{диф}} = \Delta z / \Delta x$.

Конструкции датчиков весьма разнообразны, некоторые из них, наиболее распространенные, представлены на рис. 2.10.

Независимо от конструкции датчика, его индуктивное сопротивление $z = j \omega L$, где ω – круговая частота тока в катушке; L – ее индуктивность. $L = W^2 / R_\mu$, где W – число витков в катушке; R_μ – магнитное сопротивление сердечника. $R_\mu = R_{\text{ж}} + R_{\text{в}}$, где $R_{\text{ж}}$ – магнитное сопротивление железа сердечника; $R_{\text{в}}$ – магнитное сопротивление воздушного зазора. $R_{\text{в}} \gg R_{\text{ж}}$. $R_{\text{в}} = \delta / (\mu_0 \cdot S)$, где δ – длина воздушного зазора; S – его площадь; μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость воздуха. Таким образом, $z = -j \omega W^2 \mu_0 S / \delta$, т.е. z обратно пропорционально δ и зависимость $z = f(\delta)$ нелинейна.

Линеаризовать эту зависимость удастся в конструкции так называемых «дифференциальных» индуктивных преобразователей (рис. 2.11). В этих преобразователях, используются, две катушки индуктивности, включенные в мостовую схему и расположенные таким образом, что, когда индуктивное сопротивление одной увеличивается, сопротивление другой падает.

Достоинства индуктивных: преобразователей: отсутствие открытых электрических контактов, большая мощность вырабатываемого сигнала; недостаток – наличие электромагнитного взаимодействия между катушкой и сердечником (или его подвижной частью), отсюда – так называемая «реакция преобразователя».

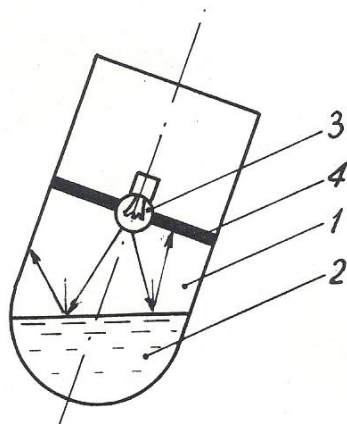


Рис. 2.9. Датчик угла наклона буровой скважины: 1 – измерительная камера; 2 – жидкость с высоким коэффициентом поверхностного отражения; 3 – источник света; 4 – кольцевой фотоприемник

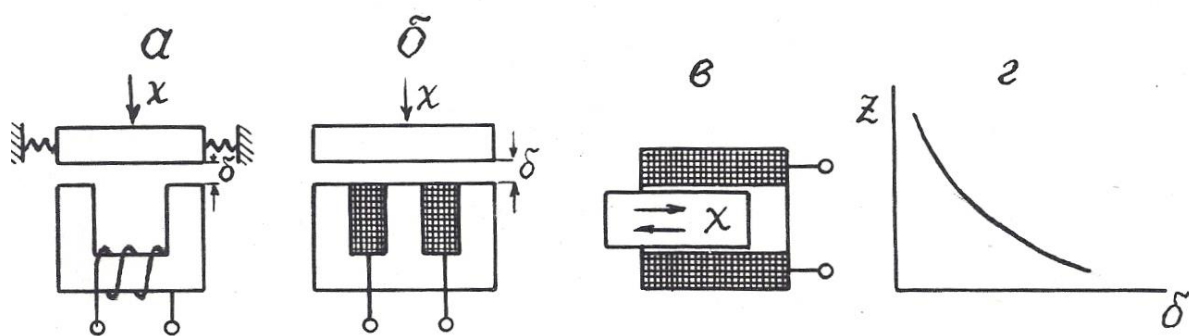


Рис. 2.10. Варианты выполнения индуктивных преобразователей с изменяемым воздушным зазором (а-в) и их статическая характеристика (г).

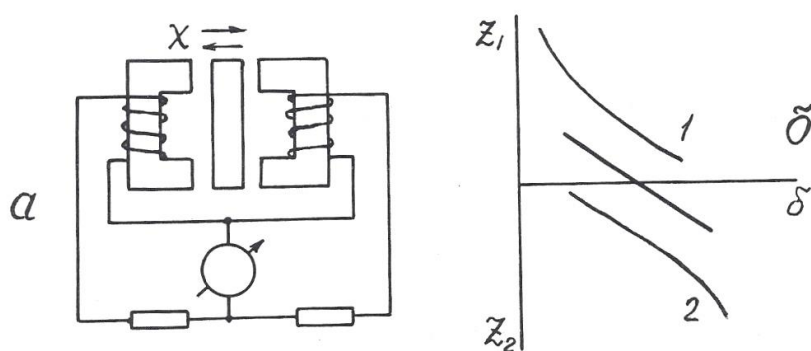


Рис. 2.11. Дифференциальный индуктивный преобразователь (а) и его статическая характеристика (б)

В геофизической аппаратуре индуктивные преобразователи находят применение в некоторых каверномерах и профилемерах (например, в профилере ПМ-50) [2], в скважинных расходомерах ДАУ-3, РСИ-3 и ГЕО-В-600 (последний венгерского производства) [21], в индуктивных дефектомерах обсадных колонн.

2.2.2. Магнитоупругие преобразователи

Эти преобразователи основаны на взаимосвязи между магнитным и механическим состоянием ферромагнитных материалов.

Различают собственно **магнитоупругий эффект**, т.е. изменение магнитных свойств, в частности, магнитной проницаемости под воздействием механических деформаций, и обратное явление – **магнитострикционный эффект**, т.е. изменение формы и размеров ферромагнитных тел под воздействием внешнего магнитного поля.

В качестве материала для изготовления магнитоупругих датчиков используют сплавы: пермаллой, пермендюр, альсифер, ферриты, а также чистые металлы, например, никель. Конструкции преобразователей изображены на рис. 2.12.

Относительный коэффициент передачи магнитоупругого датчика $K_{отн}=(\Delta\mu/\mu)/(\Delta l/l)$ составляет около 200 и не остается постоянным при изменении размеров датчика (см. рис. 2.12, д).

Достоинства магнитоупругих датчиков: простота конструкции, прочность, удобство герметизации; недостатки: нелинейная статическая характеристика, наличие резонансной частоты.

Для стержневых датчиков (см. рис. 2.12, а, б) резонансная частота $f_0=V/2l$, где V – скорость упругих волн в материале сердечника, l – его длина; для кольцевого (см. рис. 2.12, в) – $f_0=V/2d$, где d – диаметр датчика.

Магнитоупругие преобразователи находят применение в аппаратуре акустического каротажа в качестве источников (магнито-стрикционные излучатели) упругих волн [12,17], в некоторых прихватоопределителях, а также в буровой технике – в измерителях нагрузки МКМ-2 буровых станков и в измерителях давления промывочной жидкости МИД-1, МИД-1А [5].

2.2.3. Магнитомодуляционные преобразователи

Эти преобразователи основаны на изменении магнитных свойств ферромагнитных материалов под действием магнитного поля.

Сердечники магнитомодуляционных преобразователей изготавливают в форме стержня с большим отношением длины l к диаметру d : $l/d > 100$. При этом условии коэффициент размагничивания сердечника $N=0$ и даже в слабом магнитном поле, направленном вдоль его оси, сердечник намагничивается до насыщения. При этом его относительная магнитная проницаемость падает до 1, хотя при ненасыщенном состоянии она очень велика – до 10000. Для того, чтобы намагнитить сердечник до насыщения, на него наносят обмотку возбуждения, по которой пропускают переменный ток.

В моменты как падения магнитной проницаемости (при возрастании намагничивающего поля до H_s), так и восстановления ее (при уменьшении намагничивающего поля ниже H_s) в обмотке индуцируются пики э.д.с. самоиндукции противоположных знаков. Частота этих пиков вдвое превышает частоту возбуждающего тока, как это можно видеть по рис.2.13.

При воздействии на датчик внешнего постоянного магнитного поля, направленного вдоль его оси, в один из полупериодов это поле складывается с магнитным полем катушки возбуждения, и сердечник доходит до насыщения быстрее, чем вне внешнего магнитного поля, в другой полупериод внешнее поле вычитается из поля катушки возбуждения, и сердечник не доходит до

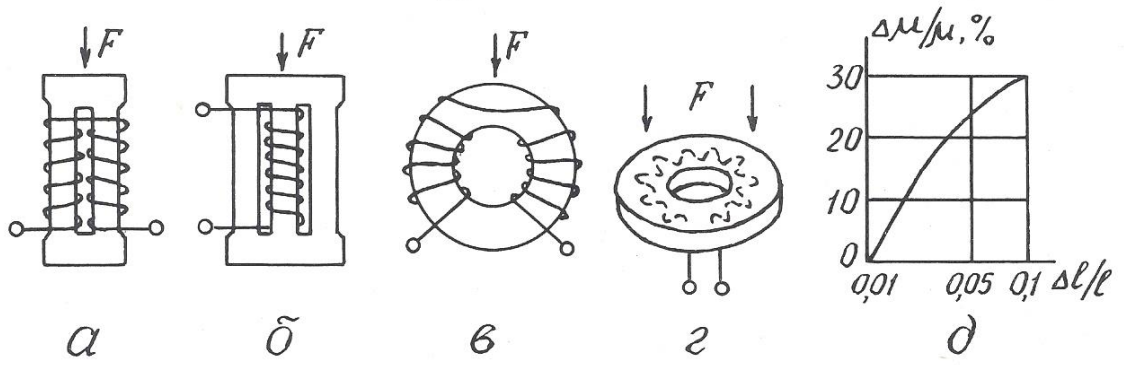


Рис. 2.12. Разновидности магнитоупругих преобразователей (а-г) и зависимость изменения магнитной проницаемости от изменения размеров преобразователя (д)

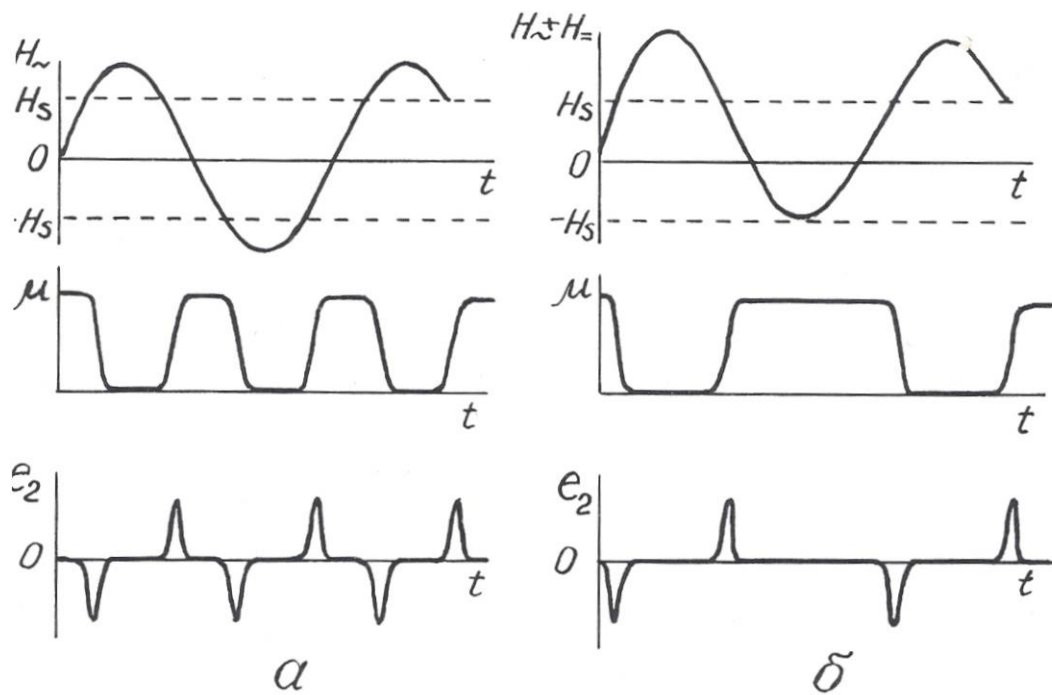


Рис. 2.13. Возникновение э.д.с. второй гармоники в магнитомодуляционном преобразователе в отсутствие (а) и при наличии (б) внешнего магнитного поля

магнитного насыщения, и нарушается симметрия перемагничивания сердечника.

Существуют 2-элементная и 1-элементная конструкции магнитомодуляционных датчиков (рис. 2.14). В 2-элементной имеются 2 параллельных сердечника, обмотки возбуждения на которых намотаны в противоположных направлениях и потому их магнитное поле имеет противоположное направление, а пики э.д.с. второй гармоники противоположны по знаку. По этой причине в сигнальной обмотке, охватывающей оба стержня, при отсутствии внешнего магнитного поля выходной сигнал равен 0. При наличии внешнего магнитного поля в один полупериод исчезает пара импульсов э.д.с. второй гармоники в одной обмотке, когда ее стержень не доходит до насыщения, в другой полупериод – не возникает такая же пара импульсов в другой обмотке возбуждения и потому на выходе сигнальной обмотки будет существовать э.д.с. второй гармоники, имеющая частоту, удвоенную по сравнению с током возбуждения. Амплитуда этой э.д.с. пропорциональна напряженности внешнего магнитного поля, а фаза определяется направлением последнего.

В одноэлементных датчиках э.д.с. второй гармоники выделяется не с помощью дополнительной сигнальной обмотки, а с помощью фильтров, настроенных на ее частоту.

Достоинства магнитомодуляционных датчиков: простота, надежность, отсутствие открытых электрических контактов, высокая чувствительность; недостаток – необходимость в сложной измерительной схеме, обеспечивающей питание датчика переменным током, а также выделение и усиление сигнала второй гармоники. Дополнительный недостаток 2-элементных датчиков – большое количество выводов.

Магнитомодуляционные преобразователи находят широкое применение в магнитометрической аппаратуре – 2-элементные в полевых (М-17) и аэромагнитометрах (АММ-13, АСГМ-46) [3], 1-элементные – в скважинных

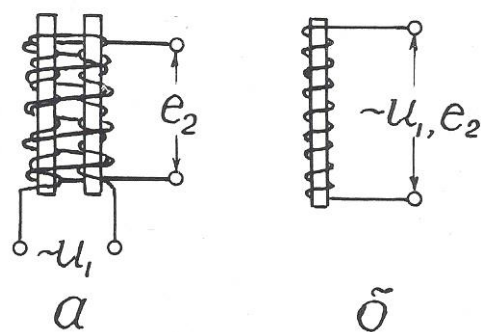


Рис. 2.14. Конструкция 2-элементного (а) и 1-элементного (б) магнитомодуляционного преобразователя

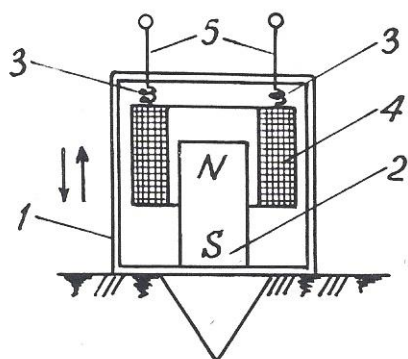


Рис. 3.1. Сейсмоприемник магнитоэлектрического типа: 1 – корпус; 2 – постоянный магнит; 3 – пружинки; 4 – катушка индуктивности; 5 – электрические выводы

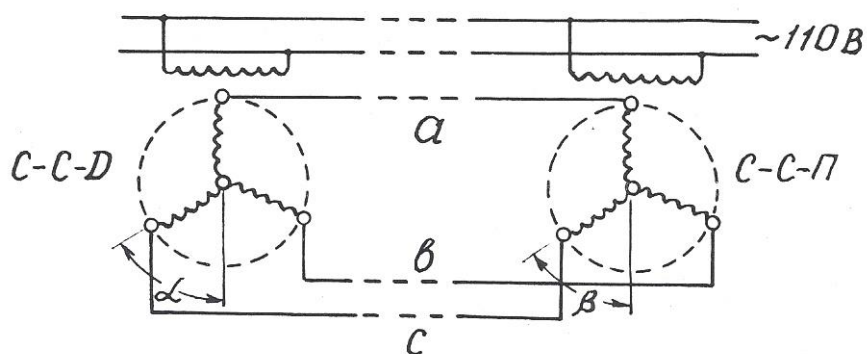


Рис. 3.2. Электрическая схема сельсинной передачи

магнитометрах ТСМ-3, ТСМК-40, ТСМК-30, КСМ-38 и др. [12,17]. Они используются также в скважинных расходомерах РЭТС-2 и магнитных меткоуловителях каротажных станций.

2.3. Емкостные преобразователи

Преобразователи этого вида основаны на изменении емкости C конденсатора под действием измеряемой величины.

Как известно, $C = \epsilon S / \delta$ (2.2), где S – площадь обкладок конденсатора; δ – расстояние между ними; ϵ – диэлектрическая проницаемость среды между обкладками. Следовательно, изменять емкость можно путем воздействия измеряемой величины либо на геометрические размеры датчика, либо на его диэлектрическую проницаемость. При этом очевидно, что датчики с изменяемыми параметрами S и ϵ имеют линейную статическую характеристику, а датчики с изменяемой величиной δ – нелинейную. В последнем случае для линеаризации характеристики возможно применение дифференциальных емкостных преобразователей, аналогичных по конструкции дифференциальным индуктивным датчикам.

Входными величинами емкостных датчиков могут быть линейные и угловые перемещения, механические усилия, деформации, изменение состава вещества.

Достоинства емкостных датчиков: высокая чувствительность, безинерционность, стабильность; недостаток – малая выходная мощность.

Датчики этого вида используются в аппаратуре диэлектрического каротажа ДК-1. Чувствительный элемент этой аппаратуры представляет собой цилиндрический конденсатор больших размеров, емкость которого зависит от диэлектрической проницаемости окружающих горных пород [2].

В так называемых «аквамерах» – приборах для определения количества воды в смесях «вода-нефть», откачиваемых из буровых скважин, также

применяется емкостной датчик. Действие этого прибора основано на том, что у воды $\epsilon=81$, а у нефти $\epsilon=2,5$ отн.ед. (при температуре 18^0C)

В некоторых скважинных термометрах используются в качестве частото задающего элемента в схеме RC -генератора конденсаторы, емкость которых зависит от температуры.

Кроме того, известны скважинные емкостные измерители зенитного угла [25]. Их чувствительный элемент – конденсатор, одна обкладка которого представляет собой металлическую изолированную полусферу, установленную перпендикулярно оси прибора, а другая обкладка – залитую в эту сферу ртуть. При вертикальном расположении датчика емкость его максимальна, при наклоне – уменьшается.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные характеристики контактных преобразователей и приведите примеры их применения в геофизической аппаратуре (ГА).
2. Назовите основные характеристики реостатных преобразователей, приведите примеры их применения в ГА.
3. Назовите основные характеристики тензометрических преобразователей и приведите примеры их применения.
4. Назовите основные характеристики электролитических преобразователей и приведите примеры их применения в ГА.
5. Назовите основные характеристики терморезистивных преобразователей и приведите примеры их применения в ГА.
6. Назовите разновидности и основные характеристики фоторезистивных преобразователей, приведите примеры применения их в ГА.
7. Назовите разновидности индуктивных преобразователей.
8. Поясните принцип действия индуктивных преобразователей с изменяемым воздушным зазором, приведите примеры их применения в ГА.
9. Поясните принцип действия магнитоупругих преобразователей, приведите примеры их применения в ГА.

10. Поясните принцип действия магнитомодуляционных преобразователей, приведите примеры их применения.

11. Назовите основные характеристики емкостных преобразователей и приведите примеры их применения.

3. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ГЕНЕРАТОРНОГО ТИПА

Во всех генераторных преобразователях выходной величиной является э.д.с., появляющаяся в результате воздействия измеряемой величины.

3.1. Преобразователи индукционной э.д.с.

Эти преобразователи основаны на явлении электромагнитной индукции, возникающей при воздействии на проводник переменного магнитного поля.

Изменение магнитного поля, воздействующего на проводник или, точнее, на катушку индуктивности, достигается либо за счет перемещения катушки относительно постоянного магнита, либо за счет изменения магнитного поля при неизменном расположении магнита и катушки индуктивности.

3.1.1 Преобразователи индукционной э.д.с. со взаимным перемещением магнита и катушки индуктивности

Э.д.с., возникающая в катушке индуктивности, зависит от следующих факторов: $e = BVlW \sin \alpha$, где B – магнитная индукция; V – относительная скорость перемещения; α – угол между векторами V и B , l – длина витка и W – число витков в катушке.

Преобразователи этого вида широко используются в геофизической аппаратуре. Примером могут служить сейсмоприемники магнито-электрического типа (С210, СВ1-30 и др.), принцип действия которых

иллюстрируется рис. 3.1 [3]. С корпусом приемника 1 жестко скреплен постоянный магнит 2. Над магнитом на пружинках 3 подвешена катушка индуктивности 4 с электрическими выводами 5. При колебаниях поверхности, на которой установлен сейсмоприемник, происходят взаимные перемещения магнита 2 и катушки индуктивности 4, и в последней наводится э.д.с.

Другой пример использования датчиков этого вида – автосинная (или сельсинная) передача, которая применяется в каротажных станциях для синхронизации движения носителя записи (диаграммной или магнитной ленты) с перемещением зонда по скважине [12]. Принципиальная схема сельсинной передачи представлена на рис. 3.2. Передача содержит, по меньшей мере, две идентичных электрических машины, у которых статор имеет однофазную обмотку с явно выраженными полюсами, а ротор – трехфазную обмотку с неявно выраженными полюсами. Одна машина, называемая сельсином-датчиком (ССД), устанавливается на блок-балансе, через который в скважину опускается кабель со скважинным снарядами. При движении кабеля по скважине блок-баланс через зубчатую передачу приводит во вращение ротор сельсина-датчика. Другая машина, называемая сельсином-приемником (ССП), устанавливается в регистрирующем приборе каротажной станции и играет роль привода его лентопротяжного механизма. Обмотки роторов ССД и ССП включены навстречу друг другу, а обмотки статоров питаются переменным током промышленной частоты от одного и того же источника. Переменный ток создает в обмотках статоров пульсирующие магнитные потоки, которые индуцируют в роторных обмотках э.д.с., зависящие от угла поворота ротора относительно статора. Если эти углы у роторов ССД и ССП одинаковы ($\alpha=\beta$), то э.д.с., в их обмотках равны и взаимно компенсируют друг друга. Токи в каждой роторной цепи равны нулю. Если эти углы не равны ($\alpha\neq\beta$), баланс э.д.с. нарушается, и в роторных обмотках возникают токи, которые создают в них магнитные поля, стремящиеся повернуть роторы до положения $\alpha=\beta$. Поскольку ротор ССД механически связан с роликом блок-баланса, находящегося под

большой нагрузкой, то поворачивается все время ротор ССП, нагрузка на который меньше и который перемещает носитель записи синхронно с движением скважинного прибора. С одним и тем же ССД могут быть соединены несколько ССП, например, один в регистрирующем приборе, другой на панели лебедчика в блоке счетчика глубин.

Еще один пример применения датчиков этого вида – тахогенераторы – приборы для измерения скорости вращения [5]. В этих приборах ротор генератора вращается в поле постоянного магнита или электромагнита, а индуцируемая в нем э.д.с. выпрямляется и измеряется стрелочным или цифровым прибором. Такие тахогенераторы также используются в каротажных станциях для измерения скорости движения скважинного снаряда. Приводом ротора тахогенератора служит один из сельсинов-приемников автосинной передачи.

3.1.2. Преобразователи индукционной э.д.с. со стационарным размещением магнита и катушки индуктивности

В преобразователях этого вида изменение магнитного поля достигается за счет перемещения ферромагнитных масс в воздушном зазоре между магнитом и катушкой индуктивности. В общем случае э.д.с. индукции пропорциональна скорости изменения магнитного потока Φ и числу витков в катушке:

$$e = -w d\Phi / dt.$$

На рис. 3.3 представлено несколько примеров применения преобразователей этого вида в геофизической аппаратуре.

В скважинном каппаметре Н. А. Иванова (рис. 3.3, а) датчик представляет собой катушку индуктивности с большим количеством витков, намотанную на постоянном стержневом магните. Когда такой датчик перемещается по стволу скважины мимо горных пород с повышенными магнитными свойствами, это вызывает изменение магнитного потока через катушку индуктивности, и в ней

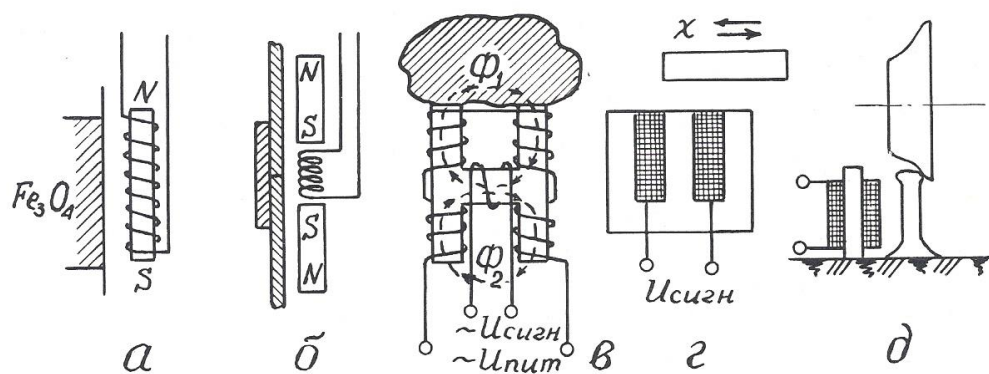


Рис. 3.3. Примеры применения преобразователей индукционной э.д.с.: а – скважинный каппаметр Н. А. Иванова; б – локатор муфт; в – лабораторный измеритель магнитной восприимчивости; г – счетчик количества; д – счетчик вагонеток

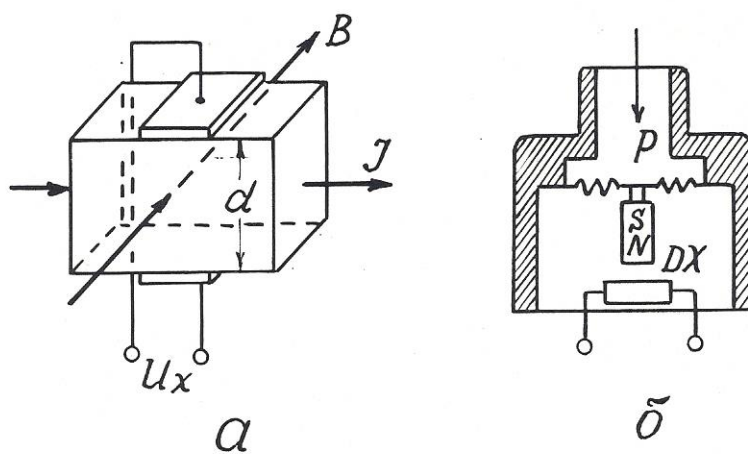


Рис. 3.4. Принцип действия преобразователя Холла (а) и его применение в манометре мембранного типа (б)

возникает э.д.с., пропорциональная магнитной восприимчивости горных пород. В наземном измерительном пульте эта э.д.с., усиливается, выпрямляется и выводится на регистрирующий прибор.

В 50-60 годах каппаметры Н. А. Иванова успешно применялись для исследования скважин на железорудных месторождениях Урала, но потом были заменены более совершенными приборами, поскольку описанный датчик имеет один явный недостаток – сигнал на его выходе зависит не только от магнитных свойств среды, но и от скорости перемещения датчика.

До настоящего времени при исследованиях обсаженных скважин применяются так называемые «локаторы муфт» – приборы, предназначенные для определения положения соединительных муфт обсадных колонн в скважинах [17].

Локатор муфт (рис. 3.3, б) содержит катушку индуктивности и два идентичных постоянных магнита, размещенных выше и ниже нее навстречу друг другу одноименными полюсами. Когда такой прибор перемещается по стальной трубе, имеющей постоянную толщину стенок, магнитные потоки верхнего и нижнего магнитов равны и в области расположения катушки индуктивности компенсируют друг друга. Когда же прибор проходит через соединительную муфту, то из-за увеличения толщины стали сначала усиливается магнитный поток одного (верхнего), а затем другого (нижнего) магнита. В результате в катушке возникает пара разнополярных импульсов э.д.с., которые и регистрируются на диаграммной ленте.

Еще один пример применения преобразователей данного вида – измерители магнитной восприимчивости образцов горных пород (прибор ИМВ-2) [3]. Датчик измерителя (рис. 3.3, в) представляет собой «Н» – образный сердечник с четырьмя обмотками возбуждения на концах сердечника и одной измерительной обмоткой на его «перекладине». Обмотки возбуждения подключены к источнику переменного тока и соединены таким обрезом, чтобы магнитные потоки, создаваемые ими в «перекладине» сердечника, были

направлены навстречу друг другу. Когда датчик находится в воздухе, эти потоки взаимно компенсируются, и сигнал в измерительной обмотке равен нулю. Когда к рабочей поверхности датчика прикладывается образец с повышенной магнитной восприимчивостью, магнитный поток, проходящий через него, увеличивается, и в измерительной обмотке наводится э.д.с., которая затем усиливается и измеряется.

Датчики данного вида находят также применение в технике как счетчики металлических предметов (рис. 3.3, г), счетчики вагонеток (рис. 3.3, д) и т.п. [5].

Общими достоинствами преобразователей индукционной э.д.с. является большая мощность выходного сигнала и отсутствие открытых электрических контактов, недостатком – наличие электромагнитного взаимодействия между магнитом и катушкой индуктивности.

3.2. Преобразователя гальваномагнитной э.д.с.

3.2.1. Преобразователи Холла

Преобразователи этого вида основаны на эффекте Холла, наблюдаемом в полупроводниках. Этот эффект проявляется в возникновении разности потенциалов U_x на обкладках датчика, по которому протекает ток I , при помещении его в магнитное поле, направленное перпендикулярно току. Принцип действия преобразователя Холла поясняется рис. 3.4.

$U_x = K_x \cdot IB/d$, где B – магнитная индукция; d – толщина датчика; K_x – коэффициент Холла, зависящий от характеристики материала и размеров датчика. Эффект Холла наблюдается в таких полупроводниковых материалах, как антимонид индия (InSb), арсенид индия (InAs), арсенид галлия (GaAs), арсенид-фосфат индия ($\text{InAs}_{0,8}\text{P}_{0,2}$) и др. Чистые полупроводники германий и кремний имеют очень высокое значение коэффициента Холла, но весьма чувствительны к режиму работы.

Датчики Холла используются для измерения перемещений, давления, числа оборотов и скорости вращения.

Достоинство датчиков: высокая чувствительность; недостатки: потребность во внешнем источнике питания, высокое выходное сопротивление и необходимость в высоком внутреннем сопротивлении источника питания, наличие четырех выводов.

В геофизической аппаратуре датчики Холла могут быть использованы для улавливания магнитных меток на каротажном кабеле (патент США № 4709208) или для измерения давления (рис. 3.4, б).

Отечественная приборостроительная промышленность выпускает микросхемы серии K1116 с датчиками Холла для магнитного управления электрическими цепями [16].

3.2.2. Преобразователи Виганда

Магнитобистабильный преобразователь Виганда состоит из специально обработанной проволоки из сплава викаллой (ванадий-10%, кобальт-52%, железо-38%) небольшого диаметра (около 0,3 мм), на которую нанесена обмотка индуктивности (рис. 3.5). При помещении датчика в магнитное поле в момент превышения напряженностью поля определенного порога направление намагниченности сердечника катушки спонтанно меняется, и в катушке возникает импульс напряжения длительностью около 20 мкс. При длине датчика 15 мм и числе витков $w=1300$ выходное напряжение достигает 2,5 В [6].

Достоинства датчиков Виганда: большой выходной сигнал, отсутствие внешнего питания, широкий температурный диапазон (от - 196 до + 175° С), искробезопасность.

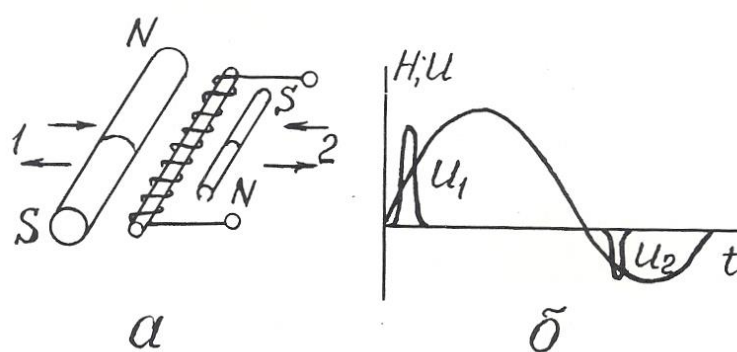


Рис. 3.5. Устройство преобразователя Виганда (а) и осциллограмма его выходного сигнала (б)

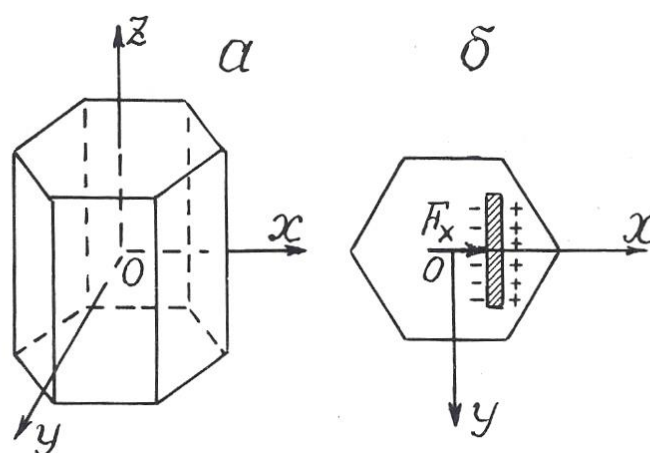


Рис. 3.6. Основные оси кристалла кварца (а) и возникновение пьезоэ.д.с. на кварцевой пластине (б)

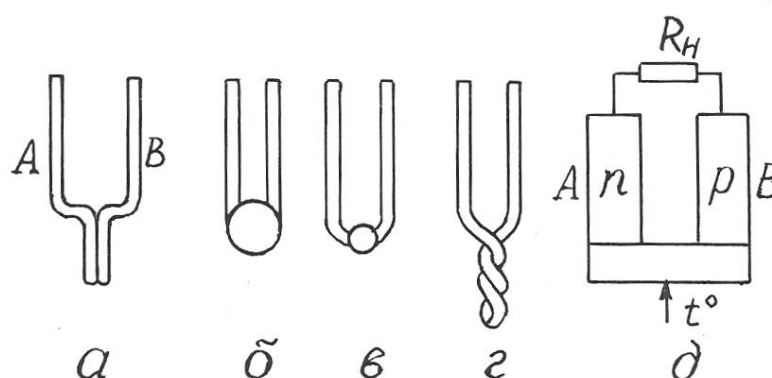


Рис. 3.7. Преобразователи термоэ.д.с. металлические (а-г) и полупроводниковые (д)

Ввиду того, что датчики Виганда были разработаны сравнительно недавно, в конце 80-х годов, они пока еще не используются в геофизической аппаратуре, хотя и могли бы найти применение, например, в магнитных меткоуловителях, устройствах блокировки, каротажных станций и других приборах.

3.3. Преобразователи пьезоэ.д.с.

Действие пьезопреобразователей основано на пьезоэлектрическом эффекте, который возникает в результате взаимосвязи между механическим и электрическим состоянием некоторых диэлектрических материалов, называемых **пьезоэлектриками**.

Различают **прямой пьезоэффект**, заключающийся в возникновении электрических зарядов на гранях кристаллов пьезоэлектриков под действием механических напряжений и исчезновении их после снятия нагрузки, и **обратный пьезоэффект**, проявляющийся в изменении формы и размеров пьезоэлектриков под действием электрического поля.

Способность к пьезоэффекту характеризуется пьезоэлектрической постоянной (пьезомодулем), величина которой определяется электрическим зарядом в Кл, возникающим под действием внешней силы в 1 Н: $K_{пз}=Q/F$.

Наиболее сильно пьезоэффект выражен у сегнетоэлектриков – веществ с аномально высокой диэлектрической проницаемостью. К ним относятся сегнетовая соль, кварц, турмалин, титанат бария и некоторые другие вещества.

Самая высокая пьезоэлектрическая постоянная у сегнетовой соли ($C_4H_4O_6KNa$): $K_{пз}=300 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н; у титана бария ($BaTiO_3$) $K_{пз}= 100 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н; у кварца $K_{пз}=2,1 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н.

Основные свойства пьезоэлектрических датчиков рассмотрим на примере кварца. Кристалл кварц имеет главную оптическую ось z , нейтральную или механическую ось y , и электрическую ось x (рис.3.6). Максимальный пьезоэффект наблюдается при воздействии механических нагрузок вдоль

электрической оси x , поэтому пластины для пьезопреобразователей вырезают из кристаллов кварца перпендикулярно оси x .

Возникновение пьезоэффекта объясняется тем, что под действием механических сил происходит смещение электрических зарядов – одна область кристалла заряжается положительно, другая – отрицательно.

Достоинства преобразователей этого вида: безынерционность, линейная статическая характеристика, высокая собственная частота, малые габариты; недостатки: утечка зарядов с течением времени, необходимость гидроизоляции.

Применяются пьезопреобразователи для измерения динамических нагрузок, деформаций, перемещений.

В геофизической аппаратуре пьезопреобразователи используются в качестве приемников упругих колебаний в скважинных приборах акустического каротажа (СПАК-2, СПАК-4, СПАК-6 и др.). Такой пьезоэлектрический сейсмоприемник изготавливается в виде полой сферы из пьезокерамики, внутренняя и внешняя поверхности которой имеют серебряное покрытие для облегчения снятия с них электрических зарядов. От промывочной жидкости в скважине сейсмоприемник отделен слоем резины [2,17].

В полевой геофизике существует сейсмoeлектрический метод разведки, который заключается в возбуждении с помощью взрыва пьезоэффекта на кристаллах естественных пьезоэлектриков в условиях их коренного залегания и в измерении этого эффекта с помощью системы электродов [3].

В быту пьезопреобразователи используются в качестве звукозаписывающих устройств, в электропроигрывателях, в зажигалках для газовых плит (прямой пьезоэффект), в звукоизлучателях электронных часов и ПЭВМ (обратный пьезоэффект) [22].

3.4. Преобразователи термоэ.д.с.

Преобразователи этого вида основаны на термоэлектрическом эффекте, заключающемся в том, что в цепи из двух разнородных проводников при

поддержании разных температур в точках их соединения возникает э.д.с., пропорциональная разнице этих температур (эффект Зеебека) [22].

Термоэлектрические преобразователи называют термопарами а проводники А и В, из которых они состоят – термоэлементами (рис. 3.7).

Один **чувствительный спай** термоэлементов подвергают воздействию измеряемой температуры, температуру другого, **опорного**, поддерживают постоянной.

Чувствительность термопреобразователей составляет от 5 до 60 мкВ/К.

Наибольшую чувствительность имеют термопары, составленные из двух полупроводников с различной (электронной и дырочной) природой проводимости.

Достоинства термопреобразователей: отсутствие источников питания, линейная статическая характеристика, большой диапазон измеряемых температур; недостаток: малая мощность сигнала отдельной термопары.

В геофизике используются металлические термопреобразователи в качестве термометров для исследования скважин на месторождениях парогидротерм, полупроводниковые – в качестве датчиков в полевой термо-разведке.

В технике термопары используются в системах автоматического регулирования температуры в различных металлургических процессах. В годы Великой Отечественной войны выпускались батареи полупроводниковых термопреобразователей, которые надевались на стекло керосиновой лампы и вырабатывали электроэнергию, достаточную для питания лампового приемника или рации.

3.5. Преобразователи фотоэ.д.с.

В этих преобразователях используются два полупроводника с разным характером проводимости (рис. 3.8, а). На их контакте происходит взаимная

диффузия электронов в *p*-полупроводник, дырок – в *n*-полупроводник. Дырки рекомбинируют с электронами, в результате на контакте полупроводников образуется тонкий запирающий слой – «*p-n*-переход». Такие преобразователи могут работать в режиме источника тока и фотодиода.

При отсутствии светового облучения через такой преобразователь проходит очень небольшой, так называемый «темновой ток», соответствующий обратному току диода. При световом облучении *p-n* -перехода кванты света образуют добавочные носители тока.

Под действием разности потенциалов потенциального барьера *p-n*-перехода электроны перемещаются в зону *n*-полупроводника, а дырки – в зону *p*-полупроводника, создавая фотоэ.д.с., на выводах прибора. На рис. 3.8, а электроны и дырки, прошедшие через *p-n*-переход в результате диффузии и создавшие потенциальный барьер *p-n*-перехода, условно обозначены как «+» и «-» без кружочков. Добавочные дырки и электроны, возникшие под действием облучения, показаны как «+» и «-» в кружочках. Стрелками показано направление действующих на них сил поля *p-n*-перехода.

На рис. 3.8, б показан разрез германиевого фотодиода, состоящего из пластины германия 1 с проводимостью *n*-типа, которая сплавлена с индием 2 (проводимость *p*-типа). Толщина слоя германия над индием настолько мала, что кванты света свободно проникают через него в зону *p-n*-перехода. Корпус 3 выполнен из оргстекла и залит компаундом 4.

Спектральные характеристики фотопреобразователей зависят от используемых в них материалов.

Интегральная чувствительность германиевых фотопреобразователей имеет наибольшее значение $K_{\text{диф}} = \Delta I / \Delta \Phi = 20$ мА/лм. Э.д.с. фотогенераторов не превышает 0,12-0,5 В.

Преобразователи фотоэ.д.с. изготавливаются из кремния, селена, сернистого таллия и сернистого серебра. Достоинством селеновых фотопреобра-

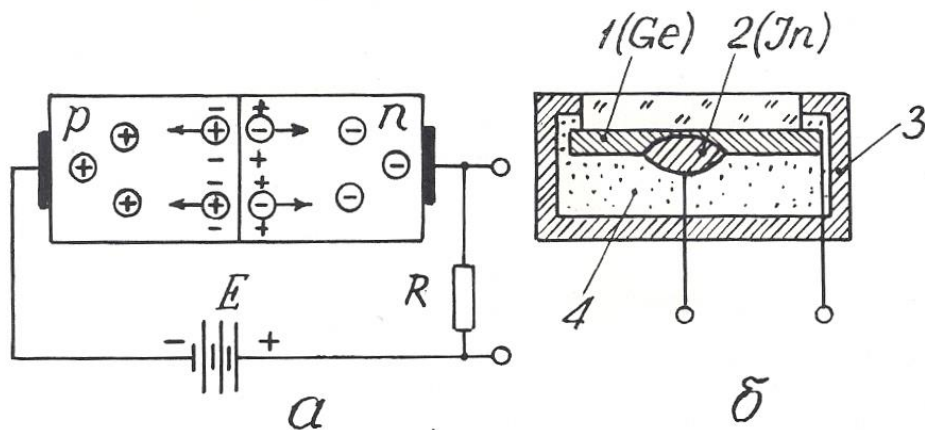


Рис. 3.8. Преобразователь фотоэ.д.с.: принцип действия (а) и конструкция (б)

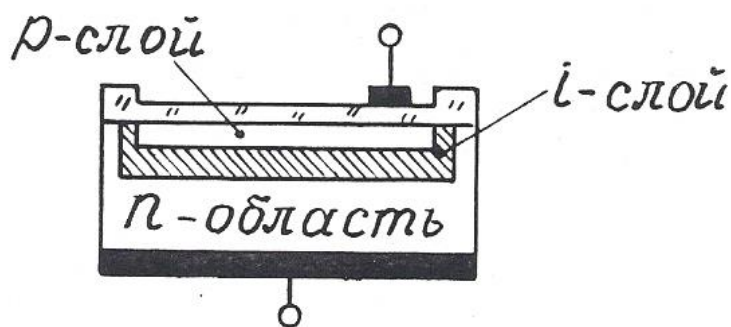


Рис. 3.9. Структура pin-диода

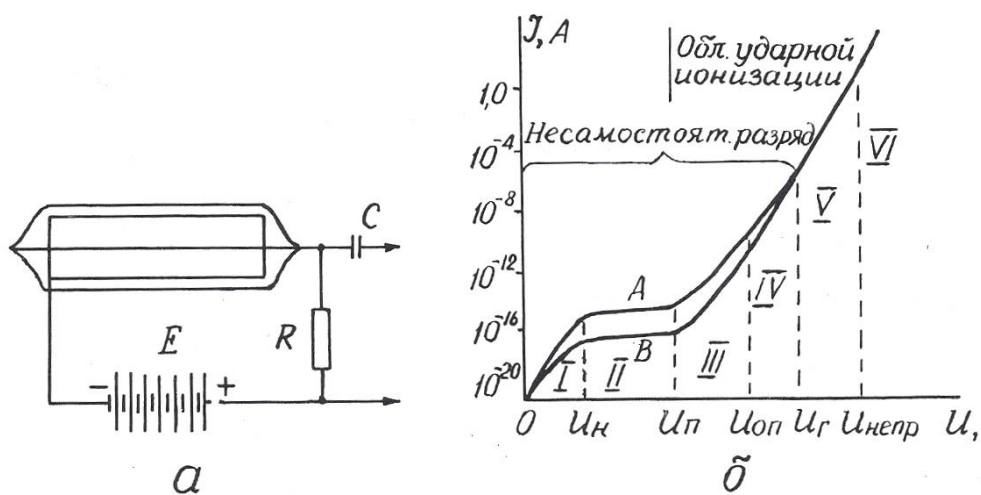


Рис. 4.1. Устройство газоразрядного счетчика (а) и его вольт-амперная характеристика (б):

A – β -частица; B – γ -квант

зователей является их спектральная чувствительность, близкая к чувствительности человеческого глаза.

Для увеличения количества дополнительных носителей, образующихся в p - n -переходе под действием светового облучения, между p и n -полупроводниками располагают дополнительный слой нелегированного высокоомного кремния (i -слой) – рис. 3.9. Такие фотоэлектрические приборы носят название pin -диодов. Область применения их в геофизической аппаратуре та же, что и фоторезистивных датчиков (см. раздел 2.1.7).

Контрольные вопросы

1. Назовите основные характеристики преобразователей индукционной э.д.с., их разновидности и приведите примеры их применения в технике и геофизической аппаратуре (ГА).
2. Поясните принцип действия датчика Холла и объясните его устройство (рис. 3.4, а).
3. Поясните принцип действия и устройство датчика Виганда (рис. 3.5).
4. Поясните принцип действия преобразователей пьезоэ.д.с. и приведите примеры их применения в ГА.
5. Поясните принцип действия преобразователей термоэ.д.с. и приведите примеры их применения в технике и ГА.
6. Поясните принцип действия преобразователей фотоэ.д.с. и приведите примеры их применения.

4. РАДИАЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В настоящем пособии будут рассмотрены только те радиационные преобразователи, которые преобразуют энергию ядерного излучения в электрический сигнал. Эти преобразователи называются также детекторами радиоактивных излучений. Они бывают трех видов: газоразрядные, сцинтилляционные и полупроводниковые.

4.1. Газоразрядные детекторы

В газоразрядном детекторе происходит непосредственное преобразование энергии радиоактивного излучения в электрические импульсы.

Газоразрядный детектор представляет собой металлический цилиндр, по оси которого натянута тонкая металлическая нить. Цилиндр играет роль катода и подключается к «минусу» источника постоянного напряжения, нить (анод) – к «плюсу». И нить, и цилиндр могут быть помещены в стеклянный баллон (рис. 4.1, а). Полость детектора заполнена газом под низким давлением (примерно – $1,5 \cdot 10^4$ Па). При прохождении через детектор нейтроны и гамма-кванты взаимодействуют с атомами вещества его катода и газового наполнителя, вызывая ионизацию газа и, как следствие, прохождение кратковременного импульса тока, сила I которого зависит от напряжения U между электродами. При схеме включения детектора, изображенной на рис. 4.1, а, на нагрузочном сопротивлении R импульс тока создает отрицательный импульс напряжения, который через разделительный конденсатор C подается на усилительно-регистрирующую схему [13].

Зависимость $I=f(U)$ или вольт-амперная характеристика счетчика приведена на рис. 4.1, б. В ней выделяются шесть областей, отличающихся по механизму переноса ионов в электрическом поле счетчика. В области I при малых напряжениях на электродах ток возрастает пропорционально напряжению, т.к. с ростом напряжения уменьшается количество рекомбинирующих ионов и все большее их количество достигает электродов счетчика. Эта область (от 0 до U_n) называется **омической**. Начиная с некоторого значения U_n , ток достигает насыщения (все ионы долетают до анода и катода) и перестает возрастать. Величина ионизационного тока во II области (от U_n до U_{II}) определяется только количеством ионов, образующихся в единицу времени. Преобразователи, работающие в этой области, носят название **ионизационных камер**. При дальнейшем, свыше U_n росте напряжения, несмотря на постоянство

начальной ионизации, происходит рост тока в импульсе. Это связано с возникновением ударной ионизации, при которой электроны, образующиеся при первоначальном воздействии радиации, ускоряются электрическим полем счетчика настолько, что начинают ионизировать молекулы газового наполнителя. Отношение числа ионов, достигших анода счетчика, к числу первичных ионов, созданных регистрируемой частицей (или гамма-квантом), называется **коэффициентом газового усиления**. Величина его зависит от приложенного напряжения.

С возникновением ударной ионизации вначале ток возрастает пропорционально напряжению на электродах (область пропорциональности III от $U_{\text{п}}$ до $U_{\text{оп}}$), здесь отмечается относительно невысокий коэффициент газового усиления (до 10^4), а при дальнейшем увеличении U пропорциональность нарушается и от $U_{\text{оп}}$ до $U_{\text{г}}$ следует IV область – **ограниченной пропорциональности**. За ней идет область Гейгера (V), в которой амплитуда импульса не зависит от начальной ионизации. Коэффициент газового усиления достигает 10^8 - 10^9 и продолжает увеличиваться с ростом напряжения. За областью Гейгера следует область **непрерывного разряда** (VI), для возникновения которого не нужна первичная ионизация, достаточно к электродам счетчика приложить напряжение, превышающее $U_{\text{непр}}$.

Области V и VI – это области самостоятельного разряда, который не требует для своего поддержания внешних источников ионизации.

Газоразрядные детекторы, применяемые в геофизической аппаратуре, работают либо в пропорциональной области (пропорциональные счетчики), либо в области Гейгера (счетчики Гейгера-Мюллера).

Пропорциональные счетчики используются для измерения плотности потока тепловых нейтронов. Баллон счетчика заполняется трехфтористым бором (BF_3), обогащенным до 96 % изотопом В-10, имеющим большое сечение захвата тепловых нейтронов. При захвате нейтрона происходит реакция $\text{B}(n, \alpha)\text{Li}$, α – частица производит первичную ионизацию в объеме счетчика. Для

измерений нейтронов надтепловых энергий счетчик окружают сначала слоем водородсодержащего вещества, например, парафина, а затем тонким (около 0,5 мм) слоем кадмия. Кадмий поглощает тепловые нейтроны, а надтепловые в парафине замедляются до тепловых энергий и затем фиксируются счетчиком.

Счетчик Гейгера-Мюллера применяется для регистрации гамма-квантов. Он заполняется инертным газом (аргоном или гелием) с добавкой паров высокомолекулярных органических соединений (этилового спирта или этилового эфира) или галогенов (хлора, брома). Такая добавка способствует гашению непрерывного разряда, т.к. положительные ионы, образовавшиеся из молекул инертного газа, нейтрализуются при столкновениях с молекулами высокомолекулярного соединения или галогена и не вызывают вторичной электронной эмиссии с катода.

После регистрации каждой ионизирующей частицы газоразрядный счетчик не способен в течение некоторого «мертвого времени» τ_m (порядка 10^{-4} с) отмечать попадание следующей частицы или реагирует на нее образованием импульса пониженной амплитуды («время восстановления» – τ_v). Величина «мертвого времени» и «времени восстановления» определяет разрешающую способность и эффективность преобразователя.

Разрешающей способностью преобразователя называют максимальное количество ионизирующих частиц N_{max} , которые могут быть уверенно зафиксированы преобразователем $N_{max} = I/(\tau_m + \tau_v)$.

Под **эффективностью счетчика** понимают отношение числа частиц, зарегистрированных счетчиком, к общему числу частиц, прошедших через объем счетчика. Эффективность газоразрядных счетчиков зависит от их конструкции, размеров и материала катода и обычно не превышает нескольких процентов.

Основной рабочей характеристикой газоразрядного преобразователя является его **счетная характеристика** – зависимость числа импульсов на его выходе от напряжения на электродах при постоянной интенсивности

ионизирующего облучения (рис. 4.2). Участок *ав* в пределах которого выбирается рабочее напряжение счетчика $U_{\text{раб}}$, называется **плато**. Протяженность плато составляет от 200 до 300 В, а наклон – от 3 до 15 % на 100 В.

Достоинства газоразрядных детекторов: большая амплитуда сигнала, малая потребляемая мощность, широкий температурный диапазон; недостатки: потребность в источнике питания с высоким напряжением, ограниченный ресурс, для счетчиков Гейгера-Мюллера – независимость амплитуды выходного сигнала от энергии ионизирующего излучения.

Газоразрядные счетчики очень широко применялись во всех разновидностях геофизических радиометров: полевых, каротажных, автомобильных и самолетных [3,12]. В последнее время они в значительной мере вытеснены более эффективными сцинтилляционными детекторами.

4.2 Сцинтилляционные детекторы

Сцинтилляционный радиационный преобразователь (рис. 4.3) состоит из люминофора 1 (оптически прозрачного вещества, люминесцирующего под действием ядерного излучения), и фотоэлектронного умножителя 2 (ФЭУ).

В результате действия попавшей в сцинтиллятор элементарной частицы (или гамма-кванта) часть атомов сцинтиллятора переходит в возбужденное состояние. Обратный переход их в нормальное состояние сопровождается кратковременной (порядка 10^{-7} - 10^{-9} с) световой вспышкой. Фотоны света преобразуются в электрический сигнал с помощью ФЭУ, который представляет собой комбинацию фотоэлемента с электронным усилителем. Фотоны из сцинтиллятора 1 выбивают из фотокатода ФЭУ 3 электроны, которые под действием электрического поля устремляются к ближнему диноду 4, имеющему положительный потенциал. Вследствие вторичной электронной

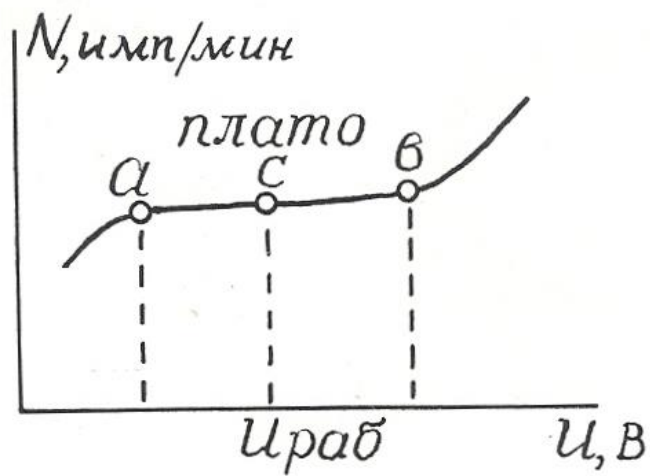


Рис. 4.2. Счетная характеристика газоразрядного счетчика Гейгера – Мюллера

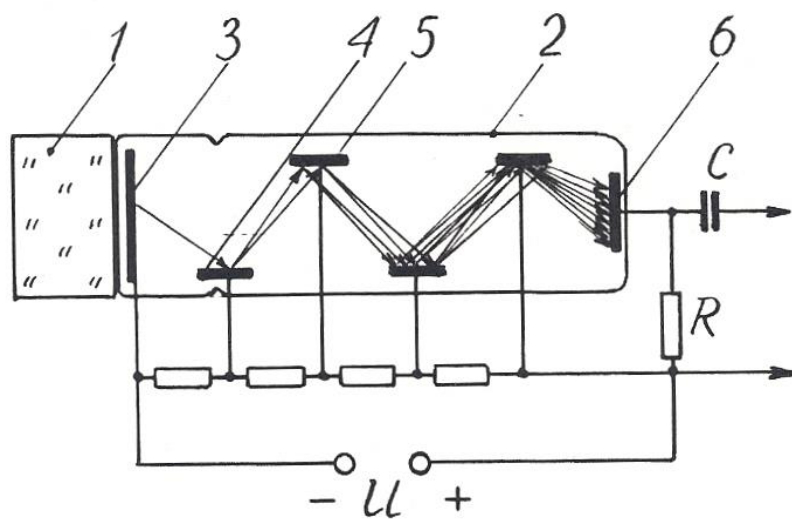


Рис. 4.3. Устройство сцинтилляционного преобразователя: 1 – кристалл-сцинтиллятор; 2 – фотоэлектронный умножитель (ФЭУ); 3 – фотокатод; 4 – первый динод; 5 – второй динод; 6 – анод (ФЭУ)

эмиссии каждый электрон "выбивает из динода вторичные электроны, которые притягиваются следующим динодом 5, имеющим более высокий потенциал, и также вызывают вторичную электронную эмиссию. Процесс развивается лавинообразно, в результате попадания каждой ионизирующей частицы в кристалл-сцинтиллятор соответствует прохождению импульса тока между анодом 6 и катодом 1 ФЭУ, причем амплитуда этого импульса пропорциональна энергии ионизирующей частицы.

Эффективность сцинтилляционных детекторов намного выше, чем у газоразрядных, и достигает 20 %.

В качестве сцинтилляторов для регистрации гамма-квантов в геофизической аппаратуре используют монокристаллы соединений NaI, CsI, KI, активированных таллием (Tl), а для регистрации нейтронов – кристаллы сернистого цинка ZnS с добавками серебра или меди. Примесь активатора (Tl, Ag, Cu) в люминофоре способствует созданию в решетках кристаллов-сцинтилляторов дополнительных центров люминесценции [13].

Счетная характеристика сцинтилляционных преобразователей имеет плато очень небольшой протяженности, вследствие чего эти преобразователи требуют питания высокостабилизированным напряжением.

Преимущества сцинтилляционных преобразователей перед газоразрядными: высокая эффективность, большая разрешающая способность, зависимость амплитуды выходного сигнала от энергии ионизирующего излучения, что позволяет изучать энергетический спектр последнего.

Эти преимущества обеспечивают широкое распространение детекторов этого вида в разнообразных радиометрах: полевых (СРП-68-02), скважинных (ДРСТ-3, Кура-2м и др.), самолетных (АСГМ-46 и др.).

К недостаткам сцинтилляционных детекторов можно отнести низкую термостойкость и термостабильность, что требует их термостатирования в скважинных радиометрах [9].

4.3. Полупроводниковые детекторы

Полупроводниковые детекторы (ППД) устроены и действуют совершенно аналогично преобразователям фотоэ.д.с., рассмотренным в разделе 3.5. Отличие заключается только в том, что в ППД образование свободных носителей в зоне p - n -перехода происходит за счет действия не фотонов света, а ионизирующего ядерного излучения.

Амплитуда импульса на выходе ППД пропорциональна числу носителей зарядов, образованных ионизирующей частицей, а следовательно, ее энергии, что дает возможность изучать энергетический спектр излучения.

Для создания i -слоя в ППД используют литий, обладающий высоким коэффициентом диффузии, который добавляют в торец полупроводника с p -проводимостью.

Преимущества полупроводниковых детекторов: экономичность питания, весьма малые размеры и хорошее амплитудное разрешение (в 20-30 раз лучше, чем у сцинтилляционных преобразователей).

Однако их распространение ограничено. Это связано, во-первых, со сравнительно небольшими размерами чувствительной части детектора, и во-вторых, с необходимостью охлаждения детектора до низких температур (от -100 до -196°), которое повышает их эффективность.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют преобразователи ядерных излучений в электрический сигнал?
2. Объясните устройство газоразрядного преобразователя.
3. Объясните вольт-амперную характеристику (рис. 4.1, б) газоразрядного детектора.
4. Чем отличаются счетчики Гейгера-Мюллера от пропорциональных счетчиков?
5. Объясните устройство и работу сцинтилляционного детектора.

6. Назовите преимущества сцинтилляционных детекторов перед газоразрядными.

7. Объясните устройство и работу полупроводникового детектора, укажите его достоинства и недостатки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алиев Т. М., Тер-Хачатуров А. А. Измерительная техника: Учебн. пособие для техн. вузов. – М.: Высшая школа, 1991. – 384 с.

2. Аппаратура и оборудование для геофизических исследований нефтяных и газовых скважин: Справочник /А. А.Молчанов, В. В. Лаптев, В. М. Моисеев, Р. С.Челохьян. – М.: Недра, 1987. – 263 с.

3. Бондаренко В. М., Демура Г. В., Ларионов А. М. Общий курс геофизических методов разведки: Учебн. пособие для техникумов. – П.: Недра, 1986. – 453 с.

4. Бриндли К. Измерительные преобразователи: Справочное пособие / Пер.с англ. – М.:Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.

5. Бухгольц В. П. Датчики и реле автоматического контроля в горной промышленности. – М.: Недра, 1971. – 224 с.

6. Виглеб Г. Датчики / Пер. с нем. – М.: Мир, 1989. – 196 с.

7. Енохович А. С. Краткий справочник по физике. – М.: Высшая школа, 1976. – 288 с.

8. Зачиевский Т., Мальзахер С., Квецинский А. Промышленная электроника / Пер.с польского. – М.; Энергия, 1976. – 640 с.

9. Зельцман П. А. Конструирование аппаратуры для геофизических исследований скважин. – М.: Недра, 1968. – 180 с.

10. Зимодро А. Ф., Скибинский Г. Л. Основы автоматики. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.

11. *Квартин М. И.* Электромеханические и магнитные устройства автоматики и их расчет. – М.: Высшая школа, 1973. – 344 с.
12. *Кривко Н. Н., Шароварин В. Д., Широков В. Н.* Промышленно-геофизическая аппаратура и оборудование: Учебн. пособие для вузов. – М.: Недра, 1981. – 280 с.
13. *Ларионов В. В.* Радиометрия скважин. – М.: Недра, 1969. – 327 с.
14. *Левшина Е. С., Новицкий П. В.* Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи. – Л.: Энергоатомиздат, 1983.
15. *Литвак В. И.* Тензореле. Расчет, конструирование, применение. – М.: Машиностроение, 1989. – 160 с.
16. *Логинов В. И.* Электрические измерения механических величин / Изд. 2-е, доп. – М.: Энергия, 1976. – 104 с.
17. *Померанц Л. И., Белоконь Д. В., Козяр В. Ф.* Аппаратура и оборудование геофизических методов исследования скважин: Учебн. пособие для техникумов. – М.: Недра, 1985. – 271 с.
18. *Сковородников И. Г., Калашиников В. Н.* Дистанционный уровнемер для испытательных скважин // Геофизическая аппаратура. Вып.89. – Недра, 1988. – С. 98-103.
19. *Сковородников И. Г., Макаров Л. В., Калашиников В. Н.* Газожидкостный расходомер РГЖ-Г: Техническое описание. – Свердловск: СГИ, 1988. – 15 с.
20. *Сковородников И. Г., Макаров Л. В., Калашиников В. Н.* Изучение скорости и направления движения подземных вод // Гидрогеология и инж. геология: Обзор / ВНИИ экон. минер. сырья и геологоразв. работ. – М., 1987. – 33 с.
21. *Сковородников И. Г., Макаров Л. В., Калашиников В. Н.* Скважинные тахометрические расходомеры / СГИ. – Свердловск, 1989. – 65 с. – Деп. в ВИНТИ, №7609-В89, 1989.
22. *Справочник по средствам автоматики* / Под ред. В. Э. Низэ, И.В.Антика. – М.: Энергоиздат, 1983. – 504 с.

23. *Электрические измерения неэлектрических величин* / А. М. Туричин, П. В. Новицкий, Е. С. Левшина и др.; Изд. 5-е, перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1975. – 676 с.
24. А. с. 491895. Зонд для измерения направления и скорости движения грунтовых вод /Б. Н. Халтурин, В. С. Лившиц // Бюл. изобр. – 1975, №42.
25. А. с. 1063990. Емкостной датчик зенитного угла / О. В.Фомин // Бюл. изобр. – 1983, № 48.
26. А. с. 1158750. Скважинный уровнемер (его варианты) / В. Н. Калашников, И. Г.Сковородников // Бюл. изобр. – 1985, № .20.
27. А. с. 1509518. Датчик угла наклона буровой скважины / А. В. Давыдов, И. Г. Сковородников // Бюл. изобр. – 1989, № 35.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебно-методическому
комплексу
С.А. Упоров



МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ (КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ)

ЧАСТЬ 1

«МЕТРОЛОГИЯ»

Специальность

21.05.03 Технология геологической разведки

Автор: Глушкова Т.А., к.т.н.

Одобен на заседании кафедры

Геофизики

(название кафедры)

Зав.кафедрой

Талалай А. Г.

(Фамилия И.О.)

Протокол № 1 от 05.10. 2020

(Дата)

Рассмотрен методической комиссией
факультета

(название факультета)

Председатель

Бондарев В. И.

(Фамилия И.О.)

Протокол № 2 от 13.10. 2020

(Дата)

Екатеринбург
2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 Основные понятия.....	4
2 Нормативно-правовые основы метрологии.....	5
3 Свойства, физические величины. Измерение ФВ.....	7
4 Системы единиц физических величин. Система SI.....	9
5 Виды и методы измерений	13
6 Средства измерений. Метрологические характеристики СИ.....	14
7 Нормирование и классы точности средств измерений.....	17
8 Погрешности измерений	25
9 Правила округления и записи результата измерений.....	27
10 Метрологическое обеспечение, службы и организации.....	28
11 Формы государственного регулирования в области обеспечения единства измерений.....	30
12 Государственный метрологический надзор.....	31
13 Утверждение типа стандартных образцов или типа средств измерений...	33
14 Поверка средств измерений.....	34
15 Калибровка средств измерений.....	36
16 Метрологическая экспертиза.....	37
17 Анализ и оценка состояния измерений.....	38
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	35
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	36
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	37
ПРИЛОЖЕНИЕ А Сферы государственного регулирования обеспечения единства измерений.....	43
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Значения коэффициентов Стьюдента $t(P_d, n)$	44

ВВЕДЕНИЕ

Метрология – наука об измерениях. Измерения составляют основу познания человеком окружающего мира во всех исторических периодах. Важность измерений возрастает с развитием производительных сил. Огромную роль играют измерения в современном обществе. Наука, промышленность, экономика, образование, информатика, торговля, банковская система, таможенные операции, медицина, спорт и другие сферы деятельности человека немыслимы без измерений.

Стандартизация, оценка соответствия и метрология как важнейшие составляющие технического регулирования неразрывно связаны между собой. Активная деятельность общества, органов законодательной и исполнительной властей в этих направлениях является важнейшим условием становления рыночной экономики в Российской Федерации, увеличения Внутреннего Валового Продукта, расширения международных научных, технических и торговых связей, интеграции страны в мировую экономическую систему.

Важность метрологической деятельности, обеспечения единства измерений поддержана вниманием со стороны государства.

Правовую основу метрологии составляют:

- основной закон государства - Конституция Российской Федерации;
- Федеральный закон Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений» № 102-ФЗ от 26.06.2008;
- федеральные законы отраслевого характера в части, касающейся единства измерений.

- Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ), представляющая собой комплекс нормативно-технических документов (ГОСТов, методических указаний и т.п.), устанавливающих единую номенклатуру стандартных взаимоувязанных правил и положений, требований и норм, относящихся к организации и методике оценивания и обеспечения точности измерений.

Дальнейшее развитие экономики России, расширение международной торговли и экономического сотрудничества, выражающиеся в увеличении количества и технического совершенства товаров, расширении спектра и повышении качества услуг, потребовали совершенствования правовой базы метрологии и приведения в соответствие метрологической деятельности с уровнем развития экономики страны.

Метрология (греч.) – наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Различают три раздела метрологии:

- теоретическая (фундаментальная);
- законодательная;
- практическая (прикладная).

Теоретическая метрология – раздел метрологии, предметом которого является разработка фундаментальных основ метрологии.

Законодательная метрология – раздел метрологии, предметом которого является установление обязательных технических и юридических требований по применению единиц физических величин, эталонов, методов и средств измерений, направленных на обеспечение единства и необходимости точности измерений в интересах общества.

Практическая метрология – раздел метрологии, предметом которого являются вопросы практического применения разработок теоретической метрологии и положений законодательной метрологии.

Измерения играют огромную роль в науке, промышленности, экономике и коммуникациях. Практически отсутствуют сферы деятельности, где не применяют результаты измерений, испытаний, контроля.

1 Основные понятия

Аттестация методик (методов) измерений - исследование и подтверждение соответствия методик (методов) измерений установленным метрологическим требованиям к измерениям;

Ввод в эксплуатацию средства измерений - документально оформленная в установленном порядке готовность средства измерений к использованию по назначению;

Государственный метрологический надзор - контрольная деятельность в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, осуществляемая уполномоченными федеральными органами исполнительной власти и заключающаяся в систематической проверке соблюдения установленных законодательством Российской Федерации обязательных требований, а также в применении установленных законодательством Российской Федерации мер за нарушения, выявленные во время надзорных действий;

Государственный первичный эталон единицы величины - государственный эталон единицы величины, обеспечивающий воспроизведение, хранение и передачу единицы величины с наивысшей в Российской Федерации точностью, утверждаемый в этом качестве в установленном порядке и применяемый в качестве исходного на территории Российской Федерации;

Государственный эталон единицы величины - эталон единицы величины, находящийся в федеральной собственности;

Единица величины - фиксированное значение величины, которое принято за единицу данной величины и применяется для количественного выражения однородных с ней величин;

Единство измерений - состояние измерений, при котором их результаты выражены в допущенных к применению в Российской Федерации единицах величин, а показатели точности измерений не выходят за установленные границы;

Измерение - совокупность операций, выполняемых для определения количественного значения величины;

Испытания стандартных образцов или средств измерений в целях утверждения типа - работы по определению метрологических и технических характеристик однотипных стандартных образцов или средств измерений.

Калибровка средств измерений - совокупность операций, выполняемых в целях определения действительных значений метрологических характеристик средств измерений.

Методика (метод) измерений - совокупность конкретно описанных операций, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений с установленными показателями точности.

Метрологическая служба - организующие и (или) выполняющие работы по обеспечению единства измерений и (или) оказывающие услуги по обеспечению единства измерений структурное подразделение центрального аппарата федерального органа исполнительной власти и (или) его территориального органа, юридическое лицо или структурное подразделение юридического лица либо объединения юридических лиц, работники юридического лица, индивидуальный предприниматель.

Метрологическая экспертиза - анализ и оценка правильности установления и соблюдения метрологических требований применительно к объекту, подвергаемому экспертизе. Метрологическая экспертиза проводится в обязательном (обязательная метрологическая экспертиза) или добровольном порядке.

Обязательные метрологические требования - метрологические требования, установленные нормативными правовыми актами Российской Федерации и обязательные для соблюдения на территории Российской Федерации.

Передача единицы величины - приведение единицы величины, хранимой средством измерений, к единице величины, воспроизводимой эталоном данной единицы величины или стандартным образцом.

Поверка средств измерений - совокупность операций, выполняемых в целях подтверждения соответствия средств измерений метрологическим требованиям.

Прослеживаемость - свойство эталона единицы величины или средства измерений, заключающееся в документально подтвержденном установлении их связи с государственным первичным эталоном соответствующей единицы величины посредством сличения эталонов единиц величин, поверки, калибровки средств измерений.

Прямое измерение - измерение, при котором искомое значение величины получают непосредственно от средства измерений.

Сличение эталонов единиц величин - совокупность операций, устанавливающих соотношение между единицами величин, воспроизводимых эталонами единиц величин одного уровня точности и в одинаковых условиях.

Средство измерений - техническое средство, предназначенное для измерений.

Стандартный образец - образец вещества (материала) с установленными по результатам испытаний значениями одной и более величин, характеризующих состав или свойство этого вещества (материала).

Тип средств измерений - совокупность средств измерений, предназначенных для измерений одних и тех же величин, выраженных в одних и тех же единицах величин, основанных на одном и том же принципе действия, имеющих одинаковую конструкцию и изготовленных по одной и той же технической документации.

Тип стандартных образцов - совокупность стандартных образцов одного и того же назначения, изготавливаемых из одного и того же вещества (материала) по одной и той же технической документации

Утверждение типа стандартных образцов или типа средств измерений - документально оформленное в установленном порядке решение о признании соответствия типа стандартных образцов или типа средств измерений метрологическим и техническим требованиям (характеристикам) на основании результатов испытаний стандартных образцов или средств измерений в целях утверждения типа;

Фасованные товары в упаковках - товары, которые упаковываются в отсутствие покупателя, при этом содержимое упаковки не может быть изменено без ее вскрытия или деформирования, а масса, объем, длина, площадь или иные величины, определяющие количество содержащегося в упаковке товара, должны быть обозначены на упаковке;

Эталон единицы величины - техническое средство, предназначенное для воспроизведения, хранения и передачи единицы величины.

2 Нормативно-правовые основы метрологии

Значимость и высокая ответственность измерений в экономике государства обуславливают необходимость установления в законодательном порядке комплекса правовых актов и положений по метрологии. Россия в числе семнадцати государств подписала Метрическую конвенцию в 1875 г.

Вся метрологическая деятельность в РФ основана на конституционной норме (Конституция РФ, статья 71, пункт «Р»), которая закрепляет централизованное государственное руководство основными вопросами законодательной метрологии. В федеральном ведении находятся стандарты, эталоны, метрическая система и исчисление времени.

В целях реализации конституционной нормы приняты Федеральные законы «Об обеспечении единства измерений», «О техническом регулировании», составляющие правовые основы метрологической деятельности.

Нормативные документы по обеспечению единства измерений:

- постановления Правительства РФ по отдельным вопросам и направлениям метрологической деятельности;

- комплекс нормативно-технических документов (ГОСТов, методических указаний и т.п.) государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ), устанавливающих единую номенклатуру стандартных взаимосвязанных

правил и положений, требований и норм, относящихся к организации и методике оценивания и обеспечения точности измерений;

- рекомендации государственных научных метрологических центров Росстандарта.

Основные *цели* ФЗ «Об обеспечении единства измерений»:

- установление правовых основ обеспечения единства измерений в Российской Федерации;

- защита прав и законных интересов граждан, общества и государства от отрицательных последствий недостоверных результатов измерений;

- обеспечение потребности граждан, общества и государства в получении объективных, достоверных и сопоставимых результатов измерений, используемых в целях защиты жизни и здоровья граждан, охраны окружающей среды, животного и растительного мира, обеспечения обороны и безопасности государства, в том числе экономической безопасности;

- содействие развитию экономики Российской Федерации и научно-техническому прогрессу.

Закон закрепляет одно из основных понятий метрологии – единство измерений и другие понятия.

Закон устанавливает, что государственное управление деятельностью по обеспечению единства измерений осуществляет Национальный орган РФ по метрологии – *Росстандарт* (ранее назывался *Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии*), определяет его цели, задачи, компетенцию, ответственность и полномочия.

Положения Закона расширены *Государственной системой обеспечения единства измерений* (ГСИ) - комплексом нормативных документов межрегионального и межотраслевого уровней, устанавливающих правила, нормы, требования, направленные на достижение и поддержание единства измерений в РФ.

Основные *объекты* ГСИ:

- единицы физических величин;
- государственные эталоны, поверочные схемы;
- методы и средства поверки СИ;
- номенклатура и способы нормирования МХ СИ;
- нормы точности измерений;
- способы выражения и формы представления результатов и показателей точности измерений;

- методики выполнения измерений;
- методики оценки достоверности и формы представления данных о свойствах веществ и материалов;

- требования к стандартным образцам свойств веществ и материалов;

- термины и определения в области метрологии;

- организация и порядок проведения государственных испытаний СИ, поверки и метрологической аттестации СИ и испытательного оборудования;

- организация и порядок проведения калибровки СИ, метрологической экспертизы нормативно-технической, проектной, конструкторской и технологической документации, а также экспертизы свойств материалов и веществ.

В дополнение и для реализации положений ФЗ «Об обеспечении единства измерений» Правительство РФ разрабатывает и принимает подзаконные акты – нормативные документы в области метрологии.

3 Свойства, физические величины. Измерение ФВ

Свойство – философская категория, выражающая такую сторону объекта (явления, процесса), которая обуславливает его различие или общность с другими объектами (явлениями, процессами) и обнаруживается в его отношении к ним. Свойство – категория качественная.

Величина – свойство чего-либо, что может быть выделено среди других свойств и оценено тем или иным способом, в том числе и количественно.

Величины подразделяют на два вида:

- идеальные;
- реальные.

Идеальные величины – являются обобщением (моделью) конкретных реальных понятий и относятся главным образом к математике.

Реальные величины подразделяют на две группы:

- нефизические;
- физические.

Нефизические величины свойственны общественным наукам (философия, психология, социология, экономика). Нефизические величины не могут быть измерены, а только оценены.

Физические величины свойственны материальным объектам (процессам, явлениям), изучаемым в естественных (физика, химия) и технических (машиноведение, электротехника) науках.

Физическая величина (ФВ) – одно из свойств физического объекта, в качественном отношении общее для многих физических объектов, а в количественном – индивидуальное, для каждого из них (твёрдость, плотность, теплопроводность, электропроводность).

По возможности измерения ФВ подразделяют на:

- измеряемые;
- оцениваемые.

Изменяемые – величины, которые могут быть выражены количественно в виде определённого числа установленных единиц измерения.

Оцениваемые – величины, для которых не может быть введена единица измерения.

По видам явлений ФВ подразделяют на группы:

- *вещественные*;
- *энергетические*;
- *характеризующие протекание процессов во времени*.

Вещественные – описывают физические и физико-химические свойства веществ, материалов (масса, плотность, электрическое сопротивление).

Энергетические – описывают энергетические характеристики процессов преобразования, передачи, использования энергии (энергия, мощность, сила и напряжение электрического тока).

Характеризующие протекание процессов во времени – различного рода спектральные характеристики, корреляционные функции.

По принадлежности к различным физическим процессам ФВ классифицируют на:

- пространственно-временные;
- механические, тепловые, электрические, магнитные;
- акустические, световые;
- физико-химические;
- ионизирующих излучений, атомной и ядерной физики.

По степени зависимости от других величин ФВ подразделяют на:

- основные (условно независимые);
- производные (условно зависимые);
- дополнительные.

Измерение ФВ – познавательный процесс, заключающийся в сравнении путём физического эксперимента данной ФВ с её известной величиной, принятой за единицу измерения.

Основное уравнение измерения – уравнение вида:

$$Q = q \cdot /Q/. \quad (1)$$

Значение ФВ - Q – оценка её размера в виде некоторого числа принятых для неё единиц.

Числовое значение ФВ - q – отвлечённое число, показывающее отношение значения величины к единице измерения данной величины.

Единица ФВ - $/Q/$ – величина фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значение равное единице измеряемой величины. Единицу ФВ применяют для количественного выражения однородных величин.

В практической деятельности производят измерения различных величин, характеризующих свойства тел, веществ, явлений и процессов. Разнообразные количественные или качественные проявления любого свойства образуют множества, отображения которых образуют шкалы.

Шкала ФВ – упорядоченная последовательность значений, принятая по соглашению на основании результатов точных измерений. В соответствии с логической структурой проявления свойств различают шкалы измерений:

- шкала наименований (шкала цветов);
- шкала порядка (шкалы вязкости вещества, силы ветра);
- шкала интервалов (шкалы летоисчисления, температур);
- шкала отношений, (шкалы массы, термодинамической температуры);
- абсолютная шкала (шкалы относительных величин - усиления, ослабления).

Шкалы наименований и порядка называют неметрическими (концептуальными), шкалы интервалов и соотношений - метрическими. Метрические и абсолютные шкалы относят к разряду линейных. Практическая реализация шкал из-

мерений осуществляют стандартизацией шкал, единиц измерений, способов и условий их однозначного воспроизведения.

4 Системы единиц физических величин. Система SI

Система ФВ – совокупность ФВ, в которой одни величины принимают независимыми, а другие являются их функциями.

Обосновано, но произвольным образом выбирают несколько ФВ и называют *основными*. Остальные выражают через основные на основе известных уравнений связи между ними и называют *производными*.

Система единиц ФВ – совокупность основных, производных и дополнительных единиц ФВ, образованная в соответствии с принятыми принципами.

В науке и технике в разное время применяли системы единиц:

- СГС (сантиметр, грамм, секунда);
- МКС (метр, килограмм, секунда);
- МКСГ (метр, килограмм, секунда, градус);
- МКСА (метр, килограмм, секунда, ампер);
- МСС (метр, секунда, свеча) и ряд других.

Единая международная система единиц (SI) принята Генеральной конференцией по мерам и весам в 1960 г. На территории РФ действует в соответствии с ГОСТ 8.417-2002 система единиц SI. Международная система (SI, фр. Le Système International d'Unités) для механических единиц совпадает с системой МКС, а для электромагнитных – с системой МКСА.

Система SI принята для применения в большинстве стран мира, что обусловлено её достоинствами:

- универсальность, применение во всех областях науки и техники;
- унификация всех областей и видов измерений;
- когерентность величин;
- возможность воспроизведения единиц с высокой точностью;
- упрощение записи формул в физике, химии, технических науках;
- уменьшение числа допускаемых единиц измерения;
- единая система образования десятичных кратных и дольных единиц, имеющих собственные наименования;
- облегчение педагогического процесса в средней и высшей школах;
- лучшее взаимопонимание при развитии научно-технических и экономических связей между различными странами.

Международная система физических единиц СИ включает семь основных и две дополнительные единицы.

Основные единицы системы SI:

- *метр* – единица длины – длина пути, которую проходит свет в вакууме за $1/299\,792\,458$ долю секунды;

- *килограмм* – единица массы – масса международного прототипа – цилиндра, изготовленного из сплава платины и иридия;

-*секунда* – единица времени - продолжительность 9 192 631 770 периодов излучения, соответствующих переходу между двумя уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия Cs^{133} ;

-*ампер* – единица силы тока - сила тока, которая при прохождении по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 метр один от другого, в вакууме создавала бы между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Ньютонов на каждый метр длины;

-*кельвин* – единица температуры - температура, составляющая $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды;

-*моль* – единица количества вещества - количество вещества, содержащее столько же структурных элементов, сколько атомов содержится в нуклиде углерода C^{12} – массой 0,012 кг;

-*кандела* – единица силы света - сила света в заданном направлении от источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила которого составляет $1/683$ Вт/ср².

Дополнительные единицы системы СИ:

радиан – единица плоского угла - плоский угол между двумя радиусами окружности, длина дуги которой равна радиусу;

стерадиан – единица телесного угла - телесный угол с вершиной в центре сферы, вырезающий на поверхности площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы.

Производные единицы могут быть когерентными и некогерентными.

Когерентная единица – производная единица ФВ, связанная с другими единицами системы уравнением, в котором числовой множитель равен единице.

Единицы ФВ подразделяются на системные и внесистемные.

Системная – единица ФВ, входящая в одну из принятых систем.

Внесистемная – единица ФВ, не входящая ни в одну из принятых систем единиц.

По отношению к единицам системы SI внесистемные единицы подразделяют на:

- допускаемые к применению наравне с единицами системы SI (единица массы – тонна, плоского угла – градус, минута, секунда);
- допускаемые к применению в специальных областях науки (единицы длины в астрономии – астрономическая единица, парсек, световой год);
- временно допускаемые к применению наравне с единицами SI (единица длины в морском деле – миля, массы в ювелирном деле – карат);
- изъятые из употребления (единица давления – миллиметр ртутного столба, мощности – лошадиная сила).

Производные единицы системы SI, имеющие специальные названия, приведены в таблице 1. Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами системы SI, приведены в таблице 2. Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименования приведены в таблице 3.

Таблица 1 Производные единицы системы СИ, имеющие специальные названия

Величина	Единица	
Наименование	Наименование	Обозначение
Частота	герц	Гц
Сила, вес	ньютон	Н
Давление, механическое напряжение	паскаль	Па
Энергия, работа, количество теплоты	джоуль	Дж
Мощность	ватт	Вт
Количество электричества	кулон	Кл
Электрическое напряжение	вольт	В
Электрическая ёмкость	фарад	Ф
Электрическое сопротивление	Ом	Ом
Электрическая проводимость	сименс	См
Поток магнитной индукции	вебер	Вб
Магнитная индукция	тесла	Тл
Индуктивность	генри	Гн
Световой поток	люмен	лм
Освещённость	люкс	лк
Активность радионуклида	беккерель	Бк
Поглощённая доза ионизирующего излучения	грей	Гр
Эквивалентная доза излучения	зиверт	Зв

Таблица 2 Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ

Наименование величины	Единица		
	Наименование	Обозначение	Соотношение с единицей СИ
Масса	тонна	т	10^3 кг
	атомная единица массы	а. е. м.	$1,66 \cdot 10^{-27}$ кг
Время	минута	мин	60 с
	час	ч	3 600 с
	сутки	сут	86 400 с
Плоский угол	градус	$^{\circ}$	$1,745 \cdot 10^{-2}$ рад
	минута	$'$	$2,909 \cdot 10^{-4}$ рад
	секунда	$''$	$4,848 \cdot 10^{-6}$ рад
Длина	астрономическая единица	а. е.	$1,456 \cdot 10^{11}$ м
	световой год	св. год	$9,461 \cdot 10^{15}$ м
	парсек	ПК	$3,086 \cdot 10^{16}$ м
Оптическая сила	диоптрия	дптр	1 м^{-1}
Площадь	гектар	га	$1 \cdot 10^4 \text{ м}^2$
Энергия	электрон-вольт	эВ	$1,602 \cdot 10^{-19}$ Дж
Полная мощность	вольт-ампер	ВА	-
Реактивная мощность	вар	вар	-

Таблица 3 Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименования

Множитель	Приставка	Обозначение		Множитель	Приставка	Обозначение	
		международное	русское			международное	русское
10^{18}	экса	E	Э	10^{-1}	деци	d	д
10^{15}	пета	P	П	10^{-2}	санти	c	с
10^{12}	тера	T	Т	10^{-3}	милли	m	м
10^9	гига	G	Г	10^{-6}	микро	μ	мк
10^6	мега	M	М	10^{-9}	нано	n	н
10^3	кило	k	к	10^{-12}	пико	p	п
10^2	гекто	h	г	10^{-15}	фемто	f	ф
10^1	дека	da	да	10^{-18}	атто	a	а

5 Виды, методы измерений

Виды измерений определяются физическим характером измеряемой величины, требуемой точностью измерения, скоростью изменения измеряемой величины, условиями измерений. С развитием науки и техники увеличивается количество видов и совершенствуются методы измерений.

В зависимости от цели различают измерения: контрольные, диагностические и прогностические, лабораторные и технические, эталонные и поверочные, абсолютные и относительные.

Измерения могут быть: контактные и бесконтактные, одно- и многократные, необходимые и избыточные, статические и динамические, с точным и приблизительным оцениванием погрешности.

По способу получения результата различают *виды* измерений:

- *прямые* – искомое значение величины находят экспериментальным сравнением её с единицей измерения (мерой) или отсчётом показаний прибора, отградуированного в установленных единицах (измерение длины линейкой, измерение температуры термометром). Прямые измерения – основа более сложных;

- *косвенные* – искомое значение величины находят по результатам прямых измерений нескольких величин, связанных с искомой известной зависимостью (измерение плотности тела по измеренным массе и линейным размерам, измерение мощности электрической цепи по измеренным значениям силы тока и напряжения);

- *совокупные* – искомое значение величины находят решением системы уравнений, составленных по результатам производимых одновременно прямых измерений нескольких *одноимённых* величин (измерение температурного коэффициента линейного расширения);

- *совместные* – искомое значение величины находят решением системы уравнений, составленных по результатам производимых одновременно прямых и косвенных измерений нескольких *неодноимённых* величин (измерение электрического сопротивления проводника при различных фиксированных значениях температуры).

Метод измерения – прием или совокупность приемов сравнения измеряемой физической величины с ее единицей в соответствии с реализованным принципом измерений.

Принцип измерения – физическое явление или эффект, положенное в основу измерений (измерение температуры по расширению тела).

Стандартные методы прямых измерений:

- *непосредственной оценки* – метод измерений, при котором значение величины определяют непосредственно по показывающему средству измерений (измерение давления пружинным манометром, силы электрического тока - амперметром);

- *сравнения с мерой* – метод измерений, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой (измерение массы на рычажных весах с помощью гирь);

- *дополнения* – метод сравнения с мерой, в котором значение измеряемой величины дополняется мерой этой же величины с таким расчетом, чтобы на прибор сравнения воздействовала их сумма, равная заранее заданному значению;

- *дифференциальный* – метод измерений, при котором измеряемая величина сравнивается с однородной величиной, имеющей известное значение, незначительно отличающееся от значения измеряемой величины, и при котором измеряется разность между этими двумя величинами;

- *нулевой* – метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и меры на прибор сравнения доводят до нуля;

- *замещения* – метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают мерой с известным значением величины (поочередное помещение измеряемой массы и гирь на одну и ту же чашу весов).

Нестандартные методы измерений:

- *противопоставления* – метод, при котором измеряемая величина и величина, воспроизводимая мерой, одновременно действуют на прибор сравнения (измерение массы на равноплечих весах с помещением измеряемой массы и уравновешивающих её гирь на двух чашах);

- *совпадения* – метод, при котором разность между сравниваемыми величинами измеряют по совпадению отметок шкал или периодических сигналов (штангенциркуль, стробоскоп).

6 Средства измерений. Метрологические характеристики СИ

Средство измерения (СИ) – техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу ФВ, размер которой принимается неизменным в пределах установленной погрешности в течение известного интервала времени.

СИ сгруппированы по отдельным классификационным признакам:

- *по способу регистрации сигнала* - показывающие, регистрирующие (печатающие, пишущие), комбинированные (одновременно показывающие и регистрирующие), интегрирующие (суммирующие);

- по роду выходного сигнала - аналоговые, цифровые, аналого-цифровые;
- по физической природе измеряемой величины - механические, гидравлические, пневматические, тепловые, акустические, электрические, электронные, комбинированные и прочие;
- по виду шкалы - с равномерной и неравномерной шкалой, с нулевой отметкой внутри, на краю или вне шкалы;
- по степени автоматизации - неавтоматические (с ручной наводкой), автоматизированные, автоматические;
- по характеру использования - образцовые, лабораторные, технические (промышленные), полевые.

Основные виды СИ:

- *мера* – средство, хранящее или воспроизводящее ФВ заданного размера. Мера может быть однозначной (гиря, калибр) и многозначной (измерительная линейка, магазин электрических сопротивлений). Измерение методом сравнения с мерой выполняют с помощью специальных средств - компараторов (равноплечие весы, электрический измерительный мост). В ряде случаев в качестве компаратора выступает человек - оператор;
- *измерительный преобразователь* – средство, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, обработки, хранения, но не доступной для непосредственного восприятия оператором (термопара, термометр сопротивления, усилитель);
- *измерительный прибор* – средство, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия оператором (амперметр, вольтметр, манометр);
- *измерительная установка* – совокупность функционально объединённых СИ и вспомогательных устройств, расположенных в одном месте (установки для поверки измерительных приборов, испытаний электротехнических материалов);
- *измерительная система* – комплекс СИ и устройств связи (проводная, инфракрасная, радио, телевизионная, оптоволоконная), предназначенный для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для использования в системах автоматического контроля и управления;
- *информационно-вычислительный комплекс (ИВК)* – системы автоматического контроля и управления, технического диагностирования, распознавания образов на базе микропроцессорной и вычислительной техники;
- *измерительные принадлежности* – вспомогательные средства измерений величин (термометр, психрометр для измерения параметров воздуха).

По метрологическому назначению СИ подразделяют на два вида:

- метрологические (эталоны);
- рабочие (лабораторные, производственные, полевые).

Эталон – высокоточная мера, предназначенная для воспроизведения, хранения единицы величины с целью передачи её значения другим менее точным СИ. Эталоны классифицируют на первичные (составляют основу государственной системы измерений), вторичные, рабочие (разрядные). Рабочие эталоны воспринимают размер единицы от вторичных эталонов и передают его рабочим СИ.

Эталонная база РФ имеет в своём составе 128 государственных и более 250 вторичных эталонов ФВ.

Перспективное направление развития эталонов – переход на эталоны, основанные на квантовых эффектах. Способность таких эталонов воспроизводить единицы величин не зависит от внешних условий, географического местонахождения, времени.

Рабочие СИ – средства измерений, предназначенные для выполнения измерений в лабораторных и производственных условиях.

Метрологические характеристики (МХ) – характеристики, которые позволяют судить о пригодности СИ для измерений в известном диапазоне с известной точностью.

Индикаторы – приборы и вещества, не имеющие нормированных МХ.

МХ вводят для СИ с целями:

- обеспечения возможности установления точности измерений;
- достижения взаимозаменяемости СИ;
- сравнения и выбора нужных СИ по точности измерений;
- определения погрешности измерительных систем и установок на основе МХ входящих в них СИ;
- оценки технического состояния СИ при поверке.

Нормальные МХ устанавливаются нормативными документами. Наибольшее распространение на практике получили МХ:

- *диапазон показаний* – область значений шкалы, ограниченная начальным и конечным значениями;
- *диапазон измерений* – область значений измеряемой величины, для которой нормированы допускаемые пределы погрешности;
- *цена деления шкалы* – разность значений величин, соответствующих двум соседним отметкам шкалы. СИ с равномерной шкалой имеют постоянную цену деления, а с неравномерной – переменную;
- *чувствительность S* – отношение изменения сигнала на выходе Δy к вызвавшему это изменение изменению Δx сигнала на входе:

$$S = \Delta y / \Delta x. \quad (2)$$

Для стрелочного прибора это отношение перемещения dl конца стрелки к вызвавшему его изменению dx измеряемой величины:

$$S = dl / dx; \quad (3)$$

- *постоянная прибора C* – величина обратная чувствительности:

$$C = 1/S; \quad (4)$$

- *порог чувствительности* – наименьшее значение измеряемой величины, вызывающее заметное изменение показаний прибора;

- *вариация (гистерезис) H* – разность между показаниями в данной точке диапазона измерения при возрастании и убывании измеряемой величины и неизменных внешних условий. Вариация обусловлена наличием зазоров, тепловым или упругим последствием элементов конструкции:

$$H = |x_{\epsilon} - x_y|, \quad (5)$$

где x_0 , x_y – соответственно значения измерений образцовым прибором при возрастании и убывании величины x ;

- *градуировочная характеристика* – зависимость между выходным и входным сигналами СИ, полученная расчётом или экспериментально, представленная аналитически, графически или в виде таблицы. Градуировочная характеристика может изменяться в течение времени под воздействием внутренних и внешних причин.

Основным видом МХ является *погрешность* измерений – разность между показаниями СИ и истинными (действительными) значениями ФВ. Погрешности в зависимости от влияния внешних условий на результат измерений подразделяют на два вида:

- *основная погрешность* – погрешность СИ при нормальных условиях эксплуатации. Нормальные условия: температура 293 ± 5 К, относительная влажность воздуха $65 \pm 15\%$, напряжение в сети электропитания $220 \text{ В} \pm 10\%$ с частотой $50 \text{ Гц} \pm 1\%$, атмосферное давление от 97,4 до 104,0 кПа, отсутствие наводок электрических и электромагнитных полей;

- *дополнительная погрешность* – погрешность измерений, возникающая при отклонении влияющих величин за диапазон значений, установленных нормальными условиями.

Существует несколько способов нормирования погрешности. Наибольшее применение в практике измерений аналоговыми СИ получило нормирование *класса точности* по приведённой погрешности γ , постоянной во всём диапазоне измерений.

7 Нормирование и классы точности средств измерений

Точность средств измерений определяется предельно-допустимыми погрешностями, которые могут быть получены при его использовании.

Нормированием погрешностей средств измерений называют процедуру назначения допустимых границ основной и дополнительных погрешностей измерений, при использовании этих средств измерений, а также выбор формы указания этих границ в нормативно-технической документации.

Пределы допускаемой основной и дополнительных погрешностей определяются разработчиками для каждого типа средств измерений на стадии подготовки производства. В зависимости от назначения средства измерений и характера изменения погрешности в пределах диапазона измерений нормируется для средств измерений различного типа либо предельно-допустимое значение основной абсолютной погрешности, либо предельно-допустимое значение основной приведенной погрешности, либо предельно-допустимое значение основной относительной погрешности.

Для каждого типа средств измерений характер изменения погрешности в пределах диапазона измерений зависит от принципа действия этого средства измерений и может быть самым разнообразным. Однако, как показала практика, среди этого многообразия часто удается выделить три типовых случая, определяющих выбор формы представления пределов допускаемой погрешно-

сти. Типовые варианты отклонения реальных передаточных характеристик средств измерений от номинальной характеристики и соответствующие им графики изменения предельных значений абсолютной и относительной погрешностей в зависимости от измеряемой величины приведены на рисунке 1.

Если реальная передаточная характеристика средства измерений смещена по отношению к номинальной (1-й график на рисунке 1а), абсолютная погрешность, возникающая при этом, (1-й график на рисунке 1б), не зависит от измеряемой величины.

Составляющую погрешности средства измерений, не зависящую от измеряемой величины, называют **аддитивной погрешностью**.

Если угол наклона реальной передаточной характеристики средства измерений отличается от номинального (2-й график на рисунке 1а), то абсолютная погрешность будет линейно зависеть от измеряемой величины (2-й график на рисунке 1б).

Составляющую погрешности средства измерений, линейно зависящую от измеряемой величины, называют **мультипликативной погрешностью**.

Если реальная передаточная характеристика средства измерений смещена по отношению к номинальной и угол ее наклона отличается от номинального (3-й график на рисунке 1а), то в этом случае имеет место как аддитивная, так и мультипликативная погрешность.

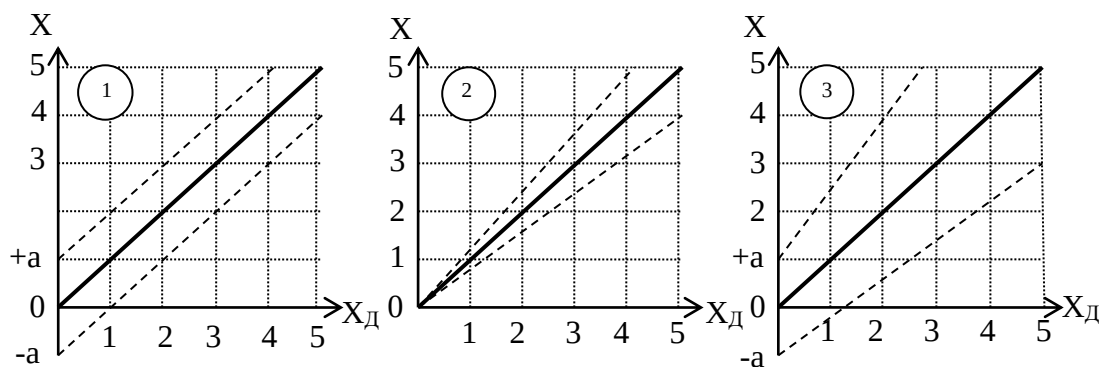
Аддитивная погрешность возникает из-за неточной установки нулевого значения перед началом измерений, ухода нуля в процессе измерений, из-за наличия трений в опорах измерительного механизма, из-за наличия термо-ЭДС в контактных соединениях и т.д.

Мультипликативная погрешность возникает при изменении коэффициентов усиления или ослабления входных сигналов (например, при изменении температуры окружающей среды, или вследствие старения элементов), из-за изменения значений, воспроизводимых мерами, встроенными в измерительные приборы, из-за изменений жесткости пружин, создающих противодействующий момент в электромеханических приборах и т.д.

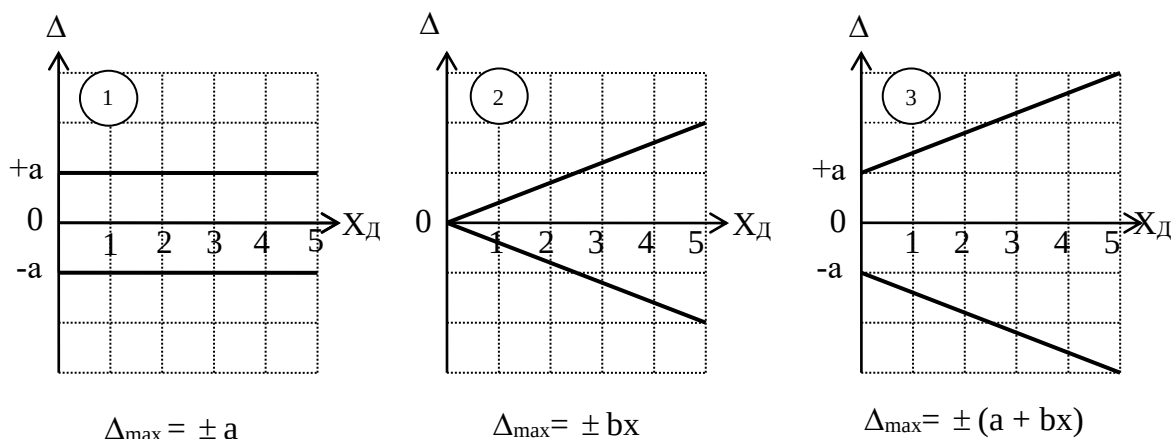
Ширина полосы неопределенности значений абсолютной (рисунке 1б) и относительной (рисунке 1в) погрешностей характеризует разброс и изменение в процессе эксплуатации индивидуальных характеристик множества находящихся в обращении средств измерений определенного типа.

А) Нормирование пределов допускаемой основной погрешности для средств измерений с преобладающей аддитивной погрешностью.

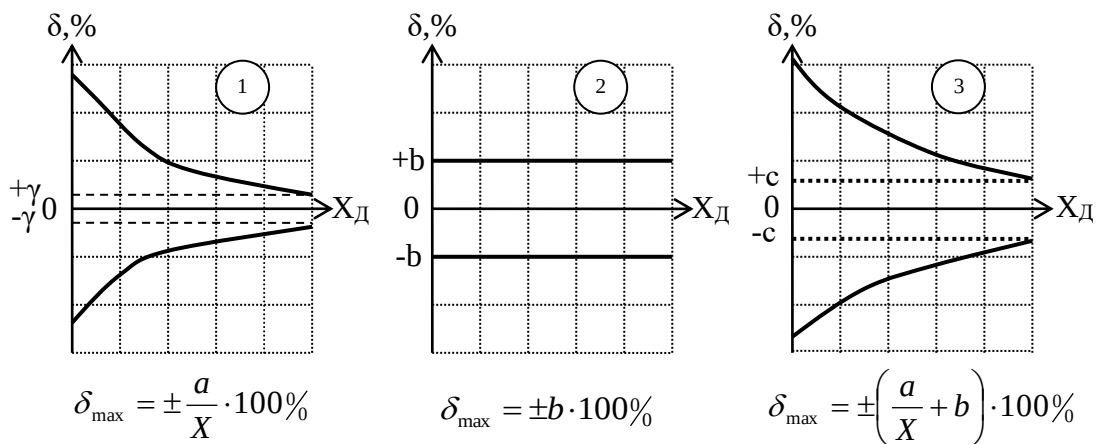
Для средств измерений с преобладающей аддитивной погрешностью (1-й график на рисунке 1) удобно нормировать одним числом предельно-допустимое значение абсолютной погрешности ($\Delta_{\max} = \pm a$). В этом случае фактическая абсолютная погрешность Δ каждого экземпляра средства измерений данного типа на различных участках шкалы может иметь различные значения, но не должна превышать предельно-допустимой величины ($\Delta \leq \pm a$).



а) Типовые варианты отклонения реальных передаточных характеристик средств измерений от номинальной характеристики.



б) Пределы допускаемой абсолютной погрешности.



в) Пределы допускаемой относительной погрешности.

Рисунок 1 Иллюстрации к выбору формы представления пределов допускаемой основной погрешности

В многопредельных измерительных приборах с преобладающей аддитивной погрешностью для каждого предела измерений пришлось бы указывать свое значение предельно допустимой абсолютной погрешности. К сожалению, как видно из 1-го графика на рисунке 1в, нормировать одним числом предел допускаемой относительной погрешности в различных точках шкалы не представляется возможным. По этой причине для средств измерений с преобладающей аддитивной погрешностью часто нормируют одним числом значение так называемой **основной приведенной относительной погрешности**

Ширина полосы неопределенности значений абсолютной (рисунке 1б) и относительной (рисунке 1в) погрешностей характеризует разброс и изменение в процессе эксплуатации индивидуальных характеристик множества находящихся в обращении средств измерений определенного типа.

А) Нормирование пределов допускаемой основной погрешности для средств измерений с преобладающей аддитивной погрешностью.

Для средств измерений с преобладающей аддитивной погрешностью (1-й график на рисунке 1) удобно нормировать одним числом предельно-допустимое значение абсолютной погрешности ($\Delta_{\max} = \pm a$). В этом случае фактическая абсолютная погрешность Δ каждого экземпляра средства измерений данного типа на различных участках шкалы может иметь различные значения, но не должна превышать предельно-допустимой величины ($\Delta \leq \pm a$). В многопредельных измерительных приборах с преобладающей аддитивной погрешностью для каждого предела измерений пришлось бы указывать свое значение предельно допустимой абсолютной погрешности. К сожалению, как видно из 1-го графика на рисунке 1в, нормировать одним числом предел допускаемой относительной погрешности в различных точках шкалы не представляется возможным. По этой причине для средств измерений с преобладающей аддитивной погрешностью часто нормируют одним числом значение так называемой **основной приведенной относительной погрешности**

$$\gamma = \pm \frac{\Delta_{\max}}{X_N} \cdot 100\% = \pm \frac{a}{X_N} \cdot 100\%,$$

где X_N – нормирующее значение.

Таким способом, например, нормируются погрешности большинства электромеханических и электронных приборов со стрелочными индикаторами. В качестве нормирующего значения X_N обычно используется предел измерений ($X_N = X_{\max}$), удвоенное значение предела измерений (если нулевая отметка находится в середине шкалы), или длина шкалы (для приборов с неравномерной шкалой). Если $X_N = X_{\max}$, то значение приведенной погрешности γ равно пределу допускаемой относительной погрешности средства измерений в точке, соответствующей пределу измерений. По заданному значению предела допускаемой основной приведенной погрешности легко определить предел допускаемой основной абсолютной погрешности для каждого предела измерений многопредельного прибора:

$$\Delta_{\max} = \pm \frac{\gamma \cdot X_{\max}}{100}.$$

После этого для любой отметки шкалы X может быть произведена оценка предельно-допустимой основной относительной погрешности:

$$\delta = \pm \frac{\Delta_{\max}}{X} \cdot 100\% = \pm \gamma \frac{X_{\max}}{X}.$$

Б) Нормирование пределов допускаемой основной погрешности для средств измерений с преобладающей мультипликативной погрешностью.

Как видно из рисунка 1 (2-й график), для средств измерений с преобладающей мультипликативной погрешностью, одним числом удобно нормировать предел допускаемой основной относительной погрешности (рисунке 1в) $\delta_{\max} = \pm b \cdot 100\%$. В этом случае, фактическая относительная погрешность каждого экземпляра средства измерений данного типа на различных участках шкалы может иметь различные значения, но не должна превышать предельно допустимой величины ($\delta \leq \pm b \cdot 100\%$). По заданному значению предельно допустимой относительной погрешности $\delta_{\max}$ для любой точки шкалы может быть произведена оценка предельно-допустимой абсолютной погрешности:

$$\Delta \leq \pm \frac{\delta_{\max} \cdot X}{100\%} = \pm b \cdot X.$$

К числу средств измерений с преобладающей мультипликативной погрешностью относится большинство многозначных мер, счетчики электрической энергии, счетчики воды, расходомеры и др. Следует отметить, что для реальных средств измерений с преобладающей мультипликативной погрешностью не удастся полностью устранить аддитивную погрешность. По этой причине в технической документации всегда указывается наименьшее значение измеряемой величины, для которого предел допускаемой основной относительной погрешности ещё не превышает заданного значения $\delta_{\max}$. Ниже этого наименьшего значения измеряемой величины погрешность измерений не нормируется и является неопределенной.

В) Нормирование пределов допускаемой основной погрешности для средств измерений с соизмеримой аддитивной и мультипликативной погрешностью.

Если аддитивная и мультипликативная составляющая погрешности средства измерений соизмеримы (3-й график на рисунке 1), то задание предельно-допустимой погрешности одним числом не представляется возможным. В этом случае либо нормируется предел допускаемой абсолютной основной погрешности (указываются предельно-допустимые значения a и b), либо (чаще всего) нормируется предел допускаемой относительной основной погрешности. В последнем случае численные значения предельно-допустимых относительных погрешностей в различных точках шкалы оцениваются по формуле:

$$\delta_{\max} = \pm \left[c + d \left(\frac{X_{\max}}{X} - 1 \right) \right],$$

где $X_{\max}$ – предел измерений;

X – измеренное значение;

$d = \frac{a}{X_{\max}} \cdot 100\%$ - значение приведенной к пределу измерений

аддитивной составляющей основной погрешности;

$c = \left(b + \frac{a}{X_{\max}} \right) \cdot 100\%$ - значение результирующей относительной

основной погрешности в точке, соответствующей пределу измерений.

Рассмотренным выше способом (указанием численных значений c и d) нормируются, в частности, предельно-допустимые значения относительной основной погрешности цифровых измерительных приборов. В этом случае относительные погрешности каждого экземпляра средств измерений определенного типа не должны превышать установленных для этого типа средств измерений значений предельно-допустимой погрешности:

$$\delta \leq \delta_{\max} = \pm \left[c + d \left(\frac{X_{\max}}{X} - 1 \right) \right].$$

При этом абсолютная основная погрешность определяется по формуле

$$\Delta \leq \Delta_{\max} = \pm \frac{\delta_{\max} \cdot X}{100}.$$

Г) Нормирование дополнительных погрешностей.

Наиболее часто пределы допускаемых дополнительных погрешностей указывают в технической документации либо одним значением для всей рабочей области величины, влияющей на точность средства измерений (иногда несколькими значениями для поддиапазонов рабочей области влияющей величины), либо отношением предела допускаемой дополнительной погрешности к интервалу значений влияющей величины. Пределы допускаемых дополнительных погрешностей указываются на каждой, влияющей на точность средства измерений величине. При этом, как правило, значения дополнительных погрешностей устанавливаются в виде дольного или кратного значения предела допускаемой основной погрешности. Например, в документации может быть указано, что при температуре окружающей среды за пределами нормальной области температур, предел допускаемой дополнительной погрешности, возникающей по этой причине, не должен превышать $\pm 0,2\%$ на 10°C .

Класс точности средства измерений – это его характеристика, отражающая точностные возможности средств измерений данного типа.

Допускается буквенное или числовое обозначение классов точности. Средствам измерений, предназначенным для измерения двух и более физических величин, допускается присваивать различные классы точности для каждой измеряемой величины. Средствам измерений с двумя или более переключаемыми диапазонами измерений также допускается присваивать два или более класса точности.

Если нормируется предел допускаемой абсолютной основной погрешности, или в различных поддиапазонах измерений установлены разные значения пределов допускаемой относительной основной погрешности, то, как правило, применяется буквенное обозначение классов. Так, например платиновые термометры сопротивления изготавливают с классом допуска **A** или классом допуска **B**.

При этом для класса **A** установлен предел допускаемой абсолютной основной погрешности

$$\Delta_{\max} = (0,15 + 0,001 \cdot t_x),$$

а для класса **B**

$$\Delta_{\max} = \pm(0,3 + 0,005 \cdot t_x),$$

где t_x – температура измеряемой среды.

Если для средств измерений того или иного типа нормируется одно значение предельно-допустимой приведенной основной погрешности, или одно значение предельно-допустимой относительной основной погрешности, или указываются значения **c** и **d**, то для обозначения классов точности используются десятичные числа. В соответствии с ГОСТом 8.401-80 для обозначения классов точности допускается применение следующих чисел:

$1 \cdot 10^n$; $1,5 \cdot 10^n$; $2 \cdot 10^n$; $2,5 \cdot 10^n$; $4 \cdot 10^n$; $5 \cdot 10^n$; $6 \cdot 10^n$, где $n = 0, -1, -2$, и т.д.

Для средств измерений с преобладающей аддитивной погрешностью численное значение класса точности выбирается из указанного ряда равным предельно-допустимому значению приведенной основной погрешности, выраженной в процентах. Для средств измерений с преобладающей мультипликативной погрешностью численное значение класса точности соответствует пределу допускаемой относительной основной погрешности также выраженной в процентах. Для средств измерений с соизмеримыми аддитивными и мультипликативными погрешностями числа **c** и **d** также выбираются из указанного выше ряда. При этом класс точности средства измерений обозначается двумя числами, разделенными косой чертой, например, 0,05/0,02. В этом случае **c** = 0,05% ; **d** = 0,02%. Примеры обозначений классов точности в документации и на средствах измерений, а также расчетные формулы для оценки пределов допускаемой основной погрешности приведены в таблице 4.

Примеры обозначений классов точности средств измерений и расчетные формулы для оценки пределов допустимой основной погрешности

Форма представления нормируемой основной погрешности	Примеры обозначения класса точности		Расчетные формулы для оценки пределов допускаемой основной погрешности	Примечания
	В документации	На средствах измерений		
Нормируется предел допускаемой абсолютной основной погрешности	Варианты: - класс В ; - класс допуска В ; - класс точности В .	В	$\Delta_{\max} = \pm a$ или $\Delta_{\max} = \pm(a + bx)$ $\delta_{\max} = \pm \frac{a}{x} \cdot 100\%$ или $\delta_{\max} = \pm \left(\frac{a}{x} + b \right) \cdot 100\%$	Значения а и b приводятся в документации на средство измерений.
Нормируется предел допускаемой приведенной основной погрешности	Варианты: - класс точности 1,5 - не обозначается.	1,5	$\Delta_{\max} = \pm \frac{\gamma \cdot x_{\max}}{100}$, $\gamma = 1,5\%$ $\delta_{\max} = \pm \gamma \cdot \frac{x_{\max}}{x}$, где $x_{\max}$ – предел измерений.	Для приборов с равномерной шкалой и нулевой отметкой в начале шкалы
	Варианты: - класс точности 2,5; - не обозначается	∇	$\Delta l_{\max} = \pm \frac{\gamma \cdot L}{100}$, $\gamma = 2,5\%$ $\Delta l_{\max}$ - предел допускаемой абсолютной погрешности в мм. L - длина всей шкалы.	Для приборов с неравномерной шкалой. Длина шкалы указывается в документации.
Нормируется предел допускаемой относительной основной погрешности	Класс точности 0,5.	0,5	$\delta_{\max} = \pm b \cdot 100\% = \pm 0,5\%$ $\Delta_{\max} = \pm \frac{\delta_{\max} \cdot x}{100}$	Для средств измерений с преобладающей мультипликативной погрешностью.
	Варианты: - класс точности 0,02/0,01; - не обозначается.	0,02/0,01	$\delta_{\max} = \pm \left[0,02 + 0,01 \left(\frac{x_{\max}}{x} - 1 \right) \right] \%$ $\Delta_{\max} = \pm \frac{\delta_{\max} \cdot x}{100}$	Для средств измерений с соизмеримыми аддитивной и мультипликативной погрешностью

8 Погрешности измерений

При выполнении практических измерений важно оценить их точность. Термин «точность измерений» не имеет строго определения и используется для качественного сравнения измерительных операций. Для количественной оценки применяют термин «погрешность результата измерений». Оценка погрешности измерений одна из важнейших задач обеспечения единства измерений.

Для практических целей рассматривают систематические и случайные погрешности, выраженные в абсолютной, относительной или приведённой форме.

Абсолютная погрешность Δ – отклонение результата измерения x от действительного x_0 значения измеряемой величины, выраженное в единицах измерения (абсолютная погрешность может быть положительной или отрицательной):

$$\Delta = x - x_0 . \quad (6)$$

Относительная погрешность δ – отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины, выраженное в процентах:

$$\delta = \pm \frac{\Delta}{x_0} \cdot 100, \% . \quad (7)$$

Приведённая погрешность γ – отношение абсолютной погрешности к нормирующему x_N значению, выраженное в процентах:

$$\gamma = \pm \frac{\Delta}{x_N} \cdot 100, \% . \quad (8)$$

Нормирующее значение выбирают в зависимости от вида и характера шкалы прибора и принимают равным:

- конечному значению рабочей части шкалы, если нулевая отметка на краю или вне рабочей части шкалы;
- сумме конечных значений шкалы (без учёта знаков), если нулевая отметка внутри шкалы;
- номинальному значению, если прибор предназначен для измерения отклонения величины от номинального значения.

В практике измерений для определения действительного значения к показанию прибора вводят *поправку* c , которая численно равна абсолютной погрешности, взятой с обратным знаком:

$$\pm c = \mp \Delta . \quad (9)$$

Поправку алгебраически складывают с результатом измерений:

$$x_0 = x + (\pm c) . \quad (10)$$

В качестве действительного значения величины при многократных повторных измерениях принимают среднее арифметическое значение:

$$x_0 = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (11)$$

Для оценки отклонения отдельных результатов измерения относительно среднего определяют средне квадратичное отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}. \quad (12)$$

Доверительным интервалом $\pm \Delta_r$ называют интервал, который с заданной вероятностью, называемой **доверительной вероятностью** P_d накрывает истинное значение измеряемой величины.

При определении доверительных интервалов необходимо, прежде всего, учитывать, что закон распределения погрешностей, получаемых при проведении многократных измерений, при числе измерений в серии меньше 30, описывается не нормальным законом распределения, а так называемым законом распределения Стьюдента. И, в этих случаях, величину доверительного интервала обычно оценивают по формуле:

$$\Delta_r = t(P_d, n) \cdot \sigma_{\bar{x}}, \quad (13)$$

где $t(P_d, n)$ - так называемый коэффициент Стьюдента.

В таблице Приложения Б приведены значения коэффициентов Стьюдента $t(P_d, n)$ в зависимости от заданной доверительной вероятности и числа проведенных наблюдений n . При выполнении измерений обычно задаются доверительной вероятностью 0,95 или 0,99.

В зависимости от характера проявления, причин возникновения, и возможностей устранения различают разновидности погрешности:

- *систематическая* – остаётся постоянной или изменяется закономерно при повторных измерениях одного и того же параметра;

- *случайная* – изменяется случайным образом при повторных измерениях одного и того же параметра. Значение случайной погрешности заранее не известно, возникает из-за множества не уточнённых факторов, может быть уменьшено обработкой результатов измерений;

- *грубая (промах)* – возникает из-за ошибок оператора, неисправности СИ, резких изменений условий измерений. Грубые погрешности выявляют и устраняют в результате обработки результатов измерений.

Систематическая погрешность имеет составляющие:

- *субъективная* – составляющая систематической погрешности измерений, обусловленная индивидуальными особенностями оператора;

- *методическая* – составляющая систематической погрешности измерений, обусловленная несовершенством принятого метода измерений;

- *инструментальная* – составляющая погрешности измерения, обусловленная погрешностью применяемого средства измерений.

Систематическая погрешность может быть исключена или уменьшена за счёт устранения источников погрешности до начала измерений различными приемами (рандомизация, внесение известных поправок).

В ряде случаев определяют общую погрешность Δ_{Σ} как сумму систематической Δ_c и случайной Δ_0 погрешностей:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_c + \Delta_0. \quad (14)$$

В зависимости от изменения её величины погрешность измерения может быть:

- *аддитивная* – не изменяется во всём диапазоне измерения;

- *мультипликативная* – изменяется пропорционально измеряемой величине.

В большинстве случаев аддитивная и мультипликативная составляющие действуют одновременно.

В процессе эксплуатации СИ метрологические характеристики и параметры СИ претерпевают изменения. Эти изменения носят случайный монотонный или флуктуирующий характер и приводят к отказам. Важнейший параметр – *надёжность* - характеризует поведение СИ с течением времени и включает понятия:

- *стабильность* – способность сохранять МХ неизменными;

- *безотказность* – свойство непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени;

- *долговечность* – возможность сохранения работоспособности до наступления предельного состояния;

- *ремонтпригодность* – приспособленность к поддержанию работоспособного состояния посредством технического обслуживания и ремонта;

- *сохраняемость* – свойство поддерживать показатели надёжности в течение и после хранения, транспортировки.

9 Правила округления и записи результата измерений

Нормирование пределов допустимых погрешностей средств измерений производится указанием значения погрешностей с одной или двумя значащими цифрами. По этой причине при расчете значений погрешностей измерений также должны быть оставлены только первые одна или две значащие цифры. Для округления используются следующие правила:

1. Погрешность результата измерения указывается двумя значащими цифрами, если первая из них более 2, и одной значащей цифрой, если первая из них 3 или более.

2. Показание прибора округляется до того же десятичного разряда, которым заканчивается округленное значение абсолютной погрешности.

3. Округление производится в окончательном ответе, промежуточные вычисления выполняют с одной-двумя избыточными цифрами.

Пример 1

- показание прибора 5,361 В;
- вычисленное значение абсолютной погрешности $\pm 0,284$ В;
- округленное значение абсолютной погрешности $\pm 0,26$ В;
- результат измерения $(5,36 \pm 0,26)$ В.

Пример 2

- показание прибора 35,67 мА;
- вычисленное значение абсолютной погрешности $\pm 0,541$ мА;
- округленное значение абсолютной погрешности $\pm 0,5$ мА;
- результат измерения $(35,7 \pm 0,5)$ мА.

Пример 3

- вычисленное значение относительной погрешности $\pm 1,268$ %;
- округленное значение относительной погрешности $\pm 1,3$ %.

Пример 4

- вычисленное значение относительной погрешности $\pm 0,367$ %;
- округленное значение относительной погрешности $\pm 0,4$ %.

10 Метрологическое обеспечение, службы и организации

Метрологическое обеспечение (МО) – установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил, норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений. Основная тенденция развития МО – переход от обеспечения единства и требований точности измерений к принципиально новой задаче обеспечения качества измерений.

Качество измерений – совокупность свойств СИ, обеспечивающих получение в установленный срок результатов измерения с требуемой точностью, достоверностью, правильностью, сходимостью и воспроизводимостью.

Точность измерения – степень близости результата измерения к истинному значению измеряемой величины.

Правильность измерения – степень близости систематической погрешности измерения к нулю.

Достоверность измерения – степень близости случайной погрешности к нулю.

Сходимость результатов измерения – близость результатов двух испытаний, полученных одним методом, на идентичных установках, в одной лаборатории.

Воспроизводимость результатов измерения – близость результатов двух испытаний, полученных в разных лабораториях.

МО имеет научную, организационную, нормативную и техническую составляющие. Разработка и проведение мероприятий МО возложено на МС.

Функции МО - обеспечение измерений, испытаний, контроля в целом а также параметров:

- технологических процессов, производств, организаций;
- продукции на всех стадиях её жизненного цикла.

Основные задачи МО:

- установление рациональной номенклатуры измеряемых параметров и оптимальных норм точности измерений при контроле качества продукции;
- технико-экономическое обоснование выбора СИ, установление их рациональной номенклатуры;
- стандартизация, унификация и агрегатирование применяемой контрольно-измерительной техники;
- поверка, метрологическая аттестация и калибровка контрольно-измерительного и испытательного оборудования;
- проведение метрологической экспертизы проектов нормативной, конструкторской и технологической документации;
- подготовка работников соответствующих служб предприятий к выполнению контрольно-измерительных операций.

Государственное управление деятельности по обеспечению единства измерений в России осуществляет Федеральное агентство РФ по техническому регулированию и метрологии, в ведении которой находятся организации:

- *Государственная метрологическая служба (ГМС);*
- *Государственная служба времени и частоты и определения параметров вращения земли (ГСВЧ);*
- *Государственная служба стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов (ГССО);*
- *Государственная служба стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов (ГСССД).*

Основные задачи Федерального агентства РФ по техническому регулированию и метрологии в области метрологии:

- реализация государственной политики в сфере метрологии, установление и использование стандартов, эталонов, единиц величин;
- осуществление мер по защите прав потребителей и интересов государства в области контроля за соблюдением безопасности товаров (услуг);
- организация функционирования систем обеспечения единства измерений, аккредитации, сбора и анализа научно-технической информации;
- проведение государственного метрологического контроля;

Росстандарт сотрудничает с международными организациями по метрологии:

- *Международное бюро мер и весов (МБМВ);*
- *Генеральная конференция мер и весов (ГКМВ);*
- *Международный комитет мер и весов (МКМВ);*
- *Международная организация законодательной метрологии (МОЗМ);*
- *Международная конференция по измерительной технике и приборостроению (ИМЕКО);*

- *Международная организация по стандартизации (ИСО)* в составе технического комитета «Величины, единицы, обозначения и переводные множители»;
- *Международная электротехническая комиссия (МЭК)*.

Проблемы метрологии в рамках СНГ решает Межгосударственный совет, созданный в соответствии с межправительственным документом «Соглашение о проведении согласованной политики в области стандартизации, метрологии и сертификации».

Государственная метрологическая служба (ГМС) – служба, которая несёт ответственность за метрологическое обеспечение измерений в стране на межотраслевом уровне и осуществляет государственный контроль и надзор. ГМС находится в подчинении Федерального агентства РФ по техническому регулированию и метрологии и имеет в своём составе:

- государственные научно-метрологические центры (ГНМЦ);
- территориальные органы ГМС.

Основные функции ГНМЦ:

- создание, совершенствование, хранение, применение государственных эталонов единиц величин, сличение с международными эталонами;
- выполнение фундаментальных и прикладных научно - исследовательских и опытно-конструкторских работ в области метрологии;
- разработка и совершенствование научных, нормативных, организационных и экономических основ деятельности по метрологии;
- проведение государственных испытаний СИ;
- взаимодействие с метрологическими службами (МС) федеральных органов исполнительной власти, предприятий, организаций;
- информационное обеспечение предприятий и организаций по вопросам метрологии, подготовка и переподготовка.

Метрологические службы государственных органов управления РФ и юридических лиц – службы, создаваемые в соответствии с законом «Об обеспечении единства измерений» в органах государственного управления, на предприятиях и в организациях для реализации МО.

Создание МС обязательно в сферах государственного регулирования единства измерений перечисленных в приложении А.

МС юридических лиц - самостоятельные структурные подразделения, во главе с представителем администрации, аккредитованные органами Федерального агентства РФ по техническому регулированию и метрологии. В состав МС входят калибровочные, поверочные лаборатории, подразделения по обслуживанию и ремонту СИ.

11 Формы государственного регулирования в области обеспечения единства измерений

Государственное регулирование в области обеспечения единства измерений осуществляется в следующих формах:

- 1) утверждение типа стандартных образцов или типа средств измерений;
- 2) поверка средств измерений;

- 3) метрологическая экспертиза;
- 4) государственный метрологический надзор;
- 5) аттестация методик (методов) измерений;
- 6) аккредитация юридических лиц и индивидуальных предпринимателей на выполнение работ и (или) оказание услуг в области обеспечения единства измерений.

12 Государственный метрологический надзор

Государственный метрологический надзор - контрольная деятельность в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, осуществляемая уполномоченными федеральными органами исполнительной власти и заключающаяся в систематической проверке соблюдения установленных законодательством Российской Федерации обязательных требований, а также в применении установленных законодательством Российской Федерации мер за нарушения, выявленные во время надзорных действий.

Государственный метрологический надзор осуществляется за:

- соблюдением обязательных требований в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений к измерениям, единицам величин, а также к эталонам единиц величин, стандартным образцам, средствам измерений при их выпуске из производства, ввозе на территорию Российской Федерации, продаже и применении на территории Российской Федерации;
- наличием и соблюдением аттестованных методик (методов) измерений;
- соблюдением обязательных требований к отклонениям количества фасованных товаров в упаковках от заявленного значения.

Государственный метрологический надзор распространяется на деятельность юридических лиц и индивидуальных предпринимателей, осуществляющих:

- измерения, относящиеся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений;
- выпуск из производства предназначенных для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений эталонов единиц величин, стандартных образцов и средств измерений, а также их ввоз на территорию Российской Федерации, продажу и применение на территории Российской Федерации;
- расфасовку товаров.

Юридические лица и индивидуальные предприниматели, осуществляющие выпуск из производства предназначенных для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений эталонов единиц величин, стандартных образцов и средств измерений, а также их ввоз на территорию Российской Федерации и продажу, обязаны уведомлять о данной деятельности федеральный орган исполнительной власти, осуществляющий функции по государственному метрологическому надзору, не позднее трех месяцев со дня ее осуществления. Порядок уведомления устанавливается федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по выработке государствен-

ной политики и нормативно-правовому регулированию в области обеспечения единства измерений.

Обязательные требования к отклонениям количества фасованных товаров в упаковках от заявленного значения при их расфасовке устанавливаются техническими регламентами. В технических регламентах также могут содержаться обязательные требования к оборудованию, используемому для расфасовки и контроля расфасовки, правила оценки соответствия отклонения количества фасованных товаров в упаковках от заявленного значения, обязательные требования к упаковке, маркировке или этикеткам фасованных товаров и правилам их нанесения.

Обязанность проведения проверок при осуществлении государственного метрологического надзора возлагается на должностных лиц федеральных органов исполнительной власти, осуществляющих государственный метрологический надзор, и их территориальных органов.

Должностные лица, проводящие проверку, при предъявлении служебного удостоверения и распоряжения федерального органа исполнительной власти, осуществляющего государственный метрологический надзор, о проведении проверки вправе:

- посещать объекты (территории и помещения) юридических лиц и индивидуальных предпринимателей в целях осуществления государственного метрологического надзора во время исполнения служебных обязанностей;
- получать документы и сведения, необходимые для проведения проверки.

Должностные лица, осуществляющие государственный метрологический надзор, обязаны:

- проверять соответствие используемых единиц величин единицам величин, допущенным к применению в Российской Федерации;
- проверять состояние и применение эталонов единиц величин, стандартных образцов и средств измерений в целях установления их соответствия обязательным требованиям;
- проверять наличие и соблюдение аттестованных методик (методов) измерений;
- проверять соблюдение обязательных требований к измерениям и обязательных требований к отклонениям количества фасованных товаров в упаковках от заявленного значения;
- проверять соблюдение установленного порядка уведомления о своей деятельности юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями;
- соблюдать государственную, коммерческую, служебную и иную охраняемую законом тайну.

При выявлении нарушений должностное лицо, осуществляющее государственный метрологический надзор, обязано:

- запрещать выпуск из производства, ввоз на территорию Российской Федерации и продажу предназначенных для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений стандартных образцов и средств измерений неутвержденных типов или предназначенных для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений стандартных

образцов и средств измерений, не соответствующих обязательным требованиям (за исключением выпуска из производства и ввоза на территорию Российской Федерации стандартных образцов или средств измерений, предназначенных для проведения испытаний стандартных образцов или средств измерений в целях утверждения типа);

- запрещать применение стандартных образцов и средств измерений неутвержденных типов или стандартных образцов и средств измерений, не соответствующих обязательным требованиям, а также не поверенных средств измерений при выполнении измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений;

- наносить на средства измерений знак непригодности в случаях, когда средство измерений не соответствует обязательным требованиям;

- давать обязательные к исполнению предписания и устанавливать сроки устранения нарушений установленных законодательством Российской Федерации обязательных требований;

- в случаях, предусмотренных законодательством Российской Федерации, направлять материалы о нарушениях требований законодательства Российской Федерации об обеспечении единства измерений в судебные и следственные органы, а также в федеральный орган исполнительной власти, осуществляющий аккредитацию в области обеспечения единства измерений;

- применять иные меры в соответствии с законодательством Российской Федерации.

Форма знака непригодности средств измерений и порядок его нанесения устанавливаются федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в области обеспечения единства измерений.

Руководитель поверенного предприятия на основе акта проверки обязан утвердить сроки и план организационно-технических мероприятий по устранению выявленных нарушений.

13 Утверждение типа стандартных образцов или типа средств измерений

Утверждение типа стандартных образцов или типа средств измерений - документально оформленное в установленном порядке решение о признании соответствия типа стандартных образцов или типа средств измерений метрологическим и техническим требованиям (характеристикам) на основании результатов испытаний стандартных образцов или средств измерений в целях утверждения типа;

Тип стандартных образцов или тип средств измерений, применяемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, подлежит обязательному утверждению. При утверждении типа средств измерений устанавливаются показатели точности, интервал между поверками средств измерений, а также методика поверки данного типа средств измерений.

Государственные испытания СИ – обязательные испытания СИ в сферах распространения государственного метрологического контроля и надзора с последующим утверждением их типа.

Решение об утверждении типа стандартных образцов или типа средств измерений принимается федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по оказанию государственных услуг и управлению государственным имуществом в области обеспечения единства измерений, на основании положительных результатов испытаний стандартных образцов или средств измерений в целях утверждения типа.

Утверждение типа стандартных образцов или типа средств измерений удостоверяется свидетельством об утверждении типа стандартных образцов или типа средств измерений, выдаваемым федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по оказанию государственных услуг и управлению государственным имуществом в области обеспечения единства измерений. В течение срока действия свидетельства об утверждении типа средств измерений интервал между поверками средств измерений может быть изменен только федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по оказанию государственных услуг и управлению государственным имуществом в области обеспечения единства измерений.

На каждый экземпляр средств измерений утвержденного типа, сопроводительные документы к указанным средствам измерений и на сопроводительные документы к стандартным образцам утвержденного типа наносится знак утверждения их типа. Конструкция средства измерений должна обеспечивать возможность нанесения этого знака в месте, доступном для просмотра. Если особенности конструкции средства измерений не позволяют нанести этот знак непосредственно на средство измерений, он наносится на сопроводительные документы.

Испытания стандартных образцов или средств измерений в целях утверждения типа проводятся юридическими лицами, аккредитованными в установленном порядке в области обеспечения единства измерений.

Сведения об утвержденных типах стандартных образцов и типах средств измерений вносятся в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений.

Юридические лица и индивидуальные предприниматели, осуществляющие разработку, выпуск из производства, ввоз на территорию Российской Федерации, продажу и использование на территории Российской Федерации не предназначенных для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений стандартных образцов и средств измерений, могут в добровольном порядке представлять их на утверждение типа стандартных образцов или типа средств измерений.

14 Поверка средств измерений

Поверка средств измерений (далее также - поверка) - совокупность операций, выполняемых в целях подтверждения соответствия средств измерений метрологическим требованиям.

Поверку проводят в соответствии с методиками поверки, требованиями, изложенными в соответствующих метрологических инструкциях. Основной МХ, определяемой при поверке, является погрешность, величина которой не должна превышать допустимое значение. При поверке чаще всего используют методы:

- непосредственного сравнения измеряемых величин и величин, воспроизводимых рабочими эталонами;
- непосредственного сличения показаний поверяемого и эталонного приборов при одновременном измерении одной и той же величины.

Поверка бывает первичная, периодическая, внеочередная, экспертная.

Первичная поверка – проводится при выпуске прибора.

Периодическая поверка – выполняется через определённые промежутки времени в процессе эксплуатации или хранения прибора.

Внеочередная проверка – проходит до наступления срока периодической после длительного хранения, повторной настройки, ударного воздействия.

Экспертная поверка – организуется органом ГМС при возникновении спорных ситуаций по МХ, исправности, пригодности СИ к применению.

Средства измерений, предназначенные для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, до ввода в эксплуатацию, а также после ремонта подлежат первичной поверке, а в процессе эксплуатации - периодической поверке.

Требования к организации и проведению поверки СИ устанавливают правила ПР 50.2.006-94.

Применяющие средства измерений в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений юридические лица и индивидуальные предприниматели обязаны своевременно представлять эти средства измерений на поверку.

Поверку средств измерений осуществляют аккредитованные в установленном порядке в области обеспечения единства измерений юридические лица и индивидуальные предприниматели.

Правительством Российской Федерации устанавливается перечень средств измерений, поверка которых осуществляется только аккредитованными в установленном порядке в области обеспечения единства измерений государственными региональными центрами метрологии.

Результаты поверки средств измерений удостоверяются знаком поверки и (или) свидетельством о поверке. Конструкция средства измерений должна обеспечивать возможность нанесения знака поверки в месте, доступном для просмотра. Если особенности конструкции или условия эксплуатации средства измерений не позволяют нанести знак поверки непосредственно на средство измерений, он наносится на свидетельство о поверке.

Порядок проведения поверки средств измерений, требования к знаку поверки и содержанию свидетельства о поверке устанавливаются федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в области обеспечения единства измерений.

Сведения о результатах поверки средств измерений, предназначенных для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, передаются в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений проводящими поверку средств измерений юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями.

Средства измерений, не предназначенные для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, могут подвергаться поверке в добровольном порядке.

Правила ПР 50.2.011-94 устанавливают порядок ведения в РФ *Государственного реестра СИ*, который предназначен для:

- учёта выданных сертификатов об утверждении типа СИ;
- создания централизованного информационного фонда о СИ, допущенных к производству, выпуску в обращение и применению в РФ;
- учёта типовых программ испытаний СИ;
- организации информационного обслуживания заинтересованных лиц.

15 Калибровка средств измерений

Калибровка (калибровочные работы) – совокупность операций, выполняемых с целью определения и подтверждения действительных значений МХ и пригодности к применению СИ, не подлежащего государственному надзору.

Для проведения калибровки создана *Российская система калибровки (РСК)* – совокупность субъектов деятельности и калибровочных работ, направленных на обеспечение единства измерений в сферах, не подлежащих государственному регулированию обеспечения единства измерений. Такие СИ могут в добровольном порядке подвергаться калибровке.

Основные направления деятельности РСК:

- регистрация органов, осуществляющих аккредитацию МС юридических лиц на право проведения калибровочных работ;
- установление основных принципов и правил РСК;
- аккредитация МС юридических лиц на право проведения калибровки;
- проведение калибровочных работ;
- установление основных принципов и правил РСК;
- организационное, методическое и информационное обеспечение РСК;
- инспекционный контроль за проведением калибровочных работ.

Калибровка средств измерений выполняется с использованием эталонов единиц величин, прослеживаемых к государственным первичным эталонам соответствующих единиц величин, а при отсутствии соответствующих государственных первичных эталонов единиц величин - к национальным эталонам единиц величин иностранных государств.

Выполняющие калибровку средств измерений юридические лица и индивидуальные предприниматели в добровольном порядке могут быть аккредитованы в области обеспечения единства измерений.

Результаты калибровки средств измерений, выполненной аккредитованными в установленном порядке в области обеспечения единства измерений юри-

дическими лицами или индивидуальными предпринимателями, могут быть использованы при поверке средств измерений в порядке, установленном федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в области обеспечения единства измерений.

Организации, проводящие калибровочные работы, должны иметь:

- поверенные средства калибровки – эталоны, установки, другие СИ, применяемые для передачи размера единиц калибруемым СИ;
- документы, регламентирующие организацию и проведение калибровочных работ;
- квалифицированный персонал, помещение, удовлетворяющее нормативным требованиям.

Результаты калибровки удостоверяют калибровочным знаком, наносимым на СИ, свидетельством о калибровке, записью в эксплуатационных документах.

16 Метрологическая экспертиза

Метрологическая экспертиза - анализ и оценка правильности установления и соблюдения метрологических требований применительно к объекту, подвергаемому экспертизе. Метрологическая экспертиза проводится в обязательном (обязательная метрологическая экспертиза) или добровольном порядке.

Содержащиеся в проектах нормативных правовых актов Российской Федерации требования к измерениям, стандартным образцам и средствам измерений подлежат обязательной метрологической экспертизе. Заключение обязательной метрологической экспертизы в отношении указанных требований рассматриваются принимающими эти акты федеральными органами исполнительной власти. Обязательная метрологическая экспертиза содержащихся в проектах нормативных правовых актов Российской Федерации требований к измерениям, стандартным образцам и средствам измерений проводится государственными научными метрологическими институтами.

Обязательная метрологическая экспертиза стандартов, продукции, проектной, конструкторской, технологической документации и других объектов проводится также в порядке и случаях, предусмотренных законодательством Российской Федерации. Указанную экспертизу проводят аккредитованные в установленном порядке в области обеспечения единства измерений юридические лица и индивидуальные предприниматели.

Порядок проведения обязательной метрологической экспертизы содержащихся в проектах нормативных правовых актов Российской Федерации требований к измерениям, стандартным образцам и средствам измерений устанавливается федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в области обеспечения единства измерений.

В добровольном порядке может проводиться метрологическая экспертиза продукции, проектной, конструкторской, технологической документации и дру-

гих объектов, в отношении которых законодательством Российской Федерации не предусмотрена обязательная метрологическая экспертиза.

17 Анализ и оценка состояния измерений

Анализ состояния измерений – анализ состояния измерений, испытаний и контроля на предприятии с целью установления соответствия достигнутого уровня МО определённым требованиям и разработка на этой основе предложений по его улучшению.

В процессе анализа устанавливают:

- влияние состояния измерений, контроля и испытаний на основные технико-экономические показатели деятельности предприятия;
- наличие и потребность в необходимых нормативных документах;
- оснащённость предприятия современным КИО и потребность в нём;
- состояние организационной структуры и деятельности МС, потребность в специалистах-метрологах;
- техническое и метрологическое состояние КИО, обеспеченность ремонтом, поверкой, калибровкой.

Работу по анализу состояния измерений на предприятии проводят под руководством МС федерального органа исполнительной власти, юридического лица. На предприятии анализ осуществляют добровольно с периодичностью раз в два года или в обязательном порядке при аттестации производства, сертификации систем качества, аккредитации испытательных и метрологических лабораторий. Результаты оформляют актом.

В случае необходимости установления соответствия условий выполнения измерений требованиям Российского законодательства в области обеспечения единства измерений проводят оценку состояния измерений по МИ 2427-97.

Эту оценку состояния измерений осуществляют для:

- установления соответствия достигнутого уровня метрологического обеспечения измерений современным требованиям;
- официального удостоверения наличия в лаборатории условий, необходимых для выполнения измерений (например, для получения лицензии на вид деятельности и т.п.).

При фиксировании в акте оценки наличия условий для выполнения измерений в закреплённой за лабораторией области деятельности, ответственные за проведение оценки, оформляет свидетельство о состоянии измерений на предприятии со сроком действия до 5 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практически во всех сферах деятельности человека интенсивно применяют результаты измерений, испытаний, исследований. Важность метрологической деятельности в стране подтверждена тем, что Федеральный закон Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений», принят в пакете с законами «О защите прав потребителей». ФЗ «Об обеспечении единства измерений» устанавливает правовые основы обеспечения единства измерений в стране, регламентирует отношения государственных органов управления с юридическими и физическими лицами по вопросам, связанным с измерениями.

В экономически развитых странах расходы на операции, связанные с измерениями, достигают 15% затрат общественного труда. Перспективные направления развития метрологии составляют разработка принципиально новых средств измерений, улучшение метрологических характеристик и методик выполнения измерений, совершенствование эталонной базы. Широкое применение получают цифровые методы обработки результатов измерений. Намечен переход к эталонам единиц физических величин, основанным на квантовых эффектах. Такие эталоны не подвержены влиянию атмосферных условий, времени, географической широты местности.

Метрологические организации и службы Российской Федерации под руководством Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии ведут активную работу по совершенствованию законодательной базы метрологии.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Нормативно-правовые основы метрологии.
2. Физические свойства, величины. Измерение ФВ.
3. Системы единиц физических величин. Система SI.
4. Виды, методы измерений.
5. Средства измерений.
6. Метрологические характеристики СИ.
7. Погрешности измерений.
8. Метрологическое обеспечение, службы и организации.
9. Международные организации по метрологии.
10. Поверка, калибровка СИ.
11. Государственный метрологический надзор.
12. Государственные испытания, утверждение типа СИ.
13. Метрологическая экспертиза.
14. Анализ и оценка состояния измерений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.

1. Сергеев А.Г., Латышев М.В., Терегеря В.В. Метрология, стандартизация, сертификация: Учебное пособие. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Логос, 2010. – 560 с.: ил.
2. Лифиц И.М. Стандартизация, метрология и сертификация: Учебник. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт-Издат, 2009. – 335 с.
3. Димов Ю.В. Метрология, стандартизация и сертификация. Учебник для вузов. 3-е изд. – СПб.: Питер, 2010. – 464 с.: ил.
4. Яблонский О.П., Иванова В.А. Основы стандартизации, метрологии, сертификации: Учебник. – Ростов на/Д: Феникс, 2010. – 448 с.
5. Радкевич Я.М., Лактионов Б.И., Схиртладзе А.Г. Метрология, стандартизация и сертификация: Учеб. для вузов - 2-е изд., доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 791 с.
6. Крылова Г.Д. Основы стандартизации, сертификации, метрологии: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. – 711 с.
7. Никифоров А.Д., Бакиев Т.А. Метрология, стандартизация и сертификация: Учеб. пособие. – М.: Высш. Школа, 2002. – 422 с. : ил.
8. Басаков М.И. Сертификации продукции и услуг с основами стандартизации и метрологии: Учебное пособие. Издание 2-е, испр. и доп. – Ростов на /Д: издательский центр «МарТ», 2002. – 256 с.
9. Ранеев Г.Г., Тарасенко А.П. Методы и средства измерений: Учебник для вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 336 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(справочное)
**Сферы государственного регулирования
обеспечения единства измерений**

Сферы государственного регулирования обеспечения единства измерений распространяется на измерения, на которые установлены обязательные требования и которые выполняются при:

- 1) осуществлении деятельности в области здравоохранения;
- 2) осуществлении ветеринарной деятельности;
- 3) осуществлении деятельности в области охраны окружающей среды;
- 4) осуществлении деятельности по обеспечению безопасности при чрезвычайных ситуациях;
- 5) выполнении работ по обеспечению безопасных условий и охраны труда;
- 6) осуществлении производственного контроля за соблюдением установленных законодательством Российской Федерации требований промышленной безопасности к эксплуатации опасного производственного объекта;
- 7) осуществлении торговли и товарообменных операций, выполнении работ по расфасовке товаров;
- 8) выполнении государственных учетных операций;
- 9) оказании услуг почтовой связи и учете объема оказанных услуг электро-связи операторами связи;
- 10) осуществлении деятельности в области обороны и безопасности государства;
- 11) осуществлении геодезической и картографической деятельности;
- 12) осуществлении деятельности в области гидрометеорологии;
- 13) проведении банковских, налоговых и таможенных операций;
- 14) выполнении работ по оценке соответствия промышленной продукции и продукции других видов, а также иных объектов установленным законодательством Российской Федерации обязательным требованиям;
- 15) проведении официальных спортивных соревнований, обеспечении подготовки спортсменов высокого класса;
- 16) выполнении поручений суда, органов прокуратуры, государственных органов исполнительной власти;
- 17) осуществлении мероприятий государственного контроля (надзора).

К сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений относятся также измерения, предусмотренные законодательством Российской Федерации о техническом регулировании.

Сфера государственного регулирования обеспечения единства измерений распространяется также на единицы величин, эталоны единиц величин, стандартные образцы и средства измерений, к которым установлены обязательные требования.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
(справочное)
Значения коэффициентов Стьюдента $t(P_d, n)$.

Таблица А.1 - Значения коэффициентов Стьюдента $t(P_d, n)$

n	P_d							
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
2	1,00	1,38	1,96	3,08	6,31	12,71	31,82	63,66
3	0,82	1,06	1,34	1,89	2,92	4,30	6,97	9,93
4	0,77	0,98	1,25	1,64	2,35	3,18	4,54	5,84
5	0,74	0,94	1,19	1,53	2,13	2,78	3,75	4,60
6	0,73	0,92	1,16	1,48	2,02	2,62	3,37	4,03
7	0,72	0,91	1,13	1,44	1,94	2,45	3,14	3,71
8	0,71	0,90	1,12	1,42	1,90	2,37	3,00	3,50
9	0,71	0,89	1,11	1,40	1,86	2,31	2,90	3,36
10	0,70	0,88	1,10	1,38	1,83	2,26	2,82	3,25
16	0,69	0,87	1,07	1,34	1,75	2,13	2,60	2,95
25	0,69	0,86	1,06	1,32	1,71	2,06	2,49	2,80

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебно-методическому
комплексу
С.А. Упоров



МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ (КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ)

ЧАСТЬ 2

«СТАНДАРТИЗАЦИЯ»

Специальность

21.05.03 Технология геологической разведки

Автор: Глушкова Т.А., к.т.н.

Одобен на заседании кафедры

Геофизики

(название кафедры)

Зав.кафедрой

Талалай А. Г.

(Фамилия И.О.)

Протокол № 1 от 05.10. 2020

(Дата)

Рассмотрен методической комиссией
факультета

(название факультета)

Председатель

Бондарев В. И.

(Фамилия И.О.)

Протокол № 2 от 13.10. 2020

(Дата)

Екатеринбург
2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Правовые основы стандартизации.....	5
2 Основные понятия.....	5
3 Цели, задачи стандартизации.....	7
4 Принципы стандартизации.....	8
5 Национальный орган Российской Федерации по стандартизации.....	9
6 Государственный контроль (надзор) за соблюдением требований технических регламентов.....	11
7 Национальная система стандартизации.....	13
8 Международные, региональные организации по стандартизации.....	19
9 Информационное обеспечение стандартизации.....	23
10 Работы по стандартизации.....	24
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	29
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	29
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	29
Приложение А Перечень систем стандартов.....	30
Приложение Б Нормативные документы по стандартизации.....	31
Приложение В Общероссийские классификаторы.....	33

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития мирового сообщества характерен:

- высокими темпами интенсификации производства;
- применением широкого спектра машин, аппаратов, приборов, технологической оснастки, оборудования и инструмента;
- использованием широкой номенклатуры новых веществ, новейших материалов и современных технологий;
- применением локальных и глобальных информационных систем.
- расширением международных экономических и торговых связей.

В этих условиях в экономически развитых странах уделяют огромное внимание стандартизации как важнейшему направлению совершенствования технического уровня и качества продукции на всех стадиях её жизненного цикла - научные разработки, проектирование, производство, упаковка и маркировка, хранение, транспортировка, реализация, эксплуатация, утилизация.

Стандартизация охватывает разработку и применение норм, правил, которые отражают действие объективных технико-экономических законов и оказывают в государственном и мировом масштабах существенное позитивное влияние:

- развитие всех отраслей экономики;
- совершенствование управления экономикой и предприятиями;
- увеличение промышленного производства и рост ВВП;
- управление качеством продукции, квалификацией персонала;
- улучшение использования основных фондов, природных богатств;
- разработку и внедрение энергосберегающих, ресурсосберегающих, малоотходных технологий;
- состояние окружающей среды;
- расширение международных экономических связей и торговли.

Законодательную основу стандартизации в Российской Федерации составляют федеральные законы:

- «О защите прав потребителей» от 07.02.92;
- «Об обеспечении единства измерений» № 102-ФЗ от 26.06.2008;
- «О техническом регулировании» от 27.12.02;
- отраслевого характера в части, касающейся стандартизации.

Дальнейшее развитие экономики России связано с развитием промышленного производства, расширением международной торговли и экономического сотрудничества, увеличением количества и технического совершенства товаров, расширением спектра и повышением качества услуг на базе широкого применения международных и национальных стандартов.

Стандартизация - деятельность по установлению правил и характеристик в целях их добровольного многократного использования, направленная на достижение упорядоченности в сферах производства и обращения продукции и повышение конкурентоспособности продукции, работ или услуг.

1 Правовые основы стандартизации

Отношения в области стандартизации регулируют и обеспечивают законодательные, нормативные и другие акты РФ:

- Федеральный закон «О техническом регулировании»;
- закон РФ «О защите прав потребителей»;
- Федеральный закон РФ «Об обеспечении единства измерений»;
- федеральные законы отраслевого характера;
- указы Президента РФ;
- нормативные акты (постановления, распоряжения) Правительства РФ;
- подзаконные акты, направленные на решение социально - экономических задач, предусматривающих использование стандартизации;
- приказы национального органа РФ по стандартизации.

В целях усиления роли стандартизации в научно-техническом прогрессе, повышения качества продукции, экономии материально - энергетических ресурсов в РФ действует *система* Стандартизации в Российской Федерации.

Система – комплекс взаимоувязанных правил и положений, определяющих:

- цели и задачи стандартизации;
- структуру органов, подразделений по стандартизации, их права и обязанности;
- организацию и методику проведения работ по стандартизации во всех отраслях;
- порядок разработки, оформления, издания, внедрения стандартов и другой нормативно-технической документации, формы контроля их соблюдения.

ГОСТ Р 1.0-2004 Стандартизация в Российской Федерации. Основные положения.

ГОСТ Р 1.2-2004 Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные Российской Федерации. Правила разработки, утверждения, обновления и отмены.

ГОСТ Р 1.4 -2004 Стандарты организаций. Общие положения.

ГОСТ Р 1.5 -2004 Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные Российской Федерации. Правила построения, изложения, оформления и обозначения.

ГОСТ Р 1.8 -2004 Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты межгосударственные. Правила проведения в Российской Федерации работ по разработке, применению, обновлению и прекращению применения

ГОСТ Р 1.10 -2004 Стандартизация в Российской Федерации. Правила стандартизации и рекомендации по стандартизации. Порядок разработки, утверждения, изменения, пересмотра и отмены.

ГОСТ Р 1.12-2004 Стандартизация в Российской Федерации. Термины и определения.

2 Основные понятия

Гармонизация стандарта – приведение его содержания в соответствие с другим стандартом (региональным, международным).

Государственный стандарт (ГОСТ Р) – национальный стандарт, принятый федеральным органом исполнительной власти РФ по стандартизации или строительству.

Классификатор – документ, содержащий систематизированный перечень кодов и наименований объектов классификации и классифицированных группировок, разработанный и утверждённый в установленном порядке, обязательный для применения на различных уровнях.

Международный стандарт – стандарт, принятый международной организацией по стандартизации.

Методические инструкции (МИ) – нормативные документы методического содержания, разработанные организациями, подведомственными национальному органу по стандартизации.

Национальный стандарт – стандарт, утверждённый национальным органом по стандартизации.

Нормативный документ – документ, устанавливающий правила, общие принципы или характеристики, касающиеся различных видов деятельности или их результатов, подзаконный акт, принятый Правительством РФ.

Область стандартизации – совокупность объектов стандартизации.

Объект стандартизации – продукция, работа, процесс или услуга, для которой разрабатывают требования, характеристики, параметры или правила.

Правила (ПР) – нормативный документ, устанавливающий обязательные для применения организационные или общетехнические положения, порядки, методы выполнения работ, в том числе межгосударственные (ПМГ).

Проект стандарта – предлагаемый разработчиком проект нормативного документа, предназначенный для широкого обсуждения, голосования и принятия в качестве стандарта.

Региональный стандарт – стандарт, принятый региональной организацией по стандартизации и доступный широкому кругу пользователей.

Регламент – документ, содержащий обязательные правовые нормы, принятый органом исполнительной власти.

Рекомендации (Р) – нормативный документ, содержащий добровольные для применения организационные или общетехнические положения, порядки, методы выполнения работ, в том числе межгосударственные (РМГ).

Руководящие документы (РД) – нормативные документы методического содержания, разработанные организациями, подведомственными национальному органу по стандартизации.

Стандарт – документ, в котором в целях добровольного многократного использования устанавливаются характеристики продукции, правила осуществления процессов производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации продукции, условия выполнения работ или оказания услуг. Стандарт может со-

держат требования к терминологии, маркировке, этикеткам и правилам их нанесения.

Стандарт научно-технических, инженерных обществ (СТО) - стандарт, разработанный общественным объединением.

Технические условия (ТУ) - нормативный документ, устанавливающий технические требования, которым должна удовлетворять продукция, процесс или услуга.

Технический регламент (ТР) – документ, содержащий технические требования непосредственно или путём ссылки на стандарт, технические условия, либо путём включения содержания этих документов.

3 Цели, принципы, задачи стандартизации

Стандартизация как деятельность по установлению правил и характеристик в сферах производства и обращения продукции имеет общие и конкретные цели.

Стандартизация осуществляется *в целях*:

- повышение уровня безопасности жизни и здоровья граждан, имущества физических и юридических лиц, государственного и муниципального имущества, объектов с учетом риска возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, повышение уровня экологической безопасности, безопасности жизни и здоровья животных и растений;

- обеспечение конкурентоспособности и качества продукции (работ, услуг), единства измерений, рационального использования ресурсов, взаимозаменяемости технических средств (машин и оборудования, их составных частей, комплектующих изделий и материалов), технической и информационной совместимости, сопоставимости результатов исследований (испытаний) и измерений, технических и экономико-статистических данных, проведения анализа характеристик продукции (работ, услуг), исполнения государственных заказов, добровольного подтверждения соответствия продукции (работ, услуг);

- содействие соблюдению требований технических регламентов;

- создание систем классификации и кодирования технико-экономической и социальной информации, систем каталогизации продукции (работ, услуг), систем обеспечения качества продукции (работ, услуг), систем поиска и передачи данных, содействие проведению работ по унификации.

Конкретные цели стандартизации относят к:

- определённой области материальной, нематериальной деятельности;
- отрасли производства продукции, оказания услуг;
- предприятию, фирме;
- виду продукции.

4 Принципы стандартизации

Стандартизацию осуществляют в соответствии с *принципами*:

- добровольного применения стандартов;
- максимального учёта при разработке стандартов законных интересов заинтересованных лиц;

- применения международного стандарта как основы разработки национального стандарта, за исключением случаев, когда это невозможно вследствие несоответствия требований международных стандартов климатическим и географическим особенностям РФ, техническим и (или) технологическим особенностям или по иным основаниям, либо РФ выступала против принятия международного стандарта или отдельного его положения;

- недопустимости создания препятствий производству и обращению продукции, выполнению работ и оказанию услуг в большей степени, чем это минимально необходимо для выполнения целей стандартизации;

- недопустимости установления таких стандартов, которые противоречат требованиям ТР;

- обеспечения условий для единообразного применения стандартов.

5 Документы в области стандартизации

К документам по стандартизации, используемым в РФ, относят:

- национальные стандарты;
- правила стандартизации;
- нормы и рекомендации в области стандартизации;
- применяемые в установленном порядке классификации, общероссийские классификаторы технико-экономической и социальной информации;
- стандарты организаций;
- своды правил.

Объектами национальных стандартов могут быть:

- характеристики продукции;
- правила выполнения технических документов;
- правила осуществления процессов постановки на производство, хранения, перевозок, реализации, утилизации;
- правила оказания услуг, выполнения работ;
- терминология в различных областях деятельности;
- требования к маркировке продукции и тары, способам упаковки;
- принципы, нормы, правила в области организации деятельности предприятий.

Объектами стандартов организаций могут быть:

- характеристики продукции;
- принципы, нормы, правила в области различных сторон деятельности предприятия, организации.

Важнейшие, перспективные задачи стандартизации:

- обеспечение взаимопонимания между разработчиком, изготовителем, продавцом и заказчиком, покупателем, потребителем;
- установление оптимальных требований к номенклатуре, качеству продукции в интересах потребителя, государства;
- определение требований по совместимости (конструктивной, электрической, электромагнитной, программной, информационной) и взаимозаменяемости продукции;

- унификация на основе применения параметрических и типоразмерных рядов, базовых конструкций, конструктивно-унифицированных узлов, блочно-модульных составных частей изделий;

- нормативное обеспечение межгосударственных и национальных социально-экономических и научно-технических проектов, инфраструктурных комплексов (транспорт, связь, информационные системы, оборона страны, охрана окружающей среды, безопасность населения);

- определение метрологических норм, правил, положений, требований;

- установление требований к современным ресурсосберегающим и малоотходным технологиям;

- создание и ведение систем классификации, кодирования;

- разработка, внедрение и ведение систем каталогизации для обеспечения потребителей информацией о номенклатуре и технических характеристиках товаров, услуг, процессов;

- содействие выполнению законодательства РФ средствами технического регулирования.

В зависимости от того, участники какого географического, экономического, политического региона мира принимают стандарт, различают уровни стандартизации:

- *международный;*

- *региональный;*

- *национальный;*

- *административно-территориальный.*

В мировом сообществе имеет место тенденция гармонизации национальных стандартов с международными стандартами, которая отвечает интересам экономически развитых и развивающихся стран.

5 Национальный орган Российской Федерации по стандартизации

Национальный орган по стандартизации – *Росстандарт (ранее Федеральное агентство Российской Федерации по техническому регулированию и метрологии, а до 2004 г. Госстандарт РФ)*, входящее в состав Министерства промышленности и энергетики РФ, - является органом государственной исполнительной власти по техническому регулированию, осуществляющим межотраслевую координацию и функциональное регулирование в области технического регулирования, стандартизации, оценки соответствия, метрологии.

В структуру *Росстандарта* входят управления:

- метрологии и надзора;

- технического регулирования и стандартизации;

- развития, информационного обеспечения и аккредитации;

- экономики, бюджетного планирования и госсобственности;

- международного и регионального сотрудничества.

Основные направления деятельности национального органа по стандартизации:

- научно-техническое;

- организационное;
- представительское.

Координацию работ по техническому регулированию, стандартизации, оценке соответствия в области строительства, архитектуры, производства строительных материалов и в жилищно-коммунальном хозяйстве осуществляет *Федеральное агентство Российской Федерации по строительству и ЖКХ* (до 2004 г. Госстрой РФ).

Основные функции национального органа по стандартизации:

- утверждение национальных стандартов;
- принятие программ разработки национальных стандартов;
- обеспечение соответствия национальной системы стандартизации интересам экономики, состоянию материально-технической базы;
- содействие научно-техническому прогрессу;
- осуществление учёта национальных стандартов, правил стандартизации, норм и рекомендаций, обеспечение их доступности заинтересованным лицам;
- создание технических комитетов (ТК) по стандартизации и координация их деятельности;
- организация опубликования национальных стандартов, их распространение;
- участие в работе, представление прав и защита интересов РФ в международных организациях при создании международных стандартов;
- утверждение знака соответствия национальным стандартам.

Национальному органу по стандартизации предоставлены права:

- координации деятельности государственных органов управления, касающейся технического регулирования, стандартизации, оценки соответствия, метрологии;
- проведения государственного контроля (надзора) за соблюдением требований ТР;
- принятия мер по запрещению выпуска и реализации продукции, изготовленной с нарушением требований ТР;
- организации профессиональной подготовки и переподготовки кадров в области технического регулирования;
- издания научно-технических журналов, справочников и другой литературы по вопросам технического регулирования и управления качеством.

ТК - постоянный рабочий орган *Росстандарта* в области стандартизации, специализированный по объектам. В ТК на паритетных началах и добровольной основе входят представители:

- федеральных органов исполнительной власти;
- научных организаций, проектно-конструкторских учреждений;
- производственных предприятий, фирм;
- инженерных и научных обществ;
- объединений предпринимателей и обществ по защите прав потребителей.

Основные функции ТК:

- определение концепций развития стандартизации;
- составление проектов новых стандартов и обновление действующих;

- оказание научно-методической помощи организациям, разрабатывающим стандарты и применяющим нормативные документы;
- привлечение к деятельности по стандартизации союзов предпринимателей и обществ потребителей;
- проведение гармонизации отечественных стандартов с международными стандартами;
- подготовка обоснованных позиций РФ для голосования по проектам стандартов в международных организациях;
- проведение и участие в работе заседаний международных организаций по стандартизации.

Заседания ТК по стандартизации являются открытыми.

Материалы заседаний подлежат опубликованию в аналоговой форме (специальные печатные издания, средства массовой информации) и электронно-цифровой форме (цифровые информационные системы общего пользования), доступны для заинтересованных лиц.

6 Государственный контроль (надзор) за соблюдением требований технических регламентов

Государственный контроль (надзор) за соблюдением ТР осуществляют:

- федеральные органы исполнительной власти;
- органы исполнительной власти субъектов РФ;
- государственные учреждения, уполномоченные в соответствии с законодательством РФ;
- должностные лица органов государственного контроля (надзора);
- государственные инспекторы. Главный государственный инспектор – руководитель *Росстандарта*.

Государственный контроль (надзор) должностные лица осуществляют путём проведения плановых и внеплановых проверок. При составлении планов учитывают:

- целевые задания и приоритетные направления проверок;
- информацию потребителей, наличие рекламаций;
- сведения реестров о продукции, прошедшей сертификацию.

Объекты государственного контроля (надзора):

- продукция;
- процессы производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации.

Проведение проверок органы государственного контроля (надзора) осуществляют с применением правил и методов исследований (испытаний) и измерений, разработанных в соответствующих ТР.

Органы государственного контроля (надзора) имеют право:

- требовать от изготовителя (продавца) предъявления декларации о соответствии или сертификата соответствия требованиям ТР, если применение таких документов предусмотрено соответствующим ТР;

- осуществлять мероприятия государственного контроля (надзора) за соблюдением требований ТР в порядке, установленном законодательством;

- принимать мотивированное решение о запрете передачи продукции на реализацию, полном или частичном (в зависимости от характера обнаруженных нарушений) приостановлении процессов производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации, утилизации, если иными мерами невозможно устранить нарушения требований ТР;

- приостановить или прекратить действие декларации о соответствии или сертификата соответствия;

- привлекать изготовителя (исполнителя, продавца) к ответственности, предусмотренной законодательством РФ (если нарушения привели к причинению вреда здоровью человека, то к виновным может быть применено уголовное наказание, предусмотренное статьёй 238 УК РФ);

- принимать иные предусмотренные законодательством РФ меры в целях недопущения вреда.

Органы государственного контроля (надзора) обязаны:

- проводить в ходе мероприятий по государственному контролю (надзору) разъяснительную работу о техническом регулировании, информировать изготовителя (продавца) о существующих ТР;

- соблюдать коммерческую или иную охраняемую законом тайну;

- соблюдать порядок осуществления мероприятий по государственному контролю (надзору) и оформления результатов проверок;

- принимать на основании результатов проверок меры по устранению последствий нарушений требований ТР;

- направлять информацию о несоответствии продукции требованиям ТР изготовителю (продавцу), покупателю (потребителю).

Таким образом, в зависимости от характера нарушений изготовителем (продавцом) требований ТР орган государственного контроля (надзора) принимает решение:

- выдать предписания об устранении нарушения;

- запретить полностью или частично передачу продукции в обращение;

- приостановить или прекратить действие декларации о соответствии или сертификата соответствия.

За нарушение требований ТР, неисполнение предписаний органа государственного контроля (надзора) изготовитель (исполнитель, продавец) несёт ответственность в соответствии с законодательством РФ.

Если в результате несоответствия продукции требованиям ТР причинён вред жизни или здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни или здоровью животных и растений или возникла угроза причинения такого вреда, то виновный обязан возместить причинённый вред и принять меры в целях недопущения такого вреда. Обязанность возместить причинённый вред не может быть ограничена договором или заявлением одной из сторон.

Изготовитель (исполнитель, продавец), которому стало известно о несоответствии выпущенной в обращение продукции требованиям ТР, обязан сообщить об

этом в орган государственного контроля (надзора) в течение десяти дней с момента получения такой информации.

Лица, которые не имеют отношения к изготовлению и реализации продукции (приобретатель, потребитель), вправе направлять информацию о несоответствии продукции требованиям ТР в орган государственного контроля (надзора) лично или письменно (индивидуально или коллективно).

Изготовитель (продавец) в течение десяти дней с момента получения информации о несоответствии продукции требованиям ТР обязан провести проверку достоверности полученной информации. При подтверждении достоверности полученной информации изготовитель (продавец) обязан:

- разработать программу мероприятий по предотвращению причинения вреда. Программа должна включать в себя мероприятия по информированию приобретателя о наличии угрозы причинения вреда;

- устранить недостатки, при необходимости объявить отзыв продукции. Устранение недостатков, отзыв продукции, доставка продукции к месту устранения недостатков и обратно осуществляет изготовитель (продавец);

- незамедлительно приостановить производство и реализацию продукции, отозвать продукцию и возместить приобретателю (потребителю) убытки в случае невозможности устранить причины причинения вреда.

В случае невыполнения изготовителем (продавцом) программы мероприятий по предотвращению причинения вреда орган государственного контроля (надзора), а также иные лица вправе обратиться в суд с иском о *принудительном отзыве продукции с рынка*. При удовлетворении иска суд обязывает ответчика совершить определённые действия по отзыву продукции с рынка и довести решение суда не позднее одного месяца со дня его вступления в силу до сведения приобретателя через средства массовой информации или иным способом.

В случае если ответчик (изготовитель, продавец) не исполнит решение суда в установленный срок, истец (приобретатель, потребитель) вправе совершить эти действия за счёт ответчика с взысканием с него расходов.

Орган по сертификации, аккредитованная испытательная лаборатория (центр), должностные лица, эксперты несут ответственность за выпуск в обращение продукции, не соответствующей требованиям ТР, в соответствии с законодательством РФ и договором о проведении сертификации.

7 Национальная система стандартизации

Основу национальной системы стандартизации РФ составляют:

- национальные стандарты;
- общероссийские классификаторы технико-экономической и социальной информации, правила их разработки и применения.

Национальные стандарты:

- разрабатываются в порядке, установленном законодательством РФ;
- утверждаются национальным органом по стандартизации в соответствии с правилами, нормами, рекомендациями в области стандартизации;
- применяются на добровольной основе.

Национальные стандарты применяются равным образом и в равной мере независимо от:

- страны и места происхождения продукции, осуществления процессов производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнения работ и оказания услуг;

- видов или особенностей сделок и лиц, являющихся изготовителями, исполнителями, продавцами, приобретателями.

Применение национального стандарта подтверждается знаком соответствия национальному стандарту.

Общероссийские классификаторы:

- разрабатываются, принимаются, вводятся в действие, ведутся и применяются в порядке, установленном Правительством РФ;

- содержат технико-экономическую и социальную информацию, в том числе в области прогнозирования, статистического учёта, банковской деятельности, налогообложения;

- включают информацию в области межведомственного информационного обмена, создания информационных систем и ресурсов.

Национальный орган по стандартизации разрабатывает и утверждает программу разработки национальных стандартов, обеспечивает доступность программы заинтересованным лицам.

Порядок разработки и утверждения национальных стандартов установлен законодательством РФ.

Разработчиком национального стандарта может быть любое лицо.

Уведомление о разработке национального стандарта направляется в национальный орган по стандартизации и публикуется в печатном издании федерального органа исполнительной власти по техническому регулированию и в информационной системе общего пользования в электронно-цифровой форме. Уведомление должно содержать информацию о имеющихся в проекте национального стандарта положениях, отличающихся от положений соответствующих международных стандартов.

Разработчик дорабатывает проект национального стандарта с учётом полученных в письменной форме замечаний, проводит публичное обсуждение проекта, составляет перечень замечаний и результатов их обсуждения, публикует уведомление о завершении обсуждения. Срок публичного обсуждения проекта национального стандарта не может быть менее двух месяцев.

Проект национального стандарта одновременно с перечнем замечаний представляется разработчиком в технический комитет по стандартизации, который организует проведение экспертизы проекта, готовит мотивированное предложение об утверждении или отклонении проекта, предаёт перечень замечаний и результаты экспертизы в национальный орган по стандартизации.

Национальный орган по стандартизации на основании документов, представленных техническим комитетом, принимает решение об утверждении или отклонении национального стандарта. Уведомление об утверждении национального стандарта подлежит опубликованию в печатном издании национального органа по стан-

дартизации и информационной системе общего пользования в электронно-цифровой форме в течение одного месяца.

Работы по национальной стандартизации под руководством *Росстандарта* ведут:

- научно-исследовательские институты (НИИ);
- конструкторские бюро, опытно-экспериментальные базы НИИ;
- федеральные, региональные, областные центры по стандартизации и метрологии (ЦМС), по сертификации (РОСТЕСТ, г. Москва, УРАЛТЕСТ, г. Екатеринбург);
- конструкторско-технологические, научно-исследовательские подразделения (отделы, бюро, лаборатории, группы) по стандартизации на предприятиях.

НИИ национального органа РФ по стандартизации:

ВНИИКИ – Всероссийский НИИ классификации, терминологии и информации по стандартизации и качеству, г. Москва;

ВНИИ Стандарт – Всероссийский НИИ стандартизации, г. Москва;

ВНИИС – Всероссийский НИИ сертификации, г. Москва;

ВНИИНМАШ – Всероссийский НИИ стандартизации и сертификации в машиностроении, г. Москва;

ВНИИМС – Всероссийский НИИ метрологической службы, г. Москва;

ВНИЦСМВ – Всероссийский научно-исследовательский центр стандартизации, информации, сертификации сырья, материалов, веществ, г. Москва;

ВНИИМ им. Д.И.Менделеева – Всероссийский НИИ метрологии, г. Санкт-Петербург;

УНИИМ – Уральский НИИ метрологии, г. Екатеринбург.

В структуру национального органа РФ по стандартизации входят опытные заводы, издательство, типографии, магазины, учебные заведения. На базе территориальных представительств Национального органа РФ по стандартизации работают органы по оценке соответствия продукции и услуг, испытательные лаборатории, поверочные и калибровочные центры.

Подразделения по стандартизации на предприятиях осуществляют следующие функции:

- составляют годовые и перспективные планы работ по государственной и отраслевой стандартизации, передают их в головную организацию по стандартизации;
- проводят работы по стандартизации, унификации продукции и технологической оснастки;
- определяют технико-экономическую эффективность внедрения стандартов в проектирование и производство;
- осуществляют систематический контроль внедрения и соблюдения стандартов, технических условий при проектировании и производстве продукции;
- пересматривают устаревшие, разрабатывают новые стандарты предприятий и технические условия.

Другие субъекты хозяйственной деятельности (научно-технические общества, инженерные общества) создают в своей структуре специальные подразделения, занимающиеся разработкой нормативно-технической документации по стандартизации и управлению качеством.

Совершенствование стандартизации на предприятиях позволяет:

- улучшить организацию и культуру производства;
- увеличить производительность оборудования и производительность труда персонала;

- улучшить качество конструкторской документации;
- повысить качество, снизить себестоимость продукции;
- сократить номенклатуру материалов, полуфабрикатов, комплектующих.

В зависимости от того, участники какого субъекта деятельности разрабатывают и принимают стандарт, различают *категории* стандартов:

- *стандарты международные* (ИСО);
- *стандарты государственные* (ГОСТ Р);
- *технические условия* (ТУ);
- *стандарты общественных объединений, научно-технических и инженерных обществ* (СТО).

Международный стандарт – стандарт, который разрабатывает и выпускает международная организация по стандартизации с целью содействия взаимному сотрудничеству в интеллектуальной, научно-технической, экономической деятельности, в области охраны окружающей среды и в торговле. Например, основополагающий стандарт ИСО 14001 «Системы управления в области охраны окружающей среды. Руководство по применению». Стандарты ИСО имеют рекомендательный характер. Национальный орган РФ по стандартизации допускает применение стандартов ИСО:

- в качестве ГОСТ Р без изменений в тексте;
- с дополнениями, учитывающими российские требования, например, государственный стандарт ГОСТ Р/ИСО 14001 «Системы управления качеством окружающей среды. Общие требования и рекомендации по использованию».

Национальный стандарт – стандарт разрабатываемый для всех предприятий, организаций, учреждений страны независимо от форм собственности и подчинения, граждан занимающихся индивидуальной трудовой деятельностью, министерств (ведомств), органов местного и государственного управления РФ. Разработку ГОСТ Р ведут ТК по стандартизации в составе *Росстандарта*. После утверждения *Росстандарта* присваивают индекс, в котором указан номер и год утверждения или пересмотра - четыре последние цифры (например, государственный стандарт ГОСТ Р 51685-2000 на геометрические размеры железнодорожных рельсов).

Объектами ГОСТ Р являются:

- организационно-методические и общетехнические объекты;
- совместимые программные и технические средства информационных технологий;
- справочные материалы, классификация и кодирование информации;
- составляющие элементы крупных народно-хозяйственных комплексов (транспорт, энергосистема, связь, оборона, охрана окружающей среды);
- содержание государственных научно-технических и социально-экономических целевых программ и проектов;
- продукция для удовлетворения внутренних потребностей населения и поставок на экспорт;

- достижения науки и техники, позволяющие предприятию, государству обеспечить конкурентоспособность продукции;
- система конструкторской и технологической документации, документация в области управления и организации производства.

Технические условия – нормативный документ, который содержит технические требования, определяющие показатели качества продукции в соответствии с условиями её эксплуатации, обслуживания, ремонта. ТУ разрабатывают и применяют субъекты хозяйственной деятельности независимо от форм собственности и подчинения, когда ГОСТ и ОСТ создавать нецелесообразно, или необходимо дополнить или ужесточить установленные ими требования (например, нормативный документ ТУ 14-2Р-351-2001 на технические требования в отношении стальных колец для автомобильных, башенных кранов и других машин). Объектом ТУ может быть продукция разовой поставки, выпускаемая малыми партиями, а также произведения художественных промыслов. В случае, когда на ТУ нет ссылок в контрактах или договорах, ТУ считается не нормативным, а техническим документом.

Стандарты общественных объединений, научно-технических и инженерных обществ – нормативные документы, которые содержат требования к принципиально новым видам продукции, методам измерений, нетрадиционным технологиям и принципам управления производством. СТО разрабатывают и утверждают общественные объединения с целью распространения перспективных результатов научно-технических исследований (например, стандарт СТО АСЧМ 20-93 Ассоциации «Черметстандарт» на сортамент профилей двутавровых широкополочных балок с параллельными гранями полок).

В зависимости от характера объектов стандартизации различают *виды стандартов*:

- *стандарты основополагающие*;
- *стандарты на продукцию, услуги*;
- *стандарты на процессы*;
- *стандарты на методы контроля (испытаний, измерений, анализа)*.

Основополагающие стандарты – стандарты, которые устанавливают организационные принципы, положения, требования, правила и нормы, имеющие общий характер, с целью содействия взаимопониманию, взаимодействию и техническому единству в различных областях науки, техники и производства. Основополагающие стандарты объединяют взаимосвязанные стандарты, имеющие общую целевую направленность, имеют комплексный характер (ЕСКД, ЕСТД).

Стандарты на продукцию, услуги – стандарты, которые устанавливают требования к группам однородной продукции, услуг или конкретной продукции, услугам (стандарты общих технических требований, параметров и размеров, типов конструкции, сортамента, правил приёмки).

Стандарты на работы (процессы) – стандарты, которые устанавливают требования к конкретным видам работ (процессов), осуществляемым на разных стадиях жизненного цикла продукции: разработка, проектирование, производство, эксплуатация, потребление, хранение, транспортирование, обслуживание, ремонт, утилизация.

Особое место занимают экологические требования, которые включают: условия применения потенциально опасных для окружающей среды материалов, параметры очистного оборудования, правила выбросов в атмосферу и сточные воды.

Стандарты на методы контроля (испытаний, измерений, анализа) - стандарты, которые устанавливают порядок отбора проб (образцов) для испытаний, методы контроля (испытаний, измерений, анализа) характеристик определённой группы продукции с целью обеспечить единство оценки показателей качества. Критерии объективности метода контроля – сходимость и воспроизводимость результатов. Стандартизации подлежат: средства контроля, порядок подготовки и проведения контроля, правила обработки результатов, допустимая погрешность метода. В стандартах предусмотрены различные виды испытаний: повседневные, типовые, периодические.

8 Международные, региональные организации по стандартизации

Главная международная организация по стандартизации ИСО создана в 1946г. СССР был одним из основателей организации, является постоянным членом руководящих органов. РФ входит в ИСО как правопреемник СССР.

Цель деятельности ИСО:

- содействие развитию стандартизации в мировом масштабе для облегчения международного товарообмена и взаимопомощи, расширение сотрудничества в области интеллектуальной, научной, технической и экономической деятельности.

Практическая деятельность ИСО направлена на:

- облегчение координации и унификации национальных стандартов;
- подготовку рекомендаций национальным организациям по стандартизации;
- разработку стандартов ИСО;
- организацию обмена информацией в области стандартизации;
- сотрудничество с другими международными организациями по стандартизации и смежным проблемам (сертификация, метрология).

Объекты стандартизации ИСО:

- основополагающие стандарты;
- машиностроение, химия;
- неметаллические материалы, руды, металлы;
- информационная техника;
- сельское хозяйство;
- строительство, специальная техника;
- охрана здоровья, медицина;
- окружающая среда;
- упаковка и транспортировка товаров.

Организационно в ИСО входят руководящие и рабочие органы.

Руководящие органы - Генеральная ассамблея, Совет, комитеты Совета, Технические бюро.

Рабочие органы - технические комитеты, подкомитеты, технические консультативные группы.

Совет руководит работой ИСО в перерывах между сессиями Генеральной ассамблеи. Решение принимается большинством голосов членов Совета. Совету ИСО подчиняются комитеты:

- *ПЛАКО* – техническое бюро по планированию и организации работы;
- *СТАКО* – комитет по изучению научных принципов стандартизации;
- *КАСКО* – комитет по оценке соответствия продукции, услуг;
- *ИНФКО* – комитет по научно-технической информации, в рамках которого функционирует информационная система *ИСОНЕТ* о документах в области стандартизации - стандартах, справочниках, учебной литературе;
- *ДЕВКО* – комитет по оказанию помощи развивающимся странам;
- *КОПОЛКО* – комитет по защите интересов потребителей;
- *РЕМКО* – комитет по стандартным образцам (эталонам).

По своему содержанию только 20% стандартов ИСО относятся к конкретной продукции. Остальные нормативные документы касаются требований безопасности, взаимозаменяемости, технической и информационной совместимости, методов испытаний, других общих и методических вопросов.

Международные стандарты ИСО, которых разработано более 10 тыс., не имеют статуса обязательных. Каждая страна – участница вправе решать вопрос о применении международных стандартов в зависимости от степени участия страны в международном разделении труда, состоянии экономики и внешней торговли. В РФ принято около половины стандартов ИСО.

Главная международная организация по стандартизации и сертификации в области электротехники Международная электротехническая комиссия МЭК создана в 1906 г. Россия участвует в работе МЭК с 1921 г. Организационная структура МЭК во многом аналогична структуре ИСО.

Основная цель деятельности МЭК:

– содействие международному сотрудничеству по стандартизации и смежным с ней проблемами (испытания, оценка соответствия) в области электротехники, радиотехники, производства электротехнических материалов путём разработки международных стандартов и других документов.

Объекты стандартизации МЭК:

- материалы для электротехнической промышленности;
- электротехническое, электроэнергетическое оборудование;
- изделия электронной промышленности, электроинструмент;
- оборудование для спутников связи;
- терминология.

МЭК разработано более 2 тыс. стандартов. В РФ принято более половины стандартов МЭК

Международные стандарты МЭК можно разделить на два вида:

- общетехнические, носящие общепромышленный характер, - нормативные документы на терминологию, стандартные напряжения и частоты, виды и методы испытаний, требования по безопасности;
- на конкретные виды продукции от бытовых электроприборов до спутников связи

Некоторые виды работ по международной стандартизации и сертификации ведут совместно ИСО и МЭК, а директивы имеют индекс ИСО/МЭК, например, Руководство 2 ИСО/МЭК «Общие термины и определения в области стандартизации и смежных видов деятельности».

Важнейшей целью при разработке стандартов ИСО/МЭК является разработка стандартов в области безопасности, разработка стандартов, содержащих наряду с техническими требованиями, требования по безопасности. Нормы безопасности зависят от уровня социально-экономического развития и образованности общества.

В сферу деятельности МЭК входит поиск методов защиты от различных видов опасностей:

- травмоопасность, опасность поражения электрическим током;
- техническая опасность, пожаро- и взрывоопасность;
- химическая и биологическая опасность;
- опасность излучений (звуковые, инфракрасные, радиочастотные, ультрафиолетовые, ионизирующие, радиационные).

Особый статус имеет Международный специальный комитет по радиопомехам (СИСПР), который занимается стандартизацией методов измерения радиопомех, излучаемых электронными и электротехническими приборами.

Организационно-методическую и практическую работу по стандартизации и оценке соответствия во взаимодействии с ИСО, МЭК в своих географических районах и областях деятельности ведут:

- Европейская экономическая комиссия ООН (ЕЭК ООН);
- Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (ФАО);
- Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ);
- «Кодекс Алиментариус» - комиссия по разработке стандартов на продовольствие;
- Европейский комитет по стандартизации (СЕН);
- Европейский комитет по стандартизации в электротехнике (СЕНЭЛЕК);
- Европейский институт по стандартизации в области электросвязи (ЕТСИ);
- Межскандинавская организация по стандартизации (ИНСТА);
- Международная ассоциация стран Юго-Восточной Азии (АСЕАН);
- Панамериканский комитет стандартов (КОПАНТ).

Стандартизация, сертификация и метрология в рамках СНГ осуществляется в соответствии с межправительственным соглашением «Соглашение о проведении согласованной политики в области стандартизации, метрологии и сертификации» от 1992 г. Перспективная приоритетная задача Межгосударственного Совета СНГ - развитие сотрудничества с ИСО, МЭК, СЕН.

Активное участие в работе международных и региональных организаций по стандартизации принимают национальные организации экономически развитых государств.

Национальная организация по стандартизации и смежным с ней проблемам в США – Национальный институт стандартов и технологии (NIST) – неправительственная некоммерческая организация, утверждающая национальные стандарты, координирующая работы по разработке и применению стандартов в государственном и частном секторах экономики.

Федеральные стандарты в США разрабатывают:

- Американское общество по испытаниям и материалам (ASTM);
- Американское общество по контролю качества (ASQC);
- Американское общество инженеров – механиков (ASME);
- Общество инженеров – автомобилестроителей (SAE);
- Институт инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) и другие организации и фирмы.

Основные задачи разработки и внедрения национальных стандартов в США – экономия энергоресурсов, защита окружающей среды, обеспечение безопасности людей и условий производства.

Национальная организация по стандартизации и смежным с ней проблемам в Британии – Британский институт стандартов (BSI) – независимая организация, координирующая деятельность по стандартизации, управлению качеством и сертификации, информационному обслуживанию и маркетингу, созданная для удовлетворения потребностей обществ инженеров-механиков, инженеров-судостроителей, инженеров-электриков и инженеров-металлургов. Приоритетные направления деятельности BSI – стандартизация в электротехнике, автоматизации, информационной технике, строительстве, химии, здравоохранении, машиностроении. Современное направление – обеспечение безопасности инвалидов, техническая помощь британским фирмам – экспортёрам.

Национальная организация по стандартизации во Франции – Французская ассоциация по стандартизации (ANFOR) – организация, координирующая деятельность по стандартизации, сертификации, метрологии, управлению качеством. Приоритетные направления деятельности в международной стандартизации – информационные технологии, в европейской стандартизации – транспорт и телекоммуникации, в национальной стандартизации – экология, безопасность, агропромышленное производство, а также сфера услуг.

Национальная организация по стандартизации в Германии – Немецкий институт стандартов (DIN). Деятельность DIN финансируется на основе договоров с заинтересованными сторонами – заказчиками нормативных документов и дотациями со стороны государства. Особое внимание уделяется стандартизации в области обеспечения безопасности товаров и услуг, защиты окружающей среды, созданию основополагающих стандартов. Кроме стандартизации DIN занимается проблемами оценки соответствия и информационного обеспечения стандартизации и сертификации.

Национальная организация по стандартизации в Японии – Японский комитет промышленных стандартов (JISC) – консультативный орган при Министерстве внешней торговли и промышленности. Деятельность JISC финансирует правительство Японии. На основании Закона о промышленной стандартизации в Японии производится сертификация промышленной продукции на соответствие национальному стандарту. Разрешение на выдачу сертификата и право маркировки знаком соответствия стандарту даёт министр отрасли по результатам инспекционного контроля качества данной продукции и аттестации предприятия.

Приоритетные направления стандартизации в Японии – учёт интересов зарубежных партнёров, придание открытого характера информации о стандартизации,

гармонизация японских национальных стандартов с международными стандартами, упрощение процедур сертификации, распространение стандартизации на продукцию предприятий частного сектора. Большое внимание уделяется стандартам, направленным на защиту окружающей среды, решение социальных проблем, создание условий для справедливой конкуренции, сохранение лидерства в области стандартизации в Азиатско-Тихоокеанском регионе.

9 Информационное обеспечение стандартизации

Национальному органу по стандартизации – *Росстандарту* - предоставлено исключительное право опубликования официальной информации:

- реестра продукции и услуг, сертифицированных и маркированных знаками соответствия и обращения на рынке;
- российских, международных, региональных, национальных нормативных документов.

Национальный орган РФ по стандартизации ведёт *Федеральный фонд стандартов* – совокупность нормативных документов по стандартизации, метрологии, оценке соответствия. В фонд входят:

- нормативные акты РФ по стандартизации, сертификации, метрологии;
- государственные реестры;
- государственные стандарты, их проекты;
- правила, рекомендации в области стандартизации;
- стандарты отраслей, предприятий, научно-технических и инженерных обществ, общественных организаций;
- общероссийские классификаторы технико-экономической и социальной информации;
- международные договоры, нормативные документы, принятые международными, региональными, национальными организациями зарубежных стран.

Головная организация по информационному обеспечению стандартизации - ВНИИКИ - Всероссийский НИИ классификации, терминологии и информации по стандартизации и качеству. ВНИИКИ совместно с другими НИИ и ЦМС ведёт автоматизированный банк отечественных, международных, региональных, зарубежных стандартов и нормативных документов по управлению качеством.

ВНИИКИ выполняет функцию национального центра международной информационной сети по стандартизации ИСОНЕТ, руководство деятельностью которой осуществляет Комитет по информационным системам и услугам ИНФКО, входящий в Совет ИСО.

Развитие информационных технологий повысило актуальность классификаций и кодирования информации. В РФ создана *Единая система классификации и кодирования технико-экономической и социальной информации* (ЕСКК), объектами которой выступают:

- статистическая информация;
- макроэкономическая, финансовая, правоохранительная деятельность;
- банковское дело, бухгалтерский учёт;
- стандартизация, оценка соответствия;

- производство продукции, предоставление услуг;
- торговля, таможенное дело;
- внешнеэкономическая деятельность.

Составляющие ЕСКК:

- общероссийские классификаторы технико-экономической и социальной информации, средства их ведения;
- нормативные, методические документы по их разработке, ведению и применению.

Национальный орган РФ по стандартизации принял более 20, в стадии внедрения находятся более 25 общероссийских классификаторов, гармонизированных с международными стандартами и классификациями.

Действующие общероссийские классификаторы:

- *ОКПО* – предприятий и организаций;
- *ОКОГУ* – органов государственной власти и управления;
- *ОКЭР* – экономических районов;
- *ОКДП* – видов экономической деятельности, продукции и услуг;
- *ОКСО* – специальностей по образованию;
- *ОКЗ* – занятий;
- *ОКУД* – управленческой документации;
- *ОКП* – продукции;
- *ОКС* – стандартов;
- *ОКПДТР* – профессий рабочих, должностей служащих, тарифных разрядов;
- *ОКОФ* – основных фондов;
- *ЕСКД* – изделий и конструкторских документов в машиностроении;
- *ОКЕИ* – единиц измерения;
- *ОКСВНК* – специальностей высшей научной квалификации.

Национальные стандарты, общероссийские классификаторы и информация об их разработке должна быть доступна заинтересованным лицам. Издательство национального органа РФ по стандартизации выпускает широкий спектр наименований печатной продукции – стандарты, нормативные документы, справочники, журналы с приложениями, учебная литература.

10 Работы по стандартизации

Работы, выполняемые при стандартизации, в условиях современного производства способствуют:

- совершенствованию организации и управления производством;
- повышению производительности оборудования и персонала;
- улучшению проектирования и изготовления продукции, особенно при крупносерийном, массовом производстве;
- ускорению разработки наукоёмких, малоотходных технологий;
- повышению стабильности качества товаров, работ и услуг;
- экономии ресурсов всех видов – материальных, энергетических, временных, людских;
- развитию безотходных технологий и защите окружающей среды.

Основные работы (методы стандартизации), выполняемые при стандартизации:

- систематизация объектов, явлений или понятий;
- кодирование и классификация технико-экономической информации;
- унификация и симплификация деталей, сборочных единиц, узлов, агрегатов, машин, приборов;
- типизация конструкций изделий и технологических процессов;
- агрегатирование машин и других изделий.

Систематизация объектов, явлений или понятий – расположение объектов в определённом порядке и последовательности, образующей чёткую систему, удобную для пользования. Простейшие формы систематизации – расположение объектов в алфавитном или хронологическом порядках.

Кодирование – присвоение по определённым правилам объекту кода, в виде сочетания цифр и букв. Коды обеспечивают идентификацию объектов с помощью минимального количества знаков. Автоматизированные системы управления отраслями промышленности с применением вычислительной техники позволяют обрабатывать большой объём информации, закодированной в десятичных цифровых кодах.

Классификация – разделение множества объектов на классификационные группировки по сходству или различию на основе определённых признаков в соответствии с принятыми правилами.

Наибольшее применение получил *иерархический* метод классификации, в котором исходное множество объектов последовательно разделяется на подмножества (классы, группы, виды) по принципу от общего к частному. Основная сложность при построении классификации – выбор системы признаков, определение порядка их следования. Иерархическая классификация логична, проста, но плохо поддаётся автоматизированной обработке.

Фасетный метод классификации подразделяет объекты на независимые подмножества, обладающие определёнными признаками, необходимыми для решения конкретных задач. Принцип построения фасетной классификации – от частного к общему. Такая классификация хорошо поддаётся автоматизированной обработке.

Порядок проведения работ по классификации и кодированию информации регламентирован Единой системой классификации и кодирования технико-экономической информации *ЕСКК ТЭИ*. На основе Единой системы разрабатывают классификаторы (общероссийский, отраслевой, предприятия). Классификатор по статусу приравнен стандарту соответствующего уровня.

Унификация – приведение объектов одинакового функционального назначения к единообразию по установленному признаку и рациональное сокращение числа этих объектов. Унификация (заводская, отраслевая, межотраслевая) устанавливает минимально необходимое но достаточное число типов, видов, типоразмеров, изделий, сборочных единиц и деталей, обладающих высоким качеством и полной взаимозаменяемостью.

Симплификация – форма стандартизации, при которой уменьшают количество типов изделий до величины, достаточной для удовлетворения существующих в данное время потребностей.

Типизация конструкций изделий – разработка и установление типовых конструкций, содержащих конструктивные параметры общие для изделий, сборочных единиц, деталей.

Типизация технологических процессов – разработка и установление технологического процесса, для производства однотипных деталей или сборки однотипных составных частей или изделий.

Агрегатирование – создание машин, оборудования, приборов и других изделий из унифицированных стандартных агрегатов (автономных сборочных единиц), устанавливаемых в изделия в различном числе и комбинациях. Из минимального числа типоразмеров автономных агрегатов стремятся создать максимальное число компоновок оборудования.

Принципы, определяющие современную научно-техническую организацию работ по стандартизации:

- *системности*;
- *обеспечения функциональной взаимозаменяемости стандартизируемых изделий*;
- *научно-исследовательский*;
- *предпочтительности*;
- *прогрессивности и оптимизации стандартов*;
- *взаимосвязки стандартов*;
- *минимального удельного расхода материалов*.

Принцип системности - применение совокупности взаимосвязанных элементов, функционирование которых приводит к выполнению поставленной цели с максимальной эффективностью и наименьшими затратами. Научно-технический прогресс вызвал необходимость системного подхода к процессу производства, включающего труд людей, средства (оборудование, оснастка, инструмент, средства контроля) и предметы труда (продукция на стадиях её создания и использования).

Принцип обеспечения функциональной взаимозаменяемости стандартизируемых изделий – обеспечение взаимозаменяемости по эксплуатационным показателям. Принцип является главным при комплексной и опережающей стандартизации изделий.

Научно-исследовательский принцип разработки стандартов – проведение специальных теоретических, экспериментальных и опытно-конструкторских работ для подготовки проектов стандартов.

Принцип предпочтительности – установление нескольких рядов значений стандартизируемых параметров, чтобы при их выборе первый ряд предпочесть второму, второй – третьему. Широкое применение получили ряды предпочтительных чисел, построенные по принципу геометрической прогрессии. Принцип является теоретической базой современной стандартизации, позволяет повысить уровень взаимозаменяемости, уменьшить номенклатуру типоразмеров заготовок, деталей, изделий, создаёт условия эффективной специализации и кооперирования в промышленности.

Принцип прогрессивности и оптимизации стандартов – соответствие показателей, норм, характеристик и требований в стандартах мировому уровню науки, техники, производства, учёт прогрессивных тенденций развития стандартизируе-

мых объектов. Принципа позволяет получать в производстве максимальный экономический эффект при минимальных затратах.

Принцип взаимоувязки стандартов – учёт всех основных элементов (факторов), влияющих на конечный объект стандартизации. При стандартизации рассматривают систему характеристик и требований к комплексу взаимосвязанных материальных и нематериальных элементов. Второстепенные элементы, незначительно влияющие на объект, не учитывают.

Принцип минимального удельного расхода материалов – минимизация удельного расхода материалов, полуфабрикатов, стоимость которых в машиностроении составляет 40...80% от конечной себестоимости продукции. Стандартизация заготовок, изделий позволяет получить экономию материалов за счёт рациональных схем и компоновок машин, совершенства методов расчёта деталей на прочность, применения экономичных профилей, сварных конструкций, литых заготовок, пластмасс, композиционных материалов.

Методы стандартизации:

- *прогрессивная стандартизация;*
- *комплексная стандартизация;*
- *опережающая стандартизация.*

Прогрессивная стандартизация (ПС) – стандартизация, которая основана на использовании технических прогнозов, патентов, изобретений, передовых научно-технических и опытно-конструкторских разработок.

Комплексная стандартизация (КС) – стандартизация, при которой осуществляют целенаправленное и планомерное установление и применение системы взаимоувязанных требований как к объекту в целом и его элементам, так и к материальным и нематериальным факторам, влияющим на объект, с целью обеспечения оптимального решения конкретной проблемы. Сущность КС - систематизация, оптимизация и увязка всех взаимодействующих факторов (в процессе проектирования, производства, эксплуатации), обеспечивающих экономически оптимальный уровень качества продукции в требуемые сроки.

Опережающая стандартизация (ОС) – установление повышенных по отношению к достигнутому на практике уровню норм, требований к объектам стандартизации, которые, согласно техническим прогнозам, будут оптимальными в последующее планируемое время. ОС относят к изделию, показателям его качества, средствам производства, методам испытания, контроля. ОС – основа проектирования новой, более совершенной техники.

В качестве примера комплексной стандартизации можно привести *Межотраслевую систему общетехнических стандартов*, направленную на решение крупных народно-хозяйственных задач, обеспечение эффективности производства высококачественной продукции.

В числе прочих в межотраслевую систему входят:

- *ЕСКД* – единая система конструкторской документации;
- *ЕСТД* – единая система технологической документации;
- *СПКП* – система показателей качества продукции;
- *УСД* – унифицированные системы документации;
- *СИБИД* - система информационно-библиографической документации;

- *ГСИ* – государственная система обеспечения единства измерений;
- *ЕСЗКС* – единая система защиты от коррозии и старения материалов и изделий;
- *стандарты на товары, поставляемые на экспорт*;
- *ССБТ* – система стандартов безопасности труда;
- *ЕСТПП* – единая система технологической подготовки производства;
- *разработка и постановка продукции на производство*;
- *система стандартов в области охраны природы и улучшения использования природных ресурсов*;
- *ЕСПД* – единая система программной документации;
- *ЕСГУКП* – единая система государственного управления качеством продукции;
- *СПДС* – система проектной документации для строительства;
- *ЕССП* – единая система стандартов приборостроения.

ЕСКД – система, устанавливающая для всех организаций и предприятий единый порядок организации проектирования, единые правила выполнения и оформления чертежей и ведения чертёжного хозяйства. Этим стандартам присвоен класс 2, например ГОСТ 2.001-93.

Основные задачи ЕСКД:

- повышение производительности труда конструкторов;
- улучшение качества чертёжной документации;
- облегчение взаимобмена конструкторской документацией между организациями;
- углубление унификации при разработке проектов изделий;
- упрощение форм конструкторских документов, графических изображений, внесения в них изменений;
- механизация и автоматизация обработки технических документов;
- эффективное хранение, учёт документов, сокращение их объёмов;
- ускорение оборота документов.

Главные перспективные направления развития ЕСКД:

- полное документальное обеспечение систем автоматизации проектно- конструкторских работ;
- документальное обеспечение автоматизированных систем управления на государственном, отраслевом уровнях и на предприятиях;
- создание общегосударственной сети вычислительных центров на базе ЭВМ четвёртого (сверхминиатюрные ЭВМ на больших интегральных схемах) и пятого (на основе световых и оптических явлений) поколений.

Система ЕСКД широко использована в современных условиях при:

- разработке автоматических систем управления производством;
- создании и применении машинных носителей информации в качестве юридически предусмотренных форм представления документации;
- применении действующих классификаторов и систем документации;
- внедрении стандартных программ сбора, хранения, передачи и обработки информации в общегосударственной автоматизированной системе.

ЕСТД – система, устанавливающая для всех организаций и предприятий единые взаимосвязанные правила, нормы и положения выполнения, оформления, комплектации и обращения, унификации и стандартизации технологической документации. Этим стандартам присвоен класс 3, например ГОСТ 3.1103-84.

ЕСТД решает информационные и организационные задачи:

- широкого внедрения типовых технологических процессов, основанных на технологическом классификаторе деталей машиностроения и приборов;
- сокращения объёма, упорядочения номенклатуры, установления правил составления технологической документации;
- разработки систем нормативов основного производства и учёта;
- повышения в конечном итоге производительности труда технологов.

ЕССП – система, призванная унифицировать и согласовывать по принципу агрегатирования параметры и характеристики приборов и устройств, входящих в систему автоматического контроля, регулирования и управления сложными технологическими процессами. Одновременно система обеспечивает функциональную, информационную, конструктивную, эксплуатационную совместимости указанных приборов и технических средств.

Совместимость технических средств – обеспечение согласованной совместной работы этих средств в предусмотренном сочетании, в рекомендуемом диапазоне нормируемых параметров (энергоносители, присоединительные и габаритно-установочные размеры, эргономические требования).

Повышение требований потребителя к техническому уровню и качеству продукции, необходимость дальнейшего совершенствования качества определяют уровень и сложность работ по стандартизации, поиск совершенствование новых эффективных форм разработки стандартов на продукцию и услуги с учётом международного разделения труда, кооперирования и особенностей товарообмена в стране и за рубежом.

Система управления качеством – совокупность организационной структуры и процедур, процессов, ресурсов, ответственности работников, направленная на повышение качества продукции (работ, услуг). На основании мирового опыта по управлению качеством в РФ приняты стандарты ГОСТ Р ИСО серии 9000. В основе этих, а также вновь разрабатываемых международных стандартов, положены принципы управления качеством:

- ориентация на запросы и требования потребителя;
- повышение роли руководителя в организации управления качеством;
- вовлечение инициативы и ответственности персонала;
- разработка процесса достижения желаемого результата;
- применение системного анализа для повышения эффективности функционирования системы взаимосвязанных процессов;
- формирование потребности у персонала постоянного улучшения продукции, процессов и системы в целом;
- принятие решений на основе сбора и анализа данных и информации;
- постановка взаимовыгодных отношений с поставщиками.

Наличие сертификата системы качества является необходимым, хотя и не достаточным, условием выхода продукции на международный рынок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Промышленность Российской Федерации конца восьмидесятых годов прошлого столетия обслуживали 80...100 тыс. стандартов, в то время как необходимое и достаточное количество стандартов составляло 1...2 тыс. Избыточная стандартизация усложняла разработку новых видов продукции и современных ресурсосберегающих, малоотходных, экологически чистых технологий. Существующая в стране система стандартизации в условиях становления рыночных отношений превратилась в препятствие развития производства новых видов товаров. Закон Российской Федерации «О стандартизации» совместно с законом «О защите прав потребителей» более 10 лет являлся законодательной основой стандартизации. В начале двадцать первого века в стране назрела необходимость совершенствования основ государственной стандартизации.

Федеральный закон «О техническом регулировании» признал утратившим силу закон о «Стандартизации» и предоставил новые возможности по дальнейшему совершенствованию стандартизации и оценки соответствия товаров и услуг обязательным требованиям стандартов. Закон «О техническом регулировании» определил приоритетные цели стандартизации – повышение уровня безопасности граждан и имущества, экологической безопасности, безопасности животных, растений, а также обеспечение научно-технического прогресса и повышение конкурентоспособности продукции, работ, услуг.

Дальнейшее развитие стандартизации, широкое применение прогрессивной, комплексной и опережающей стандартизации являются необходимыми и определяющими условиями роста национального валового продукта, роста благосостояния граждан, успешной интеграции экономики России в мировую экономическую систему, расширения международного экономического и научно-технического сотрудничества, роста объёма и совершенствования структуры международного товарообмена в интересах населения и государства.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Правовые основы стандартизации
2. Цели стандартизации.
3. Задачи стандартизации.
4. Принципы стандартизации.
5. Документы в области стандартизации.
6. Национальный орган РФ по стандартизации. Функции, права.
7. Государственный контроль (надзор) за соблюдением требований технических регламентов.
8. Национальная система стандартизации.
9. Порядок разработки и утверждения национальных стандартов.
10. Категории стандартов.
11. Объекты стандартизации.
12. Виды стандартов.
13. Международные, региональные организации по стандартизации.
14. Информационное обеспечение стандартизации.
15. Общероссийские классификаторы технико-экономической информации.
16. Работы, выполняемые при стандартизации.
17. Принципы организации работ по стандартизации.
18. Методы стандартизации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.

1. Сергеев А.Г., Латышев М.В., Терегеря В.В. Метрология, стандартизация, сертификация: Учебное пособие. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Логос, 2010. – 560 с.: ил.
2. Лифиц И.М. Стандартизация, метрология и сертификация: Учебник. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт-Издат, 2009. – 335 с.
3. Димов Ю.В. Метрология, стандартизация и сертификация. Учебник для вузов. 3-е изд. – СПб.: Питер, 2010. – 464 с.: ил.
4. Яблонский О.П., Иванова В.А. Основы стандартизации, метрологии, сертификации: Учебник. – Ростов на/Д: Феникс, 2010. – 448 с.
5. Радкевич Я.М., Лактионов Б.И., Схиртладзе А.Г. Метрология, стандартизация и сертификация: Учеб. для вузов - 2-е изд., доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 791 с.
6. Крылова Г.Д. Основы стандартизации, сертификации, метрологии: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. – 711 с.
7. Федеральный закон от 27 декабря 2002 г. N 184-ФЗ «О техническом регулировании».
8. Закон Российской Федерации от 7 февраля 1992 г. N 2300-I «О защите прав потребителей».

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица 1 - Перечень систем межгосударственных и государственных стандартов

Наименование систем	Аббревиатура в обозначении стандарта	Шифр в обозначении	Категория стандартов
1	2	3	4
Государственная система стандартизации РФ	ГСС	1.	ГОСТ Р
Единая система конструкторской документации	ЕСКД	2.	ГОСТ
Единая система технологической документации	ЕСТД	3.	ГОСТ
Система показателей качества продукции	СПКП	4.	ГОСТ
Унифицированная система документации	УСД	6.	ГОСТ ГОСТ Р
Система информационно-библиографической документации	СИБИД	7.	ГОСТ
Государственная система обеспечения единства измерений	ГСИ	8.	ГОСТ ГОСТ Р
Единая система защиты от коррозии и старения	ЕСЗКС	9.	ГОСТ
Система стандартов безопасности труда	ССБТ	12.	ГОСТ ГОСТ Р
Репрография	-	13.	ГОСТ ГОСТ Р
Единая система технологической подготовки производства	ЕСТПП	14.	ГОСТ
Система разработки и постановки продукции на производство	СРПП	15.	ГОСТ ГОСТ Р
Система стандартов в области охраны природы и улучшения использования природных ресурсов	-	17.	ГОСТ ГОСТ Р
Единая система программных документов	ЕСПД	19.	ГОСТ
Система проектной документации по строительству	СПДС	21.	ГОСТ Р
Безопасность в чрезвычайных ситуациях	-	22.	ГОСТ Р
Расчеты и испытания на прочность	-	25.	ГОСТ
Надежность в технике	-	27.	ГОСТ
Система стандартов эргономических требований и эргономического обеспечения	-	29.	ГОСТ
Информационная технология	-	34.	ГОСТ Р
Система сертификации ГОСТ Р	-	40.	ГОСТ Р
Система аккредитации в РФ	-	51.	ГОСТ Р

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица Б.1 - Нормативные документы по стандартизации

Наименование документа	Определение	Обозначение	Сфера действия
1	2	3	4
Национальный стандарт РФ	Стандарт, принятый ФА Ростехрегулирования	ГОСТ Р	Российская Федерация
Региональный стандарт	Стандарт, принятый региональной организацией по стандартизации	ГОСТ, СТ СЭВ	Страны — члены региона
Межгосударственный стандарт (является стандартом регионального типа)	Стандарт, принятый Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации или Межгосударственной научно-технической комиссией по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве	ГОСТ	Страны — члены Межгосударственного совета (МГС) и (или) Межгосударственной научно-технической комиссии (МНТКС)
Международный стандарт	Стандарт, принятый международной организацией по стандартизации	ИСО, МЭК, ИСО/МЭК	Страны — члены и члены-корреспонденты ИСО и МЭК
Общероссийский классификатор технико-экономической информации	Документ, принятый Госстандартом России или Госстроем России	ОК	Российская Федерация
Стандарт отрасли	Стандарт, принятый государственным органом управления в пределах его компетенции применительно к продукции, работам и услугам отраслевого значения	ОСТ	В одной или нескольких отраслях
Стандарт предприятия	Стандарт, принятый предприятием применительно к внутренним продукциям, работам и услугам.	СТП	На данном предприятии
Стандарт научно-технического, инженерного общества	Стандарт, принятый научно-техническим, инженерным обществом или другим общественным объединением	СТО	На принципиально новые виды продукции, процессы, услуги, методы испытаний
Правила	Документ в области стандартизации, метрологии, сертификации, аккредитации, устанавливающий обязательные для применения организационно-технические и (или) общетехнические положения, порядки (правила процедуры), методы (способы, приемы) выполнения работ соответствующих направлений, а также обязательные требования к оформлению результатов этих работ	ПР	Российская Федерация

Продолжение таблицы Б.2 Нормативные документы по стандартизации

1	2	3	4
Технические условия	Документ, разработанный на конкретную продукцию (изделие, материал, вещество)	ТУ	На конкретное изделие, материал, вещество
Рекомендации	Документ в области стандартизации, метрологии, сертификации, аккредитации, содержащий добровольные для применения организационно-технические и (или) общетехнические положения, порядки (правила процедуры), методы (способы, приемы) выполнения работ соответствующих направлений, а также рекомендуемые правила оформления результатов этих работ	Р	Российская Федерация
Правила по межгосударственной стандартизации	См. «Правила»	ПМГ	Страны — члены МГС и (или) МНКТС
Рекомендации по межгосударственной стандартизации	См. «Рекомендации»	РМГ	Страны — члены МГС и (или) МНКТС
Регламент	Документ, содержащий обязательные правовые нормы и принятый органами власти		Сфера действия регламента

Все действующие в Российской Федерации государственные, межгосударственные, региональные, национальные стандарты других стран вносятся в ежегодно переиздаваемый указатель «Национальные стандарты».

Национальные стандарты (ГОСТ Р) разрабатываются на продукцию, работы и услуги, имеющие межотраслевое значение, и не должны противоречить законодательству Российской Федерации.

Национальные стандарты должны содержать:

- требования к продукции, работам и услугам по их безопасности для окружающей среды, жизни, здоровья и имущества, требования техники безопасности и производственной санитарии;
- требования по технической и информационной совместимости, а также взаимозаменяемости продукции;
- основные потребительские (эксплуатационные) характеристики продукции, методы их контроля, требования к упаковке, маркировке, транспортированию, хранению, применению и утилизации продукции;
- правила и нормы, обеспечивающие техническое и информационное единство при разработке, производстве, использовании (эксплуатации) продукции, выполнении работ и оказании услуг, в том числе правила оформления технической документации, допуски и посадки, общие правила обеспечения качества продукции, работ и услуг, сохранения и рационального использования всех видов ресурсов, термины и их определения, условные обозначения, метрологические и другие общетехнические и организационно-технические правила и нормы. В государственных стандартах содержатся как обязательные для выполнения требования к объекту стандартизации, так и рекомендательные.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Таблица В.1 ОБЩЕРОССИЙСКИЕ КЛАССИФИКАТОРЫ

Код	Наименование ОК	Аббревиатура ОК	Год принятия ОК	Дата введения ОК
001	Общероссийский классификатор стандартов	ОКС	1993	01.01.95
002	Общероссийский классификатор услуг населению	ОКУН	1993	01.01.94
003	Общероссийский классификатор органов государственной власти и управления	ОКОГУ	1993	01.01.96
004	Общероссийский классификатор видов экономической деятельности, продукции и услуг	ОКДП	1993	01.01.94
005	Общероссийский классификатор продукции	ОКП	1993	01.07.94
006	Общероссийский классификатор информации по социальной защите населения	ОКИСЗН	1993	01.01.94
007	Общероссийский классификатор предприятий и организаций	ОКПО	1993	01.07.94
009	Общероссийский классификатор специальностей по образованию	ОКСО	1993	01.07.94
010	Общероссийский классификатор занятий	ОКЗ	1993	01.01.95
011	Общероссийский классификатор управленческой документации	ОКУД	1993	01.07.94
012	Общероссийский классификатор изделий и конструкторских документов	Классификатор ЕСКД	1993	01.07.94
013	Общероссийский классификатор основных фондов	ОКОФ	1994	01.01.96
014	Общероссийский классификатор валют	ОКВ	1994	01.07.95
015	Общероссийский классификатор единиц измерения	ОКЕИ	1994	01.01.96

016	Общероссийский классификатор профессий рабочих, должностей служащих и тарифных разрядов	ОКПДТР	1994	01.01.96
017	Общероссийский классификатор специальностей высшей научной квалификации	ОКСВНК	1994	01.07.95
018	Общероссийский классификатор информации о населении	ОКИН	1995	01.07.96
019	Общероссийский классификатор объектов административно-территориального деления	ОКАТО	1995	01.01.97
020	Общероссийский классификатор деталей, изготавливаемых сваркой, пайкой, склеиванием и термической резкой	ОКД	1995	01.07.96
021	Технологический классификатор деталей машиностроения и приборостроения	ТКД	1995	01.01.96
022	Общероссийский технологический классификатор сборочных единиц машиностроения и приборостроения	ОТКСЕ	1995	01.01.97
023	Общероссийский классификатор начального профессионального образования	ОКНПО	1995	01.07.96
024	Общероссийский классификатор экономических регионов	ОКЭР	1995	01.01.97
025	Общероссийский классификатор стран мира	ОКСМ	1995	01.07.96
026	Общероссийский классификатор информации об общероссийских классификаторах	ОКОК	1995	01.07.96
027	Общероссийский классификатор форм собственности	ОКФС	1999	01.01.2000
028	Общероссийский классификатор организационно-правовых форм	ОКОПФ	1999	01.01.2000
029	Общероссийский классификатор видов экономической деятельности	ОКВЭД	2001	01.01.2003

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебно-методическому
комплексу
С.А. Упоров



МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ (КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ)

ЧАСТЬ 3

«ПОДТВЕРЖДЕНИЕ СООТВЕТСТВИЯ»

Специальность

21.05.03 Технология геологической разведки

Автор: Глушкова Т.А., к.т.н.

Одобен на заседании кафедры

Геофизики

(название кафедры)

Зав.кафедрой

Талалай А. Г.

(Фамилия И.О.)

Протокол № 1 от 05.10. 2020

(Дата)

Рассмотрен методической комиссией
факультета

(название факультета)

Председатель

Бондарев В. И.

(Фамилия И.О.)

Протокол № 2 от 13.10. 2020

(Дата)

Екатеринбург
2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	2
1. Основные понятия.....	3
2. Цели, принципы и формы подтверждения соответствия.....	3
3. Добровольное подтверждение соответствия.....	4
4. Обязательное подтверждение соответствия.....	5
5. Участники системы сертификации.....	9
6. Схемы сертификации продукции и услуг.....	10
7. Порядок обязательного подтверждения соответствия.....	13
8. Организация деятельности органов по сертификации.....	14
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	16
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	17
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	17
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	17
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	18

Деятельность по установлению требований к качеству продукции, услуг, процессам их производства и реализации основана на системах стандартизации, оценки соответствия.

В условиях государственного управления экономикой в процессе управления качеством участвовали с одной стороны - государство в лице предприятий, выпускающих продукцию и оказывающих услуги, совместно с контролирующими и регулирующими органами, а с другой – потребители.

В составе органов, контролирующей деятельность предприятий по качеству продукции, входили отделы технического контроля предприятий, ведомственные комиссии, органы вневедомственного контроля. Главная задача контролирующих органов – предотвращение выпуска предприятиями продукции или услуг, не соответствующих требованиям стандартов и технических условий, утверждённым образцам, положениям проектно - конструкторской и технологической документации, условиям поставки и договоров.

В девяностых годах прошлого века в ходе становления в России экономики рыночного типа получили развитие существенные процессы:

- появление производителей продукции и услуг негосударственных форм собственности;
- увеличение номенклатуры и объёма товаров и услуг;
- расширение внутреннего и международного товарообмена;
- усиление внутренней и международной конкуренции производителей товаров и услуг;
- возникновение реальных перспектив вступления России в международные экономические и торговые организации – Европейский Союз, ВТО.

Названные процессы в сочетании с мировым техническим прогрессом привели к необходимости изменения системы оценки и управления качеством продукции и услуг. В этих условиях эффективным способом гарантии качества, широко применяемым в мировой практике, явилось подтверждение соответствия требованиям стандартов третьей стороной, независимой от изготовителя (продавца) и потребителя (покупателя), - сертификация.

Становление рыночной экономики было поддержано законодательно основополагающими Федеральными законами Российской Федерации:

- «О защите прав потребителей» от 07.02.92;
- «О стандартизации» от 10.06.93;
- «О сертификации продукции и услуг» от 10.06.93.

Дальнейшее развитие экономики России потребовало совершенствования процессов стандартизации и оценки соответствия. Достижению этой цели призван способствовать федеральный закон «О техническом регулировании» от 27.12.02.

Подтверждение соответствия – документальное удостоверение соответствия продукции, процесса, работы, услуги предъявляемым к ним требованиям. Одной из форм оценки соответствия является общепризнанный в мировой практике способ - *сертификация соответствия*.

Сертификация (лат.) – «сделано верно». Чтобы убедиться в том, что продукция «сделана верно», в процессе сертификации необходимо ответить на вопросы:

- каким требованиям продукция, процесс, работа, услуга должны соответствовать?
- как путём можно получить доказательства этого соответствия?

1 Основные понятия

Аккредитация – официальное признание компетентности физического или юридического лица выполнять работы в области оценки соответствия.

Декларирование соответствия – форма подтверждения соответствия продукции требованиям ТР.

Декларация о соответствии – документ, удостоверяющий соответствие продукции требованиям ТР.

Заявитель – физическое или юридическое лицо, осуществляющее обязательное подтверждение соответствия.

Знак обращения на рынке – обозначение, информирующее приобретателя о соответствии продукции требованиям ТР.

Знак соответствия – обозначение, информирующее приобретателя о соответствии продукции требованиям системы добровольной сертификации или национальному стандарту.

Идентификация продукции – установление тождественности характеристик продукции её существенным признакам.

Орган по сертификации – юридическое лицо или индивидуальный предприниматель, аккредитованные в установленном порядке для выполнения работ по сертификации.

Оценка соответствия – прямое или косвенное определение соблюдения требований, предъявляемых к объекту.

Подтверждение соответствия – документальное удостоверение соответствия продукции, объектов, процессов требованиям ТР, положениям стандартов, условиям договоров.

Приобретатель – юридическое или физическое лицо, получающее товар или услугу для производственных, бытовых или личных целей.

Сертификация – форма осуществляемого органом по сертификации подтверждения соответствия объекта требованиям ТР, положениям стандартов или условиям договоров.

Сертификат соответствия – документ, удостоверяющий соответствие объекта требованиям ТР, положениям стандартов, условиям договоров.

Система сертификации – совокупность правил проведения сертификации, участников сертификации, правил функционирования системы.

Схема сертификации – состав, порядок и последовательность действий третьей стороны по оценке соответствия продукции, услуг, систем качества.

Форма подтверждения соответствия – определённый порядок документального удостоверения соответствия продукции или иных объектов, выполнения работ или оказания услуг требованиям ТР, положениям стандартов, условиям договоров.

2 Цели, принципы и формы подтверждения соответствия

Подтверждение соответствия осуществляют в *целях*:

- удостоверения соответствия продукции, процессов производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, работ, услуг или иных объектов требованиям ТР, стандартов и условиям договоров;
- содействия приобретателям в компетентном выборе продукции, работ, услуг;

- повышения конкурентоспособности продукции, работ, услуг на российском и международном рынках;
- создания условий для обеспечения свободного перемещения товаров по территории РФ;
- осуществления международного экономического, научно - технического сотрудничества и международной торговли.

Подтверждение соответствия осуществляют на основе *принципов*:

- доступности информации о порядке осуществления подтверждения соответствия заинтересованным лицам;
- недопустимости применения обязательного подтверждения соответствия к объектам, в отношении которых не установлены требования ТР;
- установления перечня форм и схем обязательного подтверждения соответствия в отношении определённых видов продукции в соответствующем ТР;
- уменьшения сроков осуществления обязательного подтверждения и затрат заявителя;
- недопустимости принуждения к осуществлению добровольного подтверждения соответствия, в том числе в определённой системе добровольной сертификации;
- защиты имущественных интересов заявителей;
- соблюдения коммерческой тайны в отношении сведений, полученных при осуществлении подтверждения соответствия;
- недопустимости подмены обязательного подтверждения соответствия добровольной сертификацией.

Подтверждение соответствия применяется равным образом и в равной мере независимо от:

- страны или места происхождения продукции, осуществления процессов производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнения работ и оказания услуг;
- видов или особенностей сделок и лиц, которые являются изготовителями, исполнителями, продавцами, приобретателями, конечными потребителями.

Подтверждение соответствия на территории РФ имеет *характер*:

- *добровольный*;
- *обязательный*.

Добровольное подтверждение соответствия осуществляют в *форме*:

- *добровольной сертификации*.

Обязательное подтверждение соответствия осуществляют в *формах*:

- *принятия декларации о соответствии*;
- *обязательной сертификации*.

Порядок применения форм обязательного подтверждения устанавливает федеральный закон «О техническом регулировании».

3 Добровольное подтверждение соответствия.

Добровольное подтверждение соответствия осуществляется по инициативе заявителя на условиях договора между заявителем и органом по сертификации в форме добровольной сертификации. Добровольное подтверждение соответствия осуществляется для установления соответствия товара, услуги требованиям национальных стандартов, стандартов организаций, систем добровольной сертификации, условиям договоров.

Орган по добровольной сертификации:

- осуществляет подтверждение соответствия объектов добровольного подтверждения соответствия;
- оформляет и выдаёт сертификаты соответствия на объекты, прошедшие добровольную сертификацию;

- предоставляет заявителям право на применение знака соответствия, предусмотренного соответствующей системой добровольной сертификации;

- приостанавливает или прекращает действие выданных им сертификатов соответствия.

Система добровольной сертификации может быть создана юридическими лицами или индивидуальными предпринимателями. Система добровольной сертификации устанавливает:

- перечень объектов добровольной сертификации и их характеристик;
- правила выполнения работ по сертификации;
- порядок оплаты работ по сертификации;
- возможность применения знака соответствия.

Система добровольной сертификации проходит регистрацию в федеральном органе по техническому регулированию, который ведёт единый реестр зарегистрированных систем добровольной сертификации.

Системы добровольной сертификации характерны:

- активной ролью заявителя (выбирает требования к объекту, методы проверки, стандарты и другие нормативные документы, систему и схему сертификации);
- самоорганизацией системы (создание системы возможно любым субъектом хозяйственной деятельности, юридическим или физическим лицом);
- открытостью, возможностью для заинтересованных сторон ознакомиться с составом участников, правилами и процедурами сертификации;
- самостоятельностью, невмешательством федеральных и местных органов власти, общественных структур в деятельность системы.

Объекты, сертифицированные в системе добровольной сертификации, могут быть маркированы *знаком соответствия* системы. Применение знака соответствия национальному стандарту осуществляется заявителем на добровольной основе любым удобным для него способом (типографской печатью, тонкоплёночными технологиями, голографическими изображениями), месте (на товаре, упаковке, технической и сопроводительной документации, рекламе) в порядке, установленном национальным органом по стандартизации.

Знак соответствия:

- убеждает приобретателя, потребителя в надлежащем качестве и безопасности товара, услуги;
- помогает органам госнадзора принять решение о возможности реализации товара;
- является для страховых компаний гарантией безопасности товара.

В РФ действуют более ста систем добровольной сертификации, в том числе системы сертификации:

- в бизнесе и торговле;
- продукции машиностроения и приборостроения «Абрис»;
- веществ и материалов по химическому составу;
- банковских технологий;
- средств и систем в сфере информатизации;
- объектов и услуг;
- систем качества и производств Росстандарта;
- средств измерений;
- морской техники;
- интеллектуальной собственности;
- услуг связи;
- услуг информационных технологий и систем качества предприятий;
- программных средств, применяемых в обязательном медицинском страховании.

4 Обязательное подтверждение соответствия

Обязательное подтверждение соответствия проводится в случаях, установленных соответствующим ТР. Объектом обязательного подтверждения соответствия может быть только

продукция, выпускаемая в обращение на территории РФ. Форма и схемы устанавливаются ТР с учётом степени риска не достижения его целей. Декларация о соответствии и сертификат соответствия имеют равную юридическую силу на всей территории РФ независимо от схем обязательного подтверждения соответствия. Работы по обязательному подтверждению соответствия оплачивает заявитель. Стоимость работ устанавливает Правительство РФ.

Декларирование соответствия осуществляют по одному из *вариантов*:

- принятие декларации о соответствии на основании собственных доказательств;
- принятие декларации о соответствии на основании собственных доказательств и доказательств, полученных с участием органа по сертификации и (или) аккредитованной испытательной лаборатории (третьей стороны).

Заявителем может быть юридическое или физическое лицо, являющееся частным предпринимателем, изготовителем, продавцом, представителем иностранного изготовителя на основании договора с ним, круг заявителей устанавливает соответствующий ТР. Схему декларирования соответствия с участием третьей стороны ТР устанавливает, если отсутствие третьей стороны не приводит к достижению целей подтверждения соответствия.

При декларировании соответствия на основании собственных доказательств заявитель самостоятельно формирует доказательные материалы, в качестве которых использует техническую документацию, результаты собственных испытаний, исследований и (или) другие документы. Состав доказательных материалов определяет соответствующий ТР.

При декларировании соответствия на основании собственных доказательств и полученных с участием третьей стороны доказательств заявитель по своему выбору в дополнение к собственным доказательствам включает:

- протоколы исследований, испытаний и измерений, проведённых в испытательной лаборатории (центре);
- сертификат системы качества, в отношении которого предусмотрен контроль (надзор) органа по сертификации.

Декларация о соответствии оформляется на русском языке и содержит:

- наименование и указание местонахождения заявителя;
- наименование и указание местонахождения изготовителя продукции;
- информацию об объекте подтверждения соответствия;
- наименование ТР, на соответствие требованиям которого подтверждается продукция;
- указание схемы декларирования соответствия;
- заявление-декларацию изготовителя, продавца о безопасности продукции при её использовании в соответствии с целевым назначением;
- сведения о проведённых исследованиях, испытаниях и измерениях, сертификате системы качества, а также документах, послуживших основанием для подтверждения соответствия продукции требованиям ТР;
- указание срока действия декларации о соответствии;
- иные сведения, предусмотренные соответствующим ТР.

Срок действия декларации о соответствии определяет соответствующий ТР. Форму декларации утверждает федеральный орган исполнительной власти по техническому регулированию. Оформленная по установленным правилам декларация подлежит регистрации федеральным органом исполнительной власти по техническому регулированию в течение трёх дней. Порядок ведения реестра деклараций о соответствии, форму представления сведений в реестр, порядок оплаты определяет Правительство РФ.

Декларация о соответствии и доказательные документы хранятся у заявителя в течение трёх лет с момента окончания срока действия декларации. Второй экземпляр декларации хранится в федеральном органе исполнительной власти по техническому регулированию.

До вступления в силу соответствующего ТР Правительство РФ определяет и ежегодно дополняет номенклатуру (перечень) отдельных видов товаров и услуг, в отношении которых распространяется возможность принятия декларации о соответствии вместо обязательной сертификации.

В номенклатуру входят:

- продукция резинотехническая;
- приборы и аппараты оптические;
- подшипники;
- садово-огородный инвентарь;
- продукция деревообработки;
- продукция лёгкой и текстильной промышленности;
- продукция пищевой промышленности, животноводства, растениеводства;
- медицинские изделия.

Обязательное подтверждение соответствия в форме обязательной сертификации осуществляет орган по обязательной сертификации на основании договора с заявителем. Схемы сертификации устанавливает соответствующий ТР. Соответствие продукции требованиям ТР подтверждает сертификат соответствия, выданный заявителю органом по сертификации.

Сертификат соответствия оформляется на русском языке и содержит:

- наименование и указание местонахождения заявителя;
- наименование и указание местонахождения изготовителя продукции;
- наименование и указание местонахождения органа по сертификации, выдавшего сертификат соответствия;
- информацию об объекте сертификации;
- наименование ТР, на соответствие требованиям которого проводилась сертификация;
- заявление органа по обязательной сертификации о соответствии продукции, услуги предъявляемым к ней требованиям;
- информацию о проведённых исследованиях, испытаниях, измерениях;
- информацию о документах, представленных заявителем в качестве доказательств соответствия продукции требованиям ТР;
- указание срока действия сертификата соответствия.

Срок действия сертификата определяет соответствующий ТР. Форму сертификата соответствия утверждает федеральный орган исполнительной власти по техническому регулированию.

Обязательную сертификацию осуществляет орган по сертификации, аккредитованный в порядке, установленном Правительством РФ.

Орган по обязательной сертификации:

- привлекает на договорной основе для проведения исследований, испытаний и измерений испытательные лаборатории (центры), аккредитованные в порядке, установленном Правительством РФ;
- проводит анализ документов, принимает решение, оформляет и выдаёт сертификат соответствия, лицензию на применение знака обращения на рынке;
- ведёт реестр выданных им сертификатов соответствия;
- осуществляет инспекционный контроль за объектами сертификации, если контроль предусмотрен схемой обязательной сертификации, договором;
- информирует органы государственного контроля (надзора) о продукции, поступившей на сертификацию, но не прошедшей её;
- приостанавливает или прекращает действие выданного им сертификата соответствия;
- обеспечивает представление заявителям информации о порядке проведения обязательной сертификации;
- устанавливает стоимость работ по сертификации на основании утверждённой Правительством РФ методики определения стоимости работ.

Федеральный орган исполнительной власти по техническому регулированию ведёт единый реестр выданных сертификатов соответствия. Порядок ведения единого реестра, форму предоставления сведений в реестр, порядок оплаты устанавливает Правительство РФ.

Аккредитованная испытательная лаборатория (центр) оформляет результаты исследований, испытаний и измерений протоколами, на основании которых орган по сертификации при-

нимает решение о выдаче или отказе в выдаче сертификата соответствия. Аккредитованная лаборатория (центр) обязана обеспечить достоверность результатов исследований, испытаний и измерений.

Продукция, соответствие которой требованиям ТР подтверждено в установленном порядке, может быть маркирована *знаком обращения на рынке*. Изображение знака устанавливает Правительство РФ. Знак не является специально защищённым знаком и наносится заявителем в информационных целях любым удобным для него способом.

Заявитель в области обязательного подтверждения соответствия имеет право:

- выбирать форму и схему подтверждения соответствия, предусмотренные для определённых видов продукции соответствующим ТР;
- обращаться для осуществления обязательной сертификации в любой орган по сертификации, область аккредитации которого распространяется на предъявляемую к сертификации продукцию;
- обращаться в орган по аккредитации с жалобами на неправомерные действия органов по сертификации, испытательных лабораторий (центров).

Заявитель в области обязательного подтверждения соответствия обязан:

- обеспечивать соответствие продукции требованиям ТР;
- выпускать в обращение продукцию, подлежащую обязательному подтверждению соответствия, только после подтверждения соответствия;
- указывать в сопроводительной технической документации и при маркировке продукции сведения о сертификате или декларации соответствия;
- предъявлять в органы государственного контроля (надзора) за соблюдением требований ТР, а также другим заинтересованным лицам документы, свидетельствующие о подтверждении соответствия – декларацию, сертификат соответствия или их копии;
- приостанавливать или прекращать реализацию продукции, если истёк срок действия, приостановлено или прекращено действие декларации, сертификата соответствия;
- извещать орган по сертификации об изменениях, вносимых в техническую документацию или технологические процессы производства сертифицированной продукции;
- приостанавливать производство продукции, которая прошла подтверждение соответствия и не удовлетворяет требованиям ТР на основании решений органов государственного контроля (надзора).

При ввозе на территорию РФ продукции, подлежащей обязательному подтверждению соответствия, заявитель одновременно с таможенной декларацией передаёт в таможенные органы декларацию о соответствии или сертификат соответствия. Полученные за пределами территории РФ документы о подтверждении соответствия, протоколы исследований, испытаний и измерений продукции могут быть признаны в соответствии с международными договорами РФ.

В РФ действуют несколько десятков самостоятельных систем обязательного подтверждения соответствия, в том числе системы обязательной сертификации:

- авиационной техники и объектов гражданской авиации;
- посуды;
- лесопромышленной продукции;
- товаров детского ассортимента;
- электрооборудования на соответствие стандартам безопасности;
- металлорежущего, деревообрабатывающего и слесарно-монтажного инструмента;
- металлообрабатывающих станков;
- сельскохозяйственной техники;
- транспортных средств и прицепов;
- технических средств на электромагнитную совместимость;
- нефтепродуктов;
- пищевых продуктов и продовольственного сырья;
- химической продукции;
- «Электросвязь».

Документы об аккредитации, выданные органам по сертификации и аккредитованным испытательным лабораториям (центрам) до вступления в силу федерального закона «О техническом регулировании», а также документы, подтверждающие соответствие (сертификат соответствия, декларация о соответствии) считаются действительными до окончания срока, установленного в них.

Номенклатура продукции, подлежащих обязательному подтверждению соответствия и подтверждение соответствия которой осуществляется в форме принятия декларации о соответствии, определено Правительством Российской Федерации в постановлении от 1 декабря 2009 г. № 982 «Об утверждении единого перечня продукции, подлежащей обязательной сертификации, и единого перечня продукции, подтверждение соответствия которой осуществляется в форме принятия декларации о соответствии».

Пример перечня приведен в таблице 1.

Таблица 1 ИНФОРМАЦИЯ О ПРОДУКЦИИ, ПОДЛЕЖАЩЕЙ ОБЯЗАТЕЛЬНОМУ ПОДТВЕРЖДЕНИЮ СООТВЕТСТВИЯ (В ФОРМЕ ОБЯЗАТЕЛЬНОЙ СЕРТИФИКАЦИИ) В СИСТЕМЕ СЕРТИФИКАЦИИ ГОСТ Р, С УКАЗАНИЕМ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ, УСТАНОВЛИВАЮЩИХ ОБЯЗАТЕЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ¹

Наименование объекта	Код позиции объекта по ОК 005-93 [ОКП]	Обозначение определяющего нормативного документа	Подтверждаемые требования определяющего нормативного документа
1	2	3	4
0110 Электроэнергия			
Электрическая энергия в электрических сетях общего назначения переменного трехфазного и однофазного тока частотой 50 Гц	01 1000	ГОСТ 13109-97	Пп. 5.2 (в части предельно допускаемых значений), 5.6
0251 Нефтепродукты светлые. Альтернативные виды топлива			
Этанольное моторное топливо для автомобильных двигателей с принудительным зажиганием. Бензолы	02 5141	ГОСТ Р 52201-2004	П. 4.1
0253 Масла смазочные (нефтяные)			
Масла авиационные	02 5311	ГОСТ 21743-76	П. 2.2

5 Участники системы сертификации

Система сертификации – совокупность участников, осуществляющих сертификацию по правилам, установленным в этой системе.

В систему сертификации входят:

- национальный орган по сертификации;

¹ В данном документе учтены изменения в Постановление Правительства РФ от 01.12.2009 № 982, внесенные Постановлениями Правительства РФ от 17.03.2010 № 149, от 20.10.2010 № 848, от 13.11.2010 № 906.

- центральный орган по сертификации;
- орган по сертификации;
- испытательная лаборатория (центр);
- совет по сертификации;
- научно-методический центр по сертификации;
- комиссия по апелляциям;
- заявители сертификации.

Национальный орган по сертификации - федеральный орган исполнительной власти - Федеральное агентство РФ по техническому регулированию и метрологии, осуществляющий организацию работ по обязательной сертификации в соответствии с законодательными актами.

Центральный орган по сертификации – федеральный орган исполнительной власти, осуществляющий разработку систем, правил, порядков сертификации однородной продукции.

Орган по сертификации – региональный орган, проводящий сертификацию, созданный на базе организаций, имеющих статус юридического лица и являющийся третьей стороной. Основные функции органа:

- формирование и актуализация фонда нормативных документов;
- разработка и ведение организационно-методических документов;
- приём и рассмотрение заявок на сертификацию;
- определение испытательной лаборатории, органа по оценке системы качества, проверки производства;
- оформление и выдача сертификата установленной формы, регистрация в Государственном реестре;
- признание зарубежных сертификатов;
- организация инспекционного контроля продукции, системы качества;
- отмена или приостановление действия сертификатов по результатам инспекционного контроля;

Заявители должны иметь беспрепятственный доступ к информации об услугах органа, правилах сертификации, результатах испытаний и сертификации, исключая информацию конфиденциального характера или содержащую коммерческую тайну.

Испытательная лаборатория (центр) – организация, имеющая статус юридического лица, являющаяся третьей стороной и осуществляющая для целей сертификации испытания конкретного вида продукции или конкретные виды испытаний с оформлением протоколов.

Совет по сертификации – орган, разрабатывающий рекомендации по формированию единой политики сертификации, повышению эффективности работ, распространению информации о деятельности системы. В состав совета входят представители центрального органа по сертификации, Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии, министерств, ведомств, служб, агентств, изготовителей продукции, испытательных лабораторий, общественных организаций.

Научно-методический центр по сертификации – центр, созданный при центральном органе по сертификации и осуществляющий системные исследования, разрабатывающий методические и практические рекомендации для ведения технико-экономического анализа работ по сертификации.

Комиссия по апелляциям – комиссия, рассматривающая в установленный срок жалобы, поданные по результатам сертификации, извещает подателя и орган по сертификации о принятом решении. Комиссию создаёт центральный орган по сертификации для рассмотрения жалоб и решения спорных вопросов. В работе комиссии участвуют представители Федерального агентства РФ по техническому регулированию и метрологии, министерств, ведомств, служб, агентств, органов по сертификации, испытательных лабораторий, изготовителей сертифицируемой продукции.

Заявители сертификации – изготовители продукции, исполнители работ, продавцы, обратившиеся в орган по сертификации. Заявители обязаны:

- направлять заявку на проведение сертификации, предоставлять продукцию, необходимую нормативную, техническую и иную документацию;
- обеспечивать соответствие реализуемой продукции требованиям нормативных документов;
- маркировать продукцию знаком обращения на рынке;
- обеспечивать беспрепятственное выполнение полномочий должностными лицами органов по сертификации и инспекционному контролю;
- приостанавливать или прекращать реализацию продукции, если она не отвечает требованиям нормативных документов.

Права и обязанности заявителя регламентированы федеральным законом «О техническом регулировании».

6 Схемы сертификации продукции и услуг

Схема сертификации продукции – перечень мероприятий и последовательность действий третьей стороны по оценке соответствия различных видов продукции или услуг. Мероприятия объединены в три группы:

- испытания в испытательной лаборатории;
- проверка производства (системы качества);
- инспекционный контроль сертифицированной продукции (системы качества).

Среди мероприятий:

- испытания образца или партии продукции;
- анализ состояния производства, системы качества;
- рассмотрение декларации о соответствии;
- рассмотрение дополнительных документов, полученных заявителем помимо сертификации (протоколы приёмочных испытаний, гигиенический сертификат, ветеринарный сертификат, сертификат пожарной безопасности, сертификаты или декларации субпоставщиков, сертификаты происхождения, протоколы испытаний в зарубежных лабораториях).

Система сертификации продукции предусматривает несколько схем. Выбор схемы зависит: от вида продукции; особенностей производства, испытаний, поставки, использования продукции; требуемого уровня доказательности; возможных затрат заявителя. Схему устанавливает ТР.

Схемы сертификации продукции, применяемые в РФ, разработанные с учётом рекомендаций ИСО/МЭК и практики подтверждения соответствия ЕС, приведены в табл. 2.

Схемы 1...8 полностью соответствуют рекомендациям ИСО/МЭК. В российской практике дополнительно применяют модифицированные схемы 2а, 3а, 4а, а также схемы 9...10а, основанные на декларации изготовителя.

Современным актуальным направлением развития сертификации в российской и мировой практике является сертификация услуг (см. табл.3.1).

Объектами сертификации в сфере услуг могут быть:

- услуги, работы;
- организации, предоставляющие услуги, выполняющие работы;
- персонал, предоставляющий услуги, выполняющий работы;
- производственный процесс;
- система управления качеством.

Схемы, относящиеся к сертификации услуг и работ, включают:

- оценку мастерства исполнителя, процесса оказания услуги;
- аттестацию предприятия, сертификацию системы качества;
- проверку результатов оказания услуги;
- инспекционный контроль за сертифицированными услугами.

Таблица 2 - Схемы сертификации продукции

№ схемы	Испытания в испытательных лабо- раториях	Проверка производства (системы качества)	Инспекционный контроль сертифицированной продукции (си- стемы качества)
1	Испытание типового об- разца продукции	--	--
1a	То же	Анализ состояния производства	--
2	То же	--	Испытания образцов продукции, взятых у продавца
2a	То же	Анализ состояния производства	То же
3	То же	--	Испытания образцов продукции, взятых у изготовителя
3a	То же	Анализ состояния производства	То же
4	То же	--	Испытания образцов продукции, взятых у продавца
4a	То же	Анализ состояния производства	Испытания образцов продукции, взятых у изготовителя
5	То же	Сертификация произ- водства или системы качества	Контроль стабильности условий производства или функционирова- ния системы качества
6	Рассмотрение деклара- ции о соответствии	Сертификация системы качества	Контроль стабильности функцио- нирования системы качества
7	Испытания партии продукции	--	--
8	Испытания каждого об- разца	--	--
9	Рассмотрение деклара- ции о соответствии	--	--
9a	То же	Анализ состояния производства	--
10	То же	--	Испытания образцов, взятых у из- готовителя или продавца
10a	То же	Анализ состояния производства	То же

Особенности услуг как объекта сертификации:

- субъективность проверки результата услуги (например, причёски);
- невозможность испытаний результата услуги (испытаний сложной бытовой техники после ремонта по установленным жёстким правилам испытаний);
- непосредственный контакт исполнителя и потребителя услуги требует оценки мастерства исполнителя с учётом этики общения (услуги косметического кабинета);
- предоставление услуги и её потребление происходит одновременно (парикмахерские услуги);
- некоторые характеристики услуг зависят от региона (транспортное обслуживание, общественное питание).

Схемы сертификации услуг, применяемые в РФ, приведены в табл. 3.

Таблица 3 -Схемы сертификации услуг

№ схе- мы	Оценка мастер- ства ис- полните- ля	Оценка процесса оказания услуги	Аттеста- ция пред- приятия	Сертифика- ция системы ка- чества	Выборочная проверка результата услуги	Инспекционный контроль
1	Оценка мастер- ства	--	--	--	Выборочная проверка	Проверка результатов услуги
2	--	Оценка процесса	--	--	Выборочная проверка	Контроль стабильности процесса оказания услуги
3	--	--	--	--	Выборочная проверка	Выборочная проверка резуль- тата услуги
4	--	--	Аттеста- ция	--	Выборочная проверка	То же
5	--	--	--	Сертифика- ция	--	Контроль стабильности функционирова- ния системы

7 Порядок обязательного подтверждения соответствия

Порядок подтверждения соответствия на примере наиболее сложной процедуры под-
тверждения соответствия в форме обязательной сертификации можно представить в виде эта-
пов:

- подача заявки на сертификацию;
- оценка соответствия продукции (услуг), системы качества, персонала;
- анализ документов;
- принятие решения;
- оформление и выдача сертификата соответствия;
- оформление и выдача лицензии на применение знака обращения на рынке;
- инспекционный контроль.
- мероприятия по результатам инспекционного контроля.

Подача заявки на сертификацию – заявитель выбирает орган по сертификации и направляет заявку установленной формы. При отсутствии органа по сертификации заявитель может обратиться в территориальный орган Федеральной службы РФ по техническому регулированию и метрологии или иной орган исполнительной власти. Орган по сертификации в течение одного месяца сообщает заявителю своё решение, в котором указаны условия сертификации – схема, наименование испытательной лаборатории, перечень нормативных документов, на соответствие которым будет проведена сертификация.

Оценка соответствия – имеет особенности в зависимости от объекта (схемы) сертификации. Для продукции – аккредитованная испытательная лаборатория осуществляет отбор и идентификацию образцов изделий, проводит испытания, оформляет и передаёт протоколы результатов испытаний заявителю и в орган по сертификации. Если схема предусматривает проверку производства, системы качества комиссия органа по сертификации проводит эти мероприятия и оформляет их актами. Для услуг (работ) орган по сертификации проводит мероприя-
тия, соответствующие принятой схеме.

Анализ документов – протоколы испытаний, акты оценки производства, системы качества, квалификации персонала и иные документы, представленные заявителем, подвергаются анализу, для подготовки решения о соответствии продукции (услуг) требованиям ТР.

Принятие решения – на основании анализа документов, подготовленных органом по сертификации, испытательной лабораторией и представленные заявителем, эксперт составляет заключение, орган по сертификации принимает решение о соответствии продукции (услуг) требованиям ТР.

Оформление и выдача сертификата соответствия, лицензии на применение знака обращения на рынке – если решение положительное, орган по сертификации оформляет и выдаёт сертификат соответствия, лицензию на применение знака обращения на рынке, регистрирует выданные документы в Государственном реестре. Если решение отрицательное, орган по сертификации выдаёт отказ с указанием причин. Форма сертификата соответствия, срок его действия определяются правилами системы сертификации.

В сертификате соответствия продукции указаны:

- регистрационный номер, срок действия сертификата (3...5 лет);
- наименование органа по сертификации, выдавшего сертификат;
- наименование продукции, код по ОКП;
- заявление о соответствии продукции предъявляемым требованиям;
- нормативные документы, на соответствие которым выдан сертификат;
- протоколы исследований, акты проверки производства и иные документы, на основании которых выдан сертификат соответствия;
- подписи эксперта, руководителя органа по сертификации.

Инспекционный контроль – проводит орган, выдавший сертификат соответствия, если инспекционный контроль предусмотрен схемой сертификации. Контроль проходит в виде плановых (один раз в год в течение срока действия сертификата) и внеплановых (при поступлении рекламаций, при внесении существенных изменений в конструкцию изделия) проверок. В инспекционную комиссию входят представители территориального органа Федеральной службы РФ по техническому регулированию и метрологии, обществ потребителей и других заинтересованных организаций. Инспекционный контроль включает анализ информации, полученной в ходе проверок.

По результатам инспекционного контроля эксперт органа по сертификации составляет акт и принимает решение:

- о продолжении действия сертификата соответствия;
- о приостановлении или отмене действия сертификата соответствия.

Отмена действия сертификата соответствия происходит при несоответствии продукции (услуги) требованиям ТР, при изменении нормативного документа на предмет сертификации.

Мероприятия по результатам инспекционного контроля - проводит изготовитель на основании предписания об устранении нарушений требований ТР, выданном органом государственного контроля (надзора).

Обязательное подтверждение соответствия продукции в форме декларирования соответствия, добровольная сертификация проходят по упрощенной процедуре. При добровольной сертификации систему добровольной, а при её отсутствии систему обязательной сертификации, схему сертификации выбирает заявитель. При положительном решении органа по подтверждению соответствия заявитель получает документы установленной формы - декларацию соответствия, сертификат соответствия. Указанные документы имеют одинаковую юридическую силу.

8 Организация деятельности органов по сертификации

Качество сертификации товаров и услуг определяет высокая компетентность и независимость органов по сертификации, а также способность удовлетворять запросы заявителей и других заинтересованных лиц.

Деятельность органа по сертификации должна быть:

- открытой в информационном обеспечении;
- доступной в организационном и финансовом отношениях;
- антидискриминационной по признакам формы собственности и страны нахождения изготовителя (поставщика).

В административную структуру органа по сертификации входят:

- исполнительный директор;
- координационный (управляющий) совет;
- наблюдательный совет;
- комиссия по сертификации;
- комиссия по оценке системы качества;
- апелляционная комиссия;
- испытательная лаборатория.

Исполнительный директор - руководит текущей работой органа по сертификации в области аккредитации.

Координационный (управляющий) совет - обеспечивает деятельность органа по сертификации. Основные функции координационного совета:

- формирование и контроль реализации политики, определяющей деятельность органа;
- контроль стоимости работ по сертификации;
- определение в необходимых случаях состава штатных специалистов, привлекаемых на договорных условиях для выполнения работ по сертификации;
- организация взаимодействия с национальным органом по сертификации и другими организациями, занимающимися вопросами оценки соответствия.

В координационный совет входят представители всех заинтересованных структур - министерств, служб, агентств, профессиональных ассоциаций, банков, страховых компаний, промышленных предприятий, научных и учебных организаций.

Наблюдательный совет - осуществляет общий надзор за деятельностью органа по сертификации, состоит из представителей организации учредителя.

Комиссии по сертификации и оценке системы качества - изучают отчёты экспертов, проводивших оценку соответствия, и принимают решения о выдаче или отказе в выдаче сертификата соответствия (см. прил.1).

Апелляционная комиссия - рассматривает жалобы, поступившие от заявителей на действия и решения органа по сертификации. В комиссию входят специалисты в области сертификации, независимые юристы.

Испытательная лаборатория - проводит испытания и оформляет протоколы испытаний продукции (см. прил.2), может входить в состав органа по сертификации или быть самостоятельной организацией.

Аккредитацию органов по сертификации и испытательных лабораторий (центров) осуществляют в целях:

- подтверждения компетентности органов по сертификации и испытательных лабораторий (центров), выполняющих работу по подтверждению соответствия;
- обеспечения доверия изготовителей, продавцов и приобретателей к деятельности органов по сертификации и аккредитованных испытательных лабораторий (центров);
- создания условий для признания результатов деятельности органов по сертификации и аккредитованных испытательных лабораторий (центров).

Аккредитацию органов по сертификации и испытательных лабораторий (центров), выполняющих работы по подтверждению соответствия, осуществляют на основе принципов:

- открытости и доступности правил аккредитации;
- компетентности и независимости органов, осуществляющих аккредитацию;
- недопустимости ограничения конкуренции и создания препятствий пользованию услугами органов по сертификации и аккредитованных испытательных лабораторий (центров);
- обеспечения равных условий лицам, претендующим на получение аккредитации;

- недопустимости совмещения полномочий на аккредитацию и подтверждение соответствия;
- недопустимости установления пределов действия документов об аккредитации на отдельных территориях.

Аккредитацию органов по сертификации и испытательных лабораторий (центров), выполняющих работы по подтверждению соответствия, осуществляют в порядке, установленном Правительством РФ.

Испытания продукции в целях оценки соответствия осуществляют испытательные лаборатории. Испытательная лаборатория может быть самостоятельной организацией, частью органа по сертификации или другой организации. Основные требования, предъявляемые к испытательным лабораториям (центрам):

- обладание статусом юридического лица;
- обеспечение испытаний квалифицированным персоналом, оборудованием, методиками;
- исключение возможности оказания давления на сотрудников с целью фальсификации результатов испытаний;
- предоставление результатов испытаний в виде протоколов установленной формы;
- соблюдение мер секретности конфиденциальной информации и защиты прав собственности.

Сведения о товаре (надёжности, экономичности, технических параметрах) с целью сравнения аналогичных товаров различных производителей получают по результатам *сравнительных испытаний*, проводимых в аккредитованных испытательных лабораториях. Анализ результатов публикуют в специальных изданиях.

Полученные за пределами территории РФ документы о подтверждении соответствия, знаки соответствия, протоколы исследований (испытаний) и измерений продукции могут быть признаны в соответствии с международными договорами РФ. При отсутствии такого договора товары, ввозимые на территорию РФ, проходят процедуру подтверждения соответствия на общих основаниях.

Орган по сертификации и его должностное лицо, нарушившие правила выполнения работ по сертификации, если такое нарушение повлекло за собой выпуск в обращение продукции, не соответствующей требованиям ТР, несут ответственность в соответствии с законодательством РФ.

Аккредитованная испытательная лаборатория (центр), эксперты за предоставление недостоверных или необъективных результатов исследований (испытаний) измерений несут ответственность в соответствии с законодательством РФ.

Финансирование работ в области технического регулирования осуществляют за счёт бюджетных средств, которые идут на:

- проведение государственного контроля (надзора) за соблюдением требований ТР;
- создание и ведение Федерального информационного фонда ТР и стандартов;
- реализацию программы разработки ТР, национальных стандартов, а также проведение экспертиз проектов ТР и стандартов;
- разработку общероссийских классификаторов;
- уплату взносов в международные организации по стандартизации.

Средства в федеральный бюджет поступают в виде:

- средств, полученных от заявителей за проведение работ по оценке соответствия;
- штрафов, накладываемых органами государственного контроля (надзора) на юридических и физических лиц;
- средств, вырученных от распространения стандартов, каталогов, справочников.

Расширение международного общественного движения в защиту прав человека и возращение конкурентной борьбы на товарном рынке привели к повышению внимания к социальной лояльности.

Социальная лояльность – степень выполнения фирмой требований конвенций Международной организации труда (МОТ) и ООН в отношении использования детского труда, принудительного труда, обеспечения безопасности и гигиены работ, рабочего времени и вознаграждения, соблюдения свободы ассоциации и прав заключения коллективных договоров.

Принят международный стандарт SA 8000, который базируется на Всеобщей декларации прав человека, Конвенции ООН о правах ребёнка, рекомендациях Международной организации труда (МОТ), стандартах ИСО. Производители товаров заинтересованы в проведении независимого аудита, сертификации по требованию SA 8000 с целью получения сертификата соответствия социальной лояльности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Восстановление в начале двадцать первого века национального промышленного потенциала Российской Федерации, рост поставок по импорту, расширение списка стран партнёров в международной торговле привели к лавинообразному увеличению объёма, расширению номенклатуры товаров и услуг, подлежащих обязательной оценке соответствия. По опыту мировой практики и данным Федерального агентства Российской Федерации и по техническому регулированию и метрологии объём потенциально опасной продукции, подлежащей обязательной сертификации, достигает 80...90% от общего объёма и имеет тенденцию роста.

Практика сертификации в РФ выявила ряд существенных недостатков:

- неэффективность организационных принципов сертификации;
- завышенную номенклатуру товаров и услуг, подлежащих обязательной сертификации;
- необоснованный выбор сложных схем сертификации;
- неравномерное территориальное размещение органов по сертификации и испытательных лабораторий;
- дефицит квалифицированных кадров.

Перечисленные факторы привели к неоправданным материальным, временным, финансовым и людским затратам на организацию и осуществление процедур обязательного подтверждения соответствия.

В начале двадцать первого века в Российской Федерации назрела необходимость совершенствования и оптимизации процедур подтверждения соответствия, увеличения доли товаров и услуг, для которых обязательная сертификация может быть заменена менее затратной формой подтверждения соответствия - декларированием соответствия.

Федеральный закон «О техническом регулировании» предоставил новые возможности по дальнейшему совершенствованию оценки соответствия товаров и услуг обязательным требованиям стандартов.

Дальнейшее совершенствование процедур оценки соответствия является необходимым и определяющим условием роста национального валового продукта, успешной интеграции экономики России в мировую экономическую систему, расширения международного экономического и научно-технического сотрудничества, роста объёма и совершенствования структуры международного товарообмена в интересах нашего государства.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Цели, принципы подтверждения соответствия.
2. Характер, формы подтверждения соответствия.
3. Добровольное подтверждение соответствия.
4. Обязательное подтверждение соответствия по форме декларирования.
5. Обязательное подтверждение соответствия по форме сертификации.
6. Участники системы сертификации.
7. Схемы сертификации продукции.
8. Схемы сертификации услуг.
9. Порядок обязательного подтверждения соответствия.
10. Организация деятельности органов по сертификации.
11. Цели, принципы аккредитации органов по сертификации.
12. Финансирование работ по сертификации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.

1. Крылова Г.Д. Основы стандартизации, сертификации, метрологии: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. – 711 с.
2. Сертификация. Сборник нормативных документов Российской Федерации. / Под ред. д.т.н., проф. Фомина В.Н., - М.: Ассоциация авторов и издателей «Тандем». Издательство «ЭКМОС». – 2000. - 144 с.
3. Никифоров А.Д., Бакиев Т.А. Метрология, стандартизация и сертификация: Учеб. пособие. – М.: Высш. Школа, 2002. – 422 с. : ил.
4. Басаков М.И. Сертификации продукции и услуг с основами стандартизации и метрологии: Учебное пособие. Издание 2-е, испр. и доп. – Ростов на /Д: издательский центр «МарТ», 2002. – 256 с.
5. Федеральный закон «О техническом регулировании». – М.: Ось-89, 2003. – 48 с. (Актуальный закон).
6. Сергеев А.Г., Латышев М.В., Терегеря В.В. Метрология, стандартизация, сертификация: Учебное пособие. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Логос, 2004. – 560 с.: ил.
7. Лифиц И.М. Стандартизация, метрология и сертификация: Учебник. – 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Юрайт-Издат, 2004. – 335 с.
8. Димов Ю.В. Метрология, стандартизация и сертификация. Учебник для вузов. 2-е изд. – СПб.: Питер, 2004. - 432 с.: ил.
9. Закон Российской Федерации «О защите прав потребителей». – М.: ИКЦ «МарТ», 2004. – 48 с.
10. Яблонский О.П., Иванова В.А. Основы стандартизации, метрологии, сертификации: Учебник. – Ростов на/Д: Феникс, 2004. – 448 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ФОРМА СЕРТИФИКАТА СООТВЕТСТВИЯ НА ПРОДУКЦИЮ

ГОССТАНДАРТ РОССИИ СИСТЕМА СЕРТИФИКАЦИИ ГОСТ Р СЕРТИФИКАТ СООТВЕТСТВИЯ № _____		
Срок действия с _____ по _____		
Орган по сертификации _____ _____ _____		
удостоверяет, что должным образом идентифицированная заявителем продукция _____ _____ _____		
изготовитель (продавец) _____ _____ _____		код К-ОКП
соответствует требованиям нормативных документов _____ _____ _____		код ТН ВЭД
сертификат выдан на основании _____ _____ _____		
дополнительная информация _____ _____ _____		
Руководитель органа М.П.	_____ подпись	_____ инициалы, фамилия
Эксперт	_____ подпись	_____ инициалы, фамилия
Сертификат имеет юридическую силу на всей территории Российской Федерации		

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ФОРМА ПРОТОКОЛА ИСПЫТАНИЙ

Испытательная лаборатория _____

Регистрационный номер РОСС RU _____

Юридический адрес _____

Регистрационный номер пробы (образца) _____

ПРОТОКОЛ

испытаний проб (образцов)

от _____ 200 ____ г.

ЗАЯВИТЕЛЬ _____

Наименование пробы (образца) _____

Дата выработки _____

Изготовитель _____

Величина партии _____

Дата получения образца _____

Дата и место отбора проб _____

Дата проведения испытаний _____

Дополнительная информация _____

Проба (образец) испытана на соответствие _____

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

№ п/п	Наименование показателей	Результат испытаний	Нормируемые показатели	НД на методы испытаний
1.				
2.				
3.				

Испытание провели:

(Ф. И. О.)

(Ф. И. О.)

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебно-методическому
комплексу
С.А. Упоров



МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ

ТИПЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

Специальность

21.05.03 Технология геологической разведки

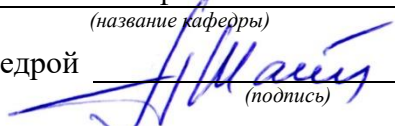
Автор: Глушкова Т.А., к.т.н.

Одобен на заседании кафедры

Геофизики

(название кафедры)

Зав.кафедрой



(подпись)

Талалай А. Г.

(Фамилия И.О.)

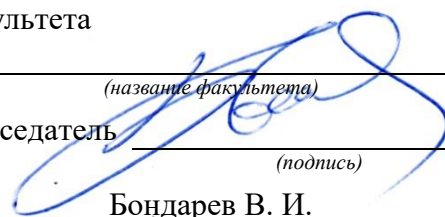
Протокол № 1 от 05.10. 2020

(Дата)

Рассмотрен методической комиссией
факультета

(название факультета)

Председатель



(подпись)

Бондарев В. И.

(Фамилия И.О.)

Протокол № 2 от 13.10. 2020

(Дата)

Екатеринбург
2020

Типы распределений

Различают дискретные и непрерывные вероятностные распределения. **Дискретное** распределение характеризуется тем, что оно сосредоточено в конечном или счетном числе точек. **Непрерывное** распределение "размазано" по некоторому вещественному интервалу.

Характеристики распределений

Вероятностное распределение может быть описано несколькими эквивалентными способами. Здесь приведены лишь некоторые из них.

- **Функция распределения.** Определена для любого вещественного распределения. Для случайной величины X ее функцией распределения называется

$$F_X(z) = P(X \leq z), \quad -\infty < z < \infty.$$

- **Плотность распределения.** Определена для непрерывных распределений. Представляет собой производную от функции распределения:

$$f_X(z) = F'_X(z), \quad -\infty < z < \infty.$$

- **Функция вероятности.** Альтернативный способ описания дискретных распределений. Если распределение случайной величины X сосредоточено в конечном или счетном числе точек $x_1, x_2, \dots, x_n, \dots$ то его можно описать вероятностями принятия случайной величиной X соответствующих значений:

Значение	x_1	x_2	$\dots$	x_n	$\dots$
Вероятность	p_1	p_2	$\dots$	p_n	$\dots$

- Здесь $p_k = f(x_k) = P(X = x_k), k=1,2,\dots,n,\dots$

Параметры распределений

Опишем некоторые параметры распределения.

- **Математическое ожидание (среднее значение) EX** случайной величины X . Представляет собой интеграл вида

$$EX = \int_{-\infty}^{\infty} z dF_X(z).$$

Для непрерывной случайной величины может быть выражено также через плотность ее распределения

$$EX = \int_{-\infty}^{\infty} z f_X(z) dz,$$

а для дискретной случайной величины - через функцию вероятности:

$$EX = \sum_k x_k p_k.$$

- **Дисперсия (рассеяние)** случайной величины X имеет вид

$$DX = E(X - EX)^2.$$

В классических методах теории риска дисперсия часто использовалась в качестве меры риска, измерителя рискованности проектов.

- **Стандартное отклонение** случайной величины X задается выражением

$$\sigma(X) = \sqrt{DX}.$$

- **Асимметрия** распределения случайной величины X :

$$\mathcal{A}(X) = \frac{E(X - EX)^3}{\sigma^3(X)}.$$

характеризует различие "хвостов" распределения; асимметрия положительна при более тяжелом правом хвосте, и отрицательна при более тяжелом левом хвосте. Для симметричных распределений асимметрия равна 0.

- **Острровершинность** распределения случайной величины X :

$$\mathcal{A}(X) = \frac{E(X - EX)^4}{\sigma^4(X)} - 3.$$

характеризует тяжесть "хвостов" распределения; положительные значения этого параметра соответствуют распределениям с более тяжелыми хвостами, чем у нормального распределения.

- **Медианой** $a = \text{med}(X)$ распределения случайной величины X называется корень уравнения

$$F_X(a) = \frac{1}{2}.$$

Медиана является средней характеристикой распределения в том смысле, что X с равными вероятностями принимает значения, лежащие справа и слева от a . Преимуществом медианы перед математическим ожиданием является тот факт, что математическое ожидание может быть неопределенным, если задающий его интеграл (в дискретном случае - ряд) расходится, как, например, в случае распределения Коши. Недостатком медианы является ее возможная неоднозначность для дискретных распределений. Медиана симметричного распределения совпадает с его средним значением (если последнее существует).

- **Модой** распределения называется наиболее вероятное значение случайной величины: в непрерывном случае - точка максимума плотности распределения, в дискретном случае - точка максимума функции вероятности. Мода распределения может быть неоднозначной, и использование этого параметра в теории риска ограничено.

Другие характеристики распределений

Вероятностное распределение может быть описано и другими характеристиками. Среди них:

- **Характеристическая функция.** Определена для произвольных распределений.

$$\varphi_X(z) = E \exp(izX) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(izx) dF_X(x), \quad -\infty < z < \infty.$$

Здесь i - мнимая единица. Для непрерывного распределения характеристическую функцию можно также выразить через плотность распределения:

$$\varphi_X(z) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(izx) f_X(x) dx, \quad -\infty < z < \infty,$$

а для дискретного распределения - через функцию вероятности

$$\varphi_X(z) = \sum_k \exp(izx_k) p_k, \quad -\infty < z < \infty.$$

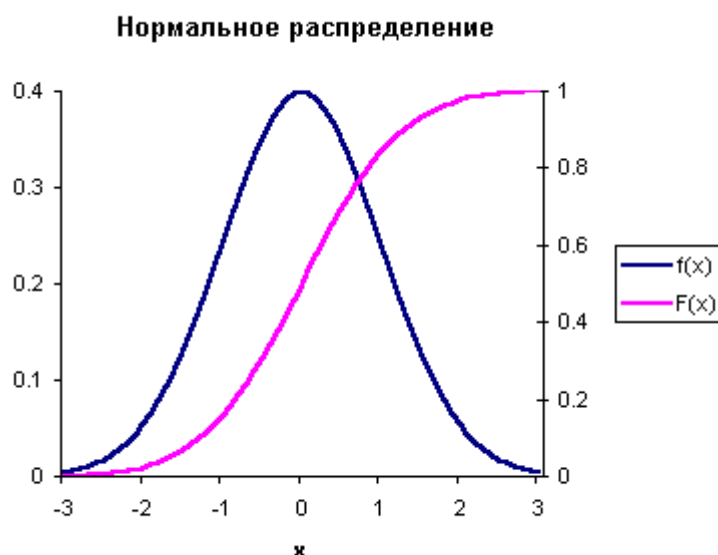
Нормальное распределение

Описание

Нормальным называется вещественное непрерывное распределение с плотностью распределения

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$
, где μ и $\sigma > 0$ - параметры распределения. **Стандартным** называется нормальное распределение с параметрами $\mu = 0$ и $\sigma = 1$.

На следующем рисунке показаны графики плотности распределения (привязан к левой оси ординат) и функции распределения (привязан к правой оси ординат) с параметрами $\mu = 0$, $\sigma = 1$.



Характеристики

В следующей таблице приведены формулы для вычисления характеристик нормального распределения.

<u>Плотность распределения</u>	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$
<u>Функция распределения*</u>	$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t)dt$
<u>Математическое ожидание</u>	μ
<u>Стандартное отклонение</u>	σ
<u>Дисперсия</u>	σ^2
<u>Асимметрия</u>	0
<u>Островершинность</u>	0
<u>Медиана</u>	μ
<u>Мода</u>	μ
<u>Характеристическая функция</u>	$\varphi(z) = \exp(iz\mu - z^2\sigma^2/2)$

* Функция нормального распределения через элементарные функции не выражается.

Моделирование

Простейший метод воспроизведения значений случайной величины с заданным нормальным распределением для использования в методах Монте Карло состоит из следующих шагов:

Получить 12 независимых значений $U_1, \dots, U_{12}$ случайной величины с равномерным распределением на отрезке $[0,1]$.

Вычислить $N = (U_1 + \dots + U_{12} - 6)$. Величина N хорошо приближает величину со стандартным нормальным распределением (с параметрами $\mu = 0$, $\sigma = 1$). Преобразованная величина $\sigma N + \mu$ дает желаемый результат.

Распределение Стьюдента

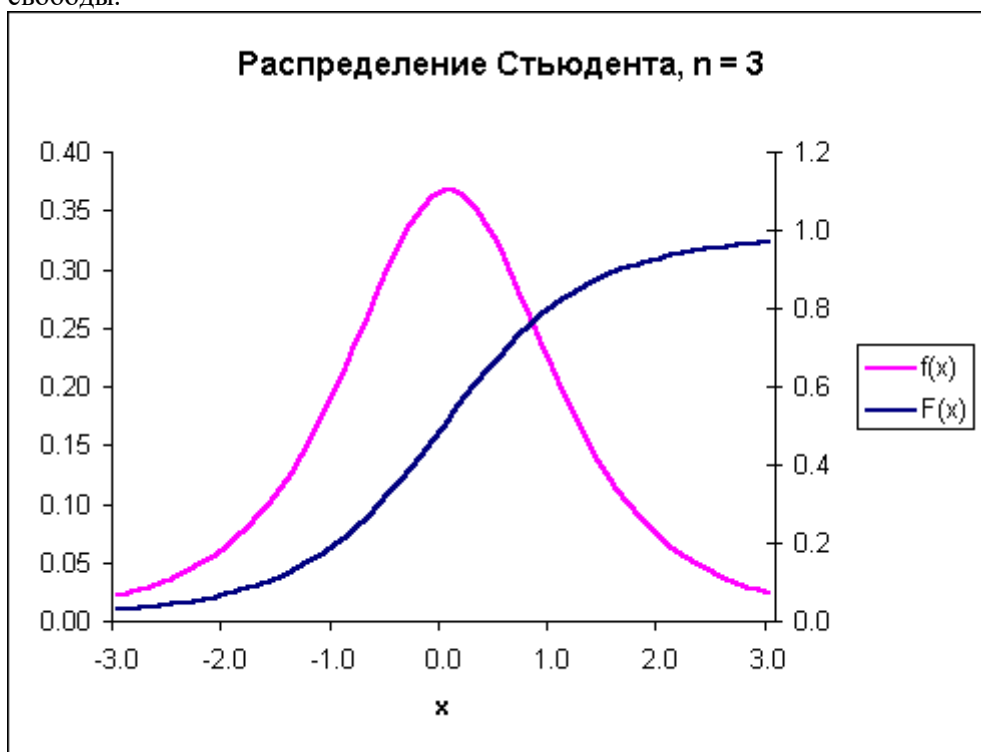
Описание

Распределением Стьюдента с n степенями свободы называется распределение случайной величины

$$t = \xi_0 / ((\xi_1^2 + \dots + \xi_n^2)/n)^{1/2}, \quad (1)$$

где $\xi_0, \xi_1, \dots, \xi_n$ - независимые стандартные нормальные случайные величины. Это распределение непрерывно, его плотность и значения параметров приведены ниже в таблице.

На следующем рисунке показаны графики плотности распределения (привязан к левой оси ординат) и функции распределения (привязан к правой оси ординат) Стьюдента с тремя степенями свободы.



Характеристики

В следующей таблице приведены формулы для вычисления характеристик распределения Стьюдента.

<u>Плотность распределения</u>	$f(x) = \frac{\Gamma((n+1)/2)}{\sqrt{\pi n} \Gamma(n/2)} \left(1 + \frac{x^2}{n}\right)^{-(n+1)/2}$
<u>Математическое ожидание</u>	0, ($n > 1$)
<u>Стандартное отклонение</u>	$(n/(n-2))^{1/2}$, ($n > 2$)
<u>Дисперсия</u>	$n/(n-2)$, ($n > 2$)
<u>Асимметрия</u>	0, ($n > 3$)
<u>Медиана</u>	0
<u>Мода</u>	0

Моделирование

Воспроизведение значений случайной величины с распределением Стьюдента с n степенями свободы производится по формуле (1).

Таблица функций распределения Стьюдента

Функции распределения Стьюдента

В следующей таблице приведены значения функции распределения Стьюдента $F_n(x)$ с n степенями

свободы для некоторых значений аргумента x в диапазоне от 0 до 20. В заголовках строк указано значение аргумента x , а в заголовках столбцов - количество степеней свободы n . Так, например, $F_5(0.9) = 0.795$.

Для отрицательных x можно вычислить значение функции по формуле $F_n(x) = 1 - F_n(-x)$. Например, $F_{10}(-1.2) = 1 - F_{10}(1.2) = 1 - 0.871 = 0.129$.

x	1	2	5	10	20	50
0	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
0.1	0.532	0.535	0.538	0.539	0.539	0.540
0.2	0.563	0.570	0.575	0.577	0.578	0.579
0.3	0.593	0.604	0.612	0.615	0.616	0.617
0.4	0.621	0.636	0.647	0.651	0.653	0.655
0.5	0.648	0.667	0.681	0.686	0.689	0.690
0.6	0.672	0.695	0.713	0.719	0.722	0.724
0.7	0.694	0.722	0.742	0.750	0.754	0.756
0.8	0.715	0.746	0.770	0.779	0.783	0.786
0.9	0.733	0.768	0.795	0.805	0.811	0.814
1	0.750	0.789	0.818	0.830	0.835	0.839
1.2	0.779	0.823	0.858	0.871	0.878	0.882
1.4	0.803	0.852	0.890	0.904	0.912	0.916
1.6	0.822	0.875	0.915	0.930	0.937	0.942
1.8	0.839	0.893	0.934	0.949	0.957	0.961
2	0.852	0.908	0.949	0.963	0.970	0.975
2.5	0.879	0.935	0.973	0.984	0.989	0.992
3	0.898	0.952	0.985	0.993	0.996	0.998
3.5	0.911	0.964	0.991	0.997	0.999	1.000
4	0.922	0.971	0.995	0.999	1.000	1.000
4.5	0.930	0.977	0.997	0.999	1.000	1.000
5	0.937	0.981	0.998	1.000	1.000	1.000
6	0.947	0.987	0.999	1.000	1.000	1.000
7	0.955	0.990	1.000	1.000	1.000	1.000
8	0.960	0.992	1.000	1.000	1.000	1.000
9	0.965	0.994	1.000	1.000	1.000	1.000
10	0.968	0.995	1.000	1.000	1.000	1.000
12	0.974	0.997	1.000	1.000	1.000	1.000
14	0.977	0.997	1.000	1.000	1.000	1.000
16	0.980	0.998	1.000	1.000	1.000	1.000
18	0.982	0.998	1.000	1.000	1.000	1.000
20	0.984	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000

Таблица функции нормального распределения

Функция стандартного нормального распределения

В следующей таблице приведены значения функции стандартного нормального распределения $\Phi(\cdot)$ для значений аргумента в интервале от 0 до 4 с шагом 0.01. Каждый элемент матрицы представляет значение функции Φ в точке x , равной сумме заголовков строки и столбца. Например, для нахождения значения Φ в точке 0.26, достаточно взять число из строки 0.2 и столбца 0.06, то есть, $\Phi(0.26) = 0.6026$. Аналогично, $\Phi(2.31) = \Phi(2.3 + 0.01) = 0.9896$.

Для отрицательных x можно вычислить значение функции по формуле $\Phi(x) = 1 - \Phi(-x)$. Например, $\Phi(-1.67) = 1 - \Phi(1.67) = 1 - 0.9525 = 0.0475$.

Значения функции нормального распределения $\Phi_{\mu,\sigma}$ с параметрами μ , σ вычисляются по формуле $\Phi_{\mu,\sigma}(x) = \Phi((x - \mu) / \sigma)$.

	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.5000	0.5040	0.5080	0.5120	0.5160	0.5199	0.5239	0.5279	0.5319	0.5359
0.1	0.5398	0.5438	0.5478	0.5517	0.5557	0.5596	0.5636	0.5675	0.5714	0.5753
0.2	0.5793	0.5832	0.5871	0.5910	0.5948	0.5987	0.6026	0.6064	0.6103	0.6141
0.3	0.6179	0.6217	0.6255	0.6293	0.6331	0.6368	0.6406	0.6443	0.6480	0.6517
0.4	0.6554	0.6591	0.6628	0.6664	0.6700	0.6736	0.6772	0.6808	0.6844	0.6879
0.5	0.6915	0.6950	0.6985	0.7019	0.7054	0.7088	0.7123	0.7157	0.7190	0.7224
0.6	0.7257	0.7291	0.7324	0.7357	0.7389	0.7422	0.7454	0.7486	0.7517	0.7549
0.7	0.7580	0.7611	0.7642	0.7673	0.7704	0.7734	0.7764	0.7794	0.7823	0.7852
0.8	0.7881	0.7910	0.7939	0.7967	0.7995	0.8023	0.8051	0.8078	0.8106	0.8133
0.9	0.8159	0.8186	0.8212	0.8238	0.8264	0.8289	0.8315	0.8340	0.8365	0.8389
1.0	0.8413	0.8438	0.8461	0.8485	0.8508	0.8531	0.8554	0.8577	0.8599	0.8621
1.1	0.8643	0.8665	0.8686	0.8708	0.8729	0.8749	0.8770	0.8790	0.8810	0.8830
1.2	0.8849	0.8869	0.8888	0.8907	0.8925	0.8944	0.8962	0.8980	0.8997	0.9015
1.3	0.9032	0.9049	0.9066	0.9082	0.9099	0.9115	0.9131	0.9147	0.9162	0.9177
1.4	0.9192	0.9207	0.9222	0.9236	0.9251	0.9265	0.9279	0.9292	0.9306	0.9319
1.5	0.9332	0.9345	0.9357	0.9370	0.9382	0.9394	0.9406	0.9418	0.9429	0.9441
1.6	0.9452	0.9463	0.9474	0.9484	0.9495	0.9505	0.9515	0.9525	0.9535	0.9545
1.7	0.9554	0.9564	0.9573	0.9582	0.9591	0.9599	0.9608	0.9616	0.9625	0.9633
1.8	0.9641	0.9649	0.9656	0.9664	0.9671	0.9678	0.9686	0.9693	0.9699	0.9706
1.9	0.9713	0.9719	0.9726	0.9732	0.9738	0.9744	0.9750	0.9756	0.9761	0.9767
2.0	0.9772	0.9778	0.9783	0.9788	0.9793	0.9798	0.9803	0.9808	0.9812	0.9817
2.1	0.9821	0.9826	0.9830	0.9834	0.9838	0.9842	0.9846	0.9850	0.9854	0.9857
2.2	0.9861	0.9864	0.9868	0.9871	0.9875	0.9878	0.9881	0.9884	0.9887	0.9890
2.3	0.9893	0.9896	0.9898	0.9901	0.9904	0.9906	0.9909	0.9911	0.9913	0.9916
2.4	0.9918	0.9920	0.9922	0.9925	0.9927	0.9929	0.9931	0.9932	0.9934	0.9936
2.5	0.9938	0.9940	0.9941	0.9943	0.9945	0.9946	0.9948	0.9949	0.9951	0.9952
2.6	0.9953	0.9955	0.9956	0.9957	0.9959	0.9960	0.9961	0.9962	0.9963	0.9964
2.7	0.9965	0.9966	0.9967	0.9968	0.9969	0.9970	0.9971	0.9972	0.9973	0.9974
2.8	0.9974	0.9975	0.9976	0.9977	0.9977	0.9978	0.9979	0.9979	0.9980	0.9981
2.9	0.9981	0.9982	0.9982	0.9983	0.9984	0.9984	0.9985	0.9985	0.9986	0.9986
3.0	0.9987	0.9987	0.9987	0.9988	0.9988	0.9989	0.9989	0.9989	0.9990	0.9990
3.1	0.9990	0.9991	0.9991	0.9991	0.9992	0.9992	0.9992	0.9992	0.9993	0.9993
3.2	0.9993	0.9993	0.9994	0.9994	0.9994	0.9994	0.9994	0.9995	0.9995	0.9995
3.3	0.9995	0.9995	0.9995	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9997

3.4	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9998
3.5	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998
3.6	0.9998	0.9998	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
3.7	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
3.8	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
3.9	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
4.0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

Равномерное распределение

Описание

Говорят, что случайная величина X имеет **равномерное** распределение на отрезке $[a,b]$, если она непрерывна, принимает значения только на отрезке $[a,b]$, а плотность ее распределения постоянна на отрезке $[a,b]$, и равна 0 вне этого отрезка.

На следующем рисунке показаны графики плотности (привязан к левой вертикальной оси ординат) и функции (привязан к правой оси ординат) равномерного распределения на отрезке $[0,2]$.



Характеристики

В следующей таблице приведены формулы для вычисления характеристик равномерного распределения.

<u>Плотность распределения</u>	$f(x) = \begin{cases} (b-a)^{-1}, & x \in [a, b] \\ 0, & x \notin [a, b] \end{cases}$
<u>Функция распределения</u>	$F(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ (x-a)/(b-a), & x \in [a, b] \\ 1, & x > b \end{cases}$
<u>Математическое ожидание</u>	$(a+b)/2$
<u>Стандартное отклонение</u>	$(b-a)/2 \sqrt{3}$
<u>Дисперсия</u>	$(b-a)^2/12$
<u>Асимметрия</u>	0
<u>Островершинность</u>	-6/5

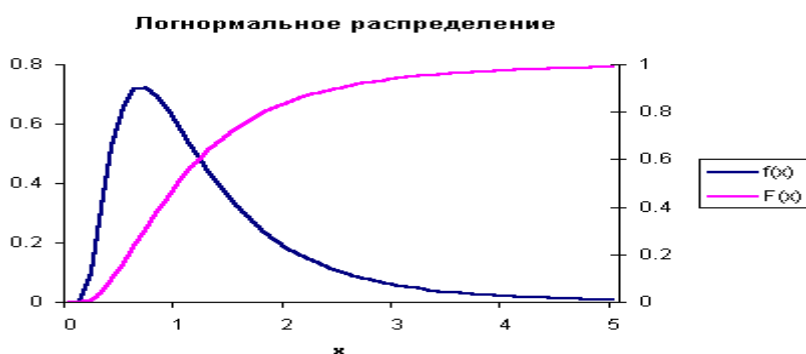
Моделирование

Моделирование значений случайной величины U с равномерным распределением на отрезке $[0,1]$ доступно в большинстве современных систем программирования. Например, в языке VBA эту роль выполняет функция Rnd(), а в языках Паскаль и Дельфи - функция random.

Логнормальное распределение

Описание

Говорят, что случайная величина X имеет **логнормальное** распределение с параметрами μ , σ , если $X = \exp(Y)$, где Y имеет **нормальное** распределение с параметрами μ , σ . Случайная величина с логнормальным распределением является непрерывной, и принимает только положительные значения. Графики плотности (привязан к левой вертикальной оси ординат) и функции (привязан к правой оси ординат) логнормального распределения с параметрами $\mu = 0$, $\sigma = 0.7$ приведен на следующем рисунке.



Характеристики

В следующей таблице приведены формулы для вычисления характеристик логнормального распределения.

<u>Плотность распределения</u>	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi x} \sigma} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$
<u>Функция распределения*</u>	$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt$
<u>Математическое ожидание</u>	$\exp\left(\mu + \frac{1}{2}\sigma^2\right)$
<u>Стандартное отклонение</u>	$\exp\left(\mu + \frac{1}{2}\sigma^2\right) \sqrt{(\exp(\sigma^2) - 1)}$
<u>Дисперсия</u>	$\exp(2\mu + \sigma^2) (\exp(\sigma^2) - 1)$
<u>Асимметрия</u>	$(\exp(\sigma^2) + 2) \sqrt{(\exp(\sigma^2) - 1)}$
<u>Мода</u>	$\exp(\mu - \sigma^2)$

* Функция логнормального распределения F через элементарные функции не выражается. Для приближенного вычисления функции этого распределения с параметрами μ , σ можно воспользоваться формулой $F(x) = \Phi_{\mu,\sigma}(\ln x)$, где $\Phi_{\mu,\sigma}$ - функция нормального распределения с параметрами μ , σ , способ вычисления которой описан [здесь](#).

Моделирование

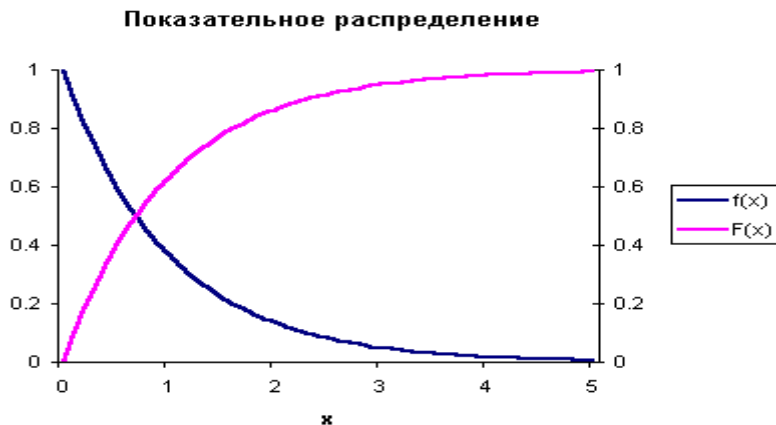
Моделирование значений случайной величины с логнормальным распределением (с параметрами μ , σ) проводится по формуле $X = \exp(Y)$, где Y имеет нормальное распределение с теми же параметрами. Моделирование нормальных величин описано [здесь](#).

Показательное распределение

Описание

Говорят, что случайная величина X имеет **показательное** распределение с параметром $\lambda > 0$, если она непрерывна, принимает только положительные значения, и имеет плотность распределения $f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$ при $0 < x < \infty$.

На следующем рисунке показаны графики плотности (привязан к левой вертикальной оси ординат) и функции (привязан к правой оси ординат) показательного распределения с параметром $\lambda = 1$.



Характеристики

В следующей таблице приведены формулы для вычисления характеристик показательного распределения.

<u>Плотность распределения</u>	$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$
<u>Функция распределения</u>	$F(x) = 1 - e^{-\lambda x}$
<u>Математическое ожидание</u>	$1 / \lambda$
<u>Стандартное отклонение</u>	$1 / \lambda$
<u>Дисперсия</u>	$1 / \lambda^2$
<u>Асимметрия</u>	2
<u>Острове́ршинность</u>	6
<u>Медиана</u>	$\ln(2) / \lambda$
<u>Мода</u>	0

Моделирование

Моделирование значений случайной величины с показательным распределением (с параметром λ) проводится по формуле $-(\ln U) / \lambda$, где U имеет равномерное распределение на отрезке $[0,1]$. Моделирование равномерных случайных величин описано [здесь](#).

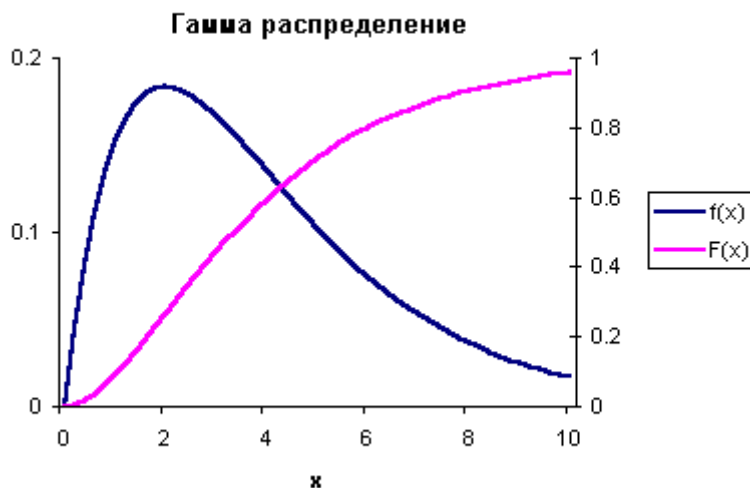
Гамма распределение

Описание

Говорят, что случайная величина X имеет **гамма** распределение с параметрами $\alpha > 0$, $\beta > 0$, если она непрерывна, принимает только положительные значения, и имеет плотность распределения

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}$$

На следующем рисунке показаны графики плотности (привязан к левой вертикальной оси ординат) и функции (привязан к правой оси ординат) гамма распределения с параметрами $\alpha = 2$, $\beta = 2$.



Характеристики

В следующей таблице приведены формулы для вычисления характеристик гамма распределения.

<u>Плотность распределения</u>	$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}$
<u>Функция распределения*</u>	$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt$
<u>Математическое ожидание</u>	$\alpha\beta$
<u>Стандартное отклонение</u>	$\sqrt{\alpha\beta}$
<u>Дисперсия</u>	$\alpha\beta^2$
<u>Асимметрия</u>	$2/\sqrt{\alpha}$

* Функция гамма распределения через элементарные функции не выражается.

Моделирование

Моделирование значений случайной величины с гамма распределением (с параметрами α , β) при

целых значениях $\alpha > 0$ проводится по формуле $\sum_{k=1}^{\alpha} P_k$, где $P_k, k = 1, \dots, \alpha$ - независимые реализации показательных случайных величин с параметром $1/\beta$.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебно-методическому
комплексу
С.А. Упоров



Методические указания к выполнению практических занятий по курсу

МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ

Применение методов математической статистики

Специальность

21.05.03 Технология геологической разведки

форма обучения: очная, заочная

Автор: Глушкова Т.А., к.т.н.

Одобен на заседании кафедры

Геофизики

(название кафедры)

Зав.кафедрой

(подпись)

Талалай А. Г.

(Фамилия И.О.)

Протокол № 1 от 05.10. 2020

(Дата)

Рассмотрен методической комиссией
факультета

(название факультета)

Председатель

(подпись)

Бондарев В. И.

(Фамилия И.О.)

Протокол № 2 от 13.10. 2020

(Дата)

Екатеринбург
2020

При обработке *результатов физических измерений или химических анализов* большое значение имеет анализ содержащихся в них различного рода погрешностей. Для научно - исследовательских работ характерен небольшой объем измерений, из - за чего затрудняется их статистическая обработка. Знание *методов математической статистики* помогает выявлять закономерности, зависимости. Эти методы позволяют грамотно оценивать результаты своей работы, определять "степень доверия" полученным данным.

В методических указаниях приведены термины, схемы и примеры статистической обработки. Необходимые математические основы и приемы просты, не требуют от экспериментатора специальной подготовки. Для проведения анализа данных не нужно применения сложной вычислительной техники – достаточно калькулятора. Этот анализ не занимает много времени и его желательно проводить при обработке каждой серии экспериментальных данных.

1 Метрология – наука об измерениях

В практической жизни человек всюду имеет дело с измерениями. На каждом шагу встречаются измерения таких величин, как длина, объем, вес, время и др.

Измерения являются одним из важнейших путей познания природы человеком. Они дают количественную характеристику окружающего мира, раскрывая человеку действующие в природе закономерности. Все отрасли техники не могли бы существовать без развернутой системы измерений, определяющих как все технологические процессы, контроль и управление ими, так и свойства и качество выпускаемой продукции.

Отраслью науки, изучающей измерения, является *метрология*.

Метрология в ее современном понимании – наука об измерениях, методах, средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Единство измерений – такое состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах и погрешности измерений известны с заданной вероятностью. Единство измерений необходимо для того, чтобы можно было сопоставить результаты измерений, выполненных в разных местах, в разное время, с использованием разных методов и средств измерений.

Точность измерений характеризуется близостью их результатов к истинному значению измеряемой величины.

Таким образом, важнейшей задачей метрологии является усовершенствование эталонов, разработка новых методов точных измерений, обеспечение единства и необходимой точности измерений.

Измерение является важнейшим понятием в метрологии.

Существует несколько видов измерений. При их классификации обычно исходят из характера зависимости измеряемой величины от времени, вида уравнения измерений, условий, определяющих точность результата измерений и способов выражения этих результатов.

По характеру зависимости измеряемой величины от времени измерения разделяются на

- *статические*, при которых измеряемая величина остается постоянной во времени;
- *динамические*, в процессе которых измеряемая величина изменяется и является непостоянной во времени.

Статическими измерениями являются, например, измерения размеров тела, постоянного давления, динамическими – измерения пульсирующих давлений, вибраций.

По способу получения результатов измерений их разделяют на

- прямые;
- косвенные;
- совокупные;
- совместные.

2 Термины и определения

Термины и определения в соответствии с РМГ 29-99 ГСИ Метрология. Основные термины и определения:

2.1 погрешность результата измерения:

Отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой величины.

Примечания

1 На практике используют действительное значение величины x_d , в результате чего погрешность измерения $\Delta x_{изм}$ определяют по формуле

$$\Delta x_{изм} = x_{изм} - x_d, \quad (2.1)$$

где $x_{изм}$ - измеренное значение величины.

2 Синонимом термина *погрешность измерения* является термин *ошибка измерения*, применять который не рекомендуется как менее удачный.

2.2 систематическая погрешность измерения:

Составляющая погрешности результата измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же физической величины.

Примечание – В зависимости от характера измерения систематические погрешности подразделяют на *постоянные, прогрессивные, периодические* и *погрешности, изменяющиеся по сложному закону*.

Постоянные погрешности – погрешности, которые длительное время сохраняют свое значение, например, в течение времени выполнения всего ряда измерений. Они встречаются наиболее часто.

Прогрессивные погрешности – непрерывно возрастающие или убывающие погрешности. К ним относятся, например, погрешности вследствие износа измерительных наконечников, контактирующих с деталью при контроле ее прибором активного контроля.

Периодические погрешности – погрешности, значение которых является периодической функцией времени или перемещения указателя измерительного прибора.

Погрешности, изменяющиеся по сложному закону, происходят вследствие совместного действия нескольких систематических погрешностей

2.3 неисключенная систематическая погрешность;

Составляющая погрешности результата измерений, обусловленная погрешностями вычисления и введения поправок на влияние систематических погрешностей или систематической погрешностью, поправка на действие которой не введена вследствие ее малости.

Примечания

1 Иногда этот вид погрешности называют *неисключенный (ные) остаток (остатки) систематической погрешности*.

2 Неисключенная систематическая погрешность характеризуется ее границами.

Границы неисключенной систематической погрешности Θ при числе слагаемых $N \leq 3$ вычисляют по формуле

$$\Theta = \pm \sum_{i=1}^N |\Theta_i|, \quad (2.2)$$

где Θ_i - граница i -й составляющей неисключенной систематической погрешности.

3 При числе неисключенных систематических погрешностей $N \geq 4$ вычисления проводят по формуле

$$\Theta = \pm K \sqrt{\sum_{i=1}^N \Theta_i^2}, \quad (2.3)$$

где K - коэффициент зависимости отдельных неисключенных систематических погрешностей от выбранной доверительной вероятности P при их равномерном распределении (при $P=0,99$, $K=1,4$). Здесь Θ рассматривается как доверительная квазислучайная погрешность

2.4 случайная погрешность измерения:

Составляющая погрешности результата измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) при повторных измерениях, проведенных с одинаковой тщательностью, одной и той же физической величины

2.5 абсолютная погрешность измерения:

Погрешность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины

2.6 относительная погрешность измерения:

Погрешность измерения, выраженная отношением абсолютной погрешности измерения к действительному или измеренному значению измеряемой величины.

Примечание – Относительную погрешность в долях или процентах находят из отношений

$$\delta = \frac{\Delta x}{x}, \text{ или } \delta = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\%, \quad (2.4)$$

где Δx - абсолютная погрешность измерений;

x - действительное или измеренное значение величины

2.7 средняя квадратическая погрешность (отклонение) результатов единичных измерений в ряду измерений:

Оценка S рассеяния единичных результатов измерений в ряду равноточных измерений одной и той же физической величины около среднего их значения, вычисляемая по формуле

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (2.5)$$

где x_i - результат i -го единичного измерения;

$\bar{x}$ - среднее арифметическое значение измеряемой величины из n единичных результатов.

Примечание - –а практике широко распространен термин *среднее квадратическое отклонение* - –СКО).

2.8 средняя квадратическая погрешность результата измерений среднего арифметического;

Оценка $S_{\bar{x}}$ случайной погрешности среднего арифметического значения результата измерений одной и той же величины в данном ряду измерений, вычисляемая по формуле

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}, \quad (2.6)$$

где S - средняя квадратическая погрешность результатов единичных измерений, полученная из ряда равноточных измерений; n - число единичных измерений в ряду

2.9 доверительные границы погрешности результата измерений:

Наибольшее и наименьшее значения погрешности измерений, ограничивающие интервал, внутри которого с заданной вероятностью находится искомое (истинное) значение погрешности результата измерений.

Примечания

1 Доверительные границы в случае нормального закона распределения вычисляются как $\pm tS$, $\pm tS_{\bar{x}}$, где S , $S_{\bar{x}}$ - средние квадратические погрешности, соответственно, единичного и среднего арифметического результатов измерений; t - коэффициент, зависящий от доверительной вероятности P и числа измерений n .

2 При симметричных границах термин может применяться в единственном числе - *доверительная граница*.

3 Иногда вместо термина *доверительная граница* применяют термин *доверительная погрешность* или *погрешность при данной доверительной вероятности*

2.10 поправка:

Значение величины, вводимое в неисправленный результат измерения с целью исключения составляющих систематической погрешности.

Примечание - знак поправки противоположен знаку погрешности. Поправку, прибавляемую к номинальному значению меры, называют *поправкой к значению меры*; поправку, вводимую в показание измерительного прибора, называют *поправкой к показанию прибора*

2.11 точность результата измерений:

Одна из характеристик качества измерения, отражающая близость к нулю погрешности результата измерения.

Примечание - читают, что чем меньше погрешность измерения, тем больше его точность

2.12 промах:

Погрешность результата отдельного измерения, входящего в ряд измерений, которая для данных условий резко отличается от остальных результатов этого ряда.

Примечание - иногда вместо термина "промах" применяют термин *грубая погрешность измерений*

2.13 предельная погрешность измерения в ряду измерений:

Максимальная погрешность измерения (плюс, минус), допускаемая для данной измерительной задачи.

Примечание - о многих случаях погрешность $3S$ принимают за предельную, то есть $\Delta_{\text{пр}} = \pm 3S$. При необходимости за предельную погрешность может быть принято и другое значение погрешности (где S - см. термин 9.14)

2.14 погрешность результата однократного измерения:

Погрешность одного измерения (не входящего в ряд измерений), оцениваемая на основании известных погрешностей средства и метода измерений в данных условиях (измерений).

Пример - при однократном измерении микрометром какого-либо размера детали получено значение величины, равное 12,55 мм. При этом еще до измерения известно, что погрешность микрометра в данном диапазоне составляет $\pm 0,01$ мм, и погрешность метода (непосредственной оценки) в данном случае принята равной нулю. Следовательно, погрешность полученного результата будет равна $\pm 0,01$ мм в данных условиях измерений

2.15 суммарная средняя квадратическая погрешность результата измерений:

Погрешность результата измерений (состоящая из суммы случайных и неисключенных систематических погрешностей, принимаемых за случайные), вычисляемая по формуле

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S^2 + S_{\Theta}^2}, \quad (2.7)$$

где $S_{\Theta} = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_i \Theta_i^2}$ - средняя квадратическая погрешность суммы неисключенных систематических погрешностей при равномерном распределении (принимаемых за случайные).

Примечание - доверительные границы суммарной погрешности $(\Delta x)_{\Sigma}$ могут быть вычислены по формуле

$$(\Delta x)_{\Sigma} = \pm t_{\Sigma} S_{\Sigma}, \quad (2.8)$$

где $t_{\Sigma} = \frac{\Theta + t \cdot S_{\bar{x}}}{S_{\Theta} + S_{\bar{x}}}$; Θ - граница суммы неисключенных систематических погрешностей результата измерений, вычисляемая по формулам (2.2) или (2.3); $t \cdot S_{\bar{x}}$ - доверительная граница погрешности результата измерений по 2.9

3 Нормальное распределение. Параметры нормального распределения

При хорошо отлаженной методике мы имеем дело со случайными погрешностями, величины которых больше систематических. Таким образом, проводя многократные замеры, мы получаем набор значений измеряемой величины. Какое же из этих полученных значений мы должны считать наиболее близким к истинному? За наиболее вероятное значение измеряемой величины принимают ее среднее арифметическое значение, вычисленное из всего ряда измеренных значений по формуле:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.1)$$

Положение о наибольшей вероятности среднеарифметической величины справедливо, если выполняется так называемый *нормальный закон распределения случайных погрешностей* (для большинства простых измерений он выполняется достаточно хорошо, и мы будем пользоваться нормальным распределением).

Важнейшим параметром нормального распределения случайных погрешностей является дисперсия σ^2 , которая является характеристикой рассеяния их относительно нуля.

$$\sigma^2(x) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (3.2)$$

Удобнее пользоваться для характеристики рассеяния значением квадратного корня из дисперсии, т.е. *среднеквадратическим отклонением погрешности*:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3.3)$$

При увеличении числа замеров величина S стремится к некоторому пределу σ , квадрат которого называется *дисперсией* и является одной из основных численных характеристик распределения.

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x - X_1)^2 + \dots + (x - X_n)^2}{n-1}} \quad (3.4)$$

Одна из задач статистической обработки выборки заключается в численном определении среднего арифметического и дисперсии. При обработке экспериментальных данных систему наблюдений над некоторой случайной величиной (результаты измерений распределяются по закону нормального распределения случайных величин) принято рассматривать как случайную выборку из некоторой гипотетической генеральной совокупности, которая представляет собой совокупность всех мыслимых наблюдений над случайной величиной при данных условиях эксперимента. Задача статистического анализа состоит в том, чтобы оценить параметры генеральной совокупности по результатам данной случайной выборки с учетом того элемента неопределенности, который вносится ограниченностью экспериментального материала. В математической статистике принято разделять выборочные параметры и параметры генеральной совокупности. Параметрам генеральной совокупности соответствуют следующие выборочные параметры (таблица 1).

Таблица 1 Соответствие параметров генеральной совокупности и выборочных параметров

Генеральная совокупность	Выборка
μ	$\bar{X}$
σ	S_x
σ^2	S_x^2

Параметры выборки $\bar{X}$, S_x , S_x^2 при увеличении объема выборки ($n \rightarrow \infty$) приближаются к параметрам генеральной совокупности:

$$\lim \bar{X} = \mu, \lim S_x = \sigma, \lim S_x^2 = \sigma^2,$$

где μ - математическое ожидание (среднее арифметическое, генеральное среднее),
 σ - генеральное среднеквадратическое отклонение (стандартное отклонение, стандарт),
 σ^2 - генеральная дисперсия (теоретическая дисперсия).

Этим основным параметрам генеральной совокупности соответствуют выборочные параметры:

- $\bar{X}$ - выборочное среднее (среднее выборки),
- S_x - среднеквадратическая погрешность выборки,
- S_x^2 - выборочная дисперсия.

Следует отметить, что объем генеральной совокупности может быть ограничен каким - то большим, но конечным числом.

Практически мы всегда имеем дело с выборками. Выборкой может быть определенное число реальных объектов (зерен минерала, образцов пород, шлифов) или измерений, наблюдений. Количество объектов выборки обозначают n . Как уже упоминалось, цель статистической обработки - оценка параметров генеральной совокупности по данным выборки. Эти n объектов выборки подвергаются детальному изучению, по результатам которого рассчитывают характеристики (выборочные параметры); они являются приближенной оценкой истинных характеристик всей реальной совокупности объектов (всей генеральной совокупности).

4 Случайная погрешность: интервальная оценка

Вклад случайной погрешности в общую неопределенность результата измерения можно оценить с помощью методов теории вероятностей и математической статистики.

Ввиду наличия случайной погрешности одна и та же величина x при каждом последующем измерении приобретает новое, непрогнозируемое значение. Такие величины называются *случайными*. Случайными величинами являются не только отдельные результаты измерений x_i , но и средние $\bar{x}$ (а также дисперсии $s^2(x)$ и все производные от них величины). Поэтому $\bar{x}$ может служить лишь *приближенной* оценкой результата измерения. В то же время, используя величины $\bar{x}$ и $s^2(x)$, возможно оценить *диапазон* значений, в котором с заданной вероятностью P может находиться результат. Эта вероятность P называется *доверительной вероятностью*, а соответствующий ей интервал значений - *доверительным интервалом*.

Строгий расчет границ доверительного интервала случайной величины возможен лишь в предположении, что эта величина подчиняется некоторому известному *закону распределения*. Закон распределения случайной величины - одно из фундаментальных понятий теории вероятностей. Он характеризует относительную долю (частоту, вероятность появления) тех или иных значений случайной величины при ее многократном воспроизведении. Математическим выражением закона распределения случайной величины служит ее *функция распределения* (функция плотности вероятности) $p(x)$. Например, функция распределения, изображенная на рисунке 1, означает, что для соответствующей ей случайной величины x наиболее часто встречаются значения вблизи $x=10$, а большие и меньшие значения встречаются тем реже, чем дальше они отстоят от 10.

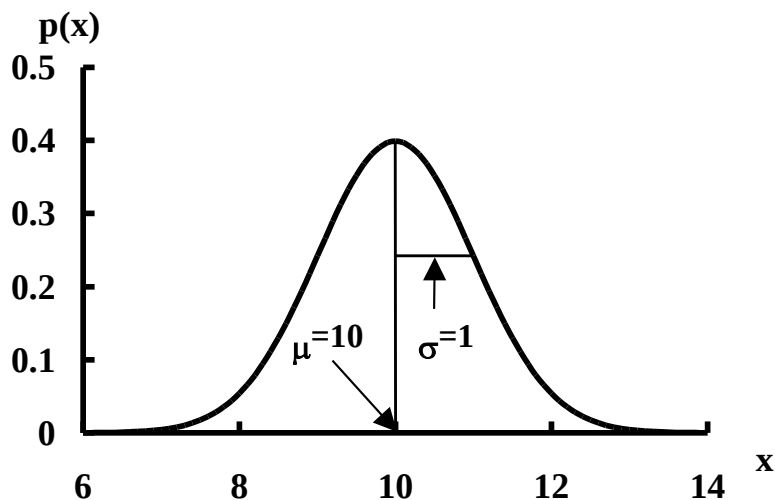


Рисунок 1 Функция плотности вероятности $p(x)$

В качестве примера не случайно приведена колоколообразная, симметричная функция распределения. Именно такой ее вид наиболее характерен для результатов химического анализа. В большинстве случаев закон распределения результатов химического анализа можно удовлетворительно аппроксимировать так называемой *функцией нормального* (или *гауссова*) *распределения*:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.1)$$

Параметры этой функции μ и σ характеризуют: μ - положение максимума кривой, т.е. собственно *значение* результата анализа, а σ - ширину "колокола", т.е. *воспроизводимость* результатов. Можно показать, что среднее $\bar{x}$ является приближенным значением μ , а стандартное отклонение $s(x)$ - приближенным значением σ . Естественно, эти приближения тем точнее, чем больше объем экспериментальных данных, из которых они рассчитаны, т.е. чем больше число параллельных измерений n и, соответственно, число степеней свободы f .

В предположении подчинения случайной величины x нормальному закону распределения ее доверительный интервал рассчитывается как

$$x \pm t(P, f)s(x) \quad (4.2)$$

Ширина доверительного интервала нормально распределенной случайной величины пропорциональна величине ее стандартного отклонения. Численные значения коэффициентов пропорциональности t были впервые рассчитаны английским математиком В.Госсетом, подписывавшим свои труды псевдонимом Стьюдент, и потому называются *коэффициентами Стьюдента*. Они зависят от двух параметров: доверительной вероятности P и числа степеней свободы f , соответствующего стандартному отклонению $s(x)$.

Причина зависимости t от P очевидна: чем выше доверительная вероятность, тем шире должен быть доверительный интервал с тем, чтобы можно было гарантировать попадание в него значения величины x . Поэтому с ростом P значения t возрастают. Зависимость t от f объясняется следующим образом. Поскольку $s(x)$ - величина случайная, то в силу случайных причин ее значение может оказаться заниженным. В этом случае и доверительный интервал окажется более узким, и попадание в него значения величины x уже не может быть гарантировано с заданной доверительной вероятностью. Чтобы "подстраховаться" от подобных неприятностей, следует расширить доверительный интервал, увеличить значение t - тем больше, чем менее надежно известно значение s , т.е. чем меньше число его степеней свободы. Поэтому с уменьшением f величины t возрастают.

Коэффициенты Стьюдента для различных значений P и f приведены в табл. 1 (приложение). Проанализируйте ее и обратите внимание на отмеченные закономерности в изменении величин t в зависимости от P и f .

Если единичные значения x имеют нормальное распределение, то и среднее $\bar{x}$ тоже имеет нормальное распределение. Поэтому формулу Стьюдента для расчета доверительного интервала можно записать и для среднего:

$$\bar{x} \pm t(P, f)s(\bar{x}) \quad (4.3)$$

Величина $s(\bar{x})$ меньше, чем $s(x)$ (среднее точнее единичного). Можно показать (с. 27), что для серии из n значений $s(\bar{x}) = s(x) / \sqrt{n}$. Поэтому доверительный интервал для величины, рассчитанной из серии n параллельных измерений, можно записать как

$$\bar{x} \pm \frac{t(P, f)s(x)}{\sqrt{n}} \quad (4.4)$$

где $f=n-1$, а величины $\bar{x}$ и $s(x)$ рассчитывают по формулам (9) и (11).

Пример 1. Для серии значений объемов титранта, равных 9.22, 9.26, 9.24 и 9.27 см³, рассчитать среднее и доверительный интервал среднего при $P=0.95$.

Решение. Среднее значение равно $\bar{x} = \frac{9.22 + 9.26 + 9.24 + 9.27}{4} = 9.248$ см³.

Стандартное отклонение равно

$$s(x) = \sqrt{\frac{(9.22 - 9.248)^2 + (9.26 - 9.248)^2 + (9.24 - 9.248)^2 + (9.27 - 9.248)^2}{4 - 1}} = 0.0222 \text{ см}^3.$$

Табличное значение коэффициента Стьюдента $t(P=0.95, f=3)=3.18$.

Доверительный интервал составляет

$$9.248 \pm \frac{3.18 \cdot 0.0222}{\sqrt{4}} = 9.248 \pm 0.035 = 9.25 \pm 0.04 \text{ см}^3.$$

Полученный результат округляем так, чтобы полуширина доверительного интервала содержала только *одну* значащую цифру.

При расчете доверительного интервала встает вопрос о выборе доверительной вероятности P . При слишком малых значениях P выводы становятся недостаточно надежными. Слишком большие (близкие к 1) значения брать тоже нецелесообразно, так как в этом случае доверительные интервалы оказываются слишком широкими, малоинформативными. Для большинства химико-аналитических задач оптимальным значением P является 0.95. Именно эту величину доверительной вероятности (за исключением специально оговоренных случаев) мы и будем использовать в дальнейшем.

Подчеркнем еще раз, что величина доверительного интервала сама по себе позволяет охарактеризовать лишь *случайную* составляющую неопределенности. Оценка систематической составляющей представляет собой самостоятельную задачу.

5 Сравнение результатов анализов. Значимое и незначимое различие случайных величин

Вспомним еще раз, что любой результат измерения (в том числе среднее значение) представляет собой, вообще говоря, случайную величину. Поэтому численное различие двух результатов может быть вызвано случайными причинами и вовсе не свидетельствовать о том, что эти результаты действительно разные. Так, если результаты титрования двух аликвот равны, к примеру, 9.22 и 9.26 см³, то из этого нельзя заключить, что они имеют разный состав, поскольку случайная погрешность измерения объемов титранта составляет несколько сотых миллилитра (см. пример 1 на с. 13).

Подобное различие случайных величин, которое (при некоторой доверительной вероятности) может быть обусловлено только случайными причинами, в математической статистике называется *незначимым*. Очевидно, что если две величины различаются незначимо, то их можно рассматривать как два приближенных значения одного и того же, общего, результата измерения. Напротив, *значимое*, т.е. превышающее уровень случайных погрешностей, различие свидетельствует о том, что соответствующие величины представляют собой два действительно разных результата. Естественно, различие можно считать значимым только тогда, когда оно достаточно велико. Граница, отделяющая значимые различия от незначимых, называется *критической величиной*. Ее можно рассчитать с помощью методов теории вероятностей.

Таким образом, задача сравнения результатов химического анализа состоит в том, чтобы выяснить, *является ли различие между ними значимым*. Сравнить данные химического состава (и, шире, - любые экспериментальные данные) по обычным арифметическим правилам недопустимо! Вместо этого следует применять специальные приемы, называемые *статистическими тестами* или *критериями проверки статистических гипотез*. С некоторыми простейшими - и в то же время наиболее важными для химика-аналитика статистическими тестами - мы сейчас познакомимся.

6 Сравнение среднего и константы: простой тест (критерий) Стьюдента

Вернемся к задаче проверки правильности результата химического анализа путем сравнения его с независимыми данными. Проверяемый результат, являясь средним из нескольких параллельных определений, представляет собой случайную величину $\bar{x}$. Результат же, используемый для сравнения, в ряде случаев можно считать точной (действительной) величиной a , т.е. константой. Это может быть тогда, когда случайная погрешность результата, используемого для сравнения, намного меньше, чем проверяемого, т.е. пренебрежимо мала. Например, в способе "введено-найденно" заданное содержание определяемого компонента обычно известно значительно точнее, чем найденное. Аналогично, при использовании СО паспортное значение содержания также можно считать точной величиной. Наконец, и при анализе образца независимым методом содержание компонента может быть определено с точностью, намного превышающей точность проверяемой методики - например, при проверке атомно-эмиссионной методики с помощью гравиметрической (о типичных величинах случайной погрешности различных методов см. с. 9). Во всех этих случаях задача сравнения данных с математической точки зрения сводится к проверке *значимости* отличия случайной величины $\bar{x}$ от константы a .

Для решения этой задачи можно использовать уже известный нам подход, описанный выше (с. 10) и основанный на интервальной оценке неопределенности величины $\bar{x}$. Доверительный интервал для среднего, рассчитанный по формуле Стьюдента (16), характеризует неопределенность значения $\bar{x}$, обусловленную его случайной погрешностью. Поэтому если величина a входит в этот доверительный интервал, утверждать о значимом различии между $\bar{x}$ и a нет оснований. Если же величина a в этот интервал не входит, различие между $\bar{x}$ и a следует считать значимым. Таким образом, полуширина доверительного интервала, равная $\frac{t(P, f)s(x)}{\sqrt{n}}$, является критической величиной для разности $|\bar{x} - a|$: различие является значимым, если

$$|\bar{x} - a| > \frac{t(P, f)s(x)}{\sqrt{n}} \quad (6.1)$$

Для проверки значимости различия между средним и константой вместо вычисления доверительного интервала можно поступить следующим образом. Легко видеть, что выражение (17) эквивалентно выражению

$$\frac{|\bar{x} - a|}{s(x)} \sqrt{n} > t(P, f) \quad (6.2)$$

Величина, стоящая в левой части выражения (18), характеризует степень различия между $\bar{x}$ и a с учетом случайной погрешности $s(x)$. Она называется *тестовой статистикой* (и в общем случае обозначается в дальнейшем как ξ) для сравниваемых значений. Коэффициент Стьюдента, стоящий в правой части (18), в этом случае непосредственно является критической величиной. Поэтому для проверки значимости различия между $\bar{x}$ и a можно вычислить соответствующую тестовую статистику и сравнить ее с критическим значением - в данном случае табличным значением коэффициента Стьюдента. Если тестовая статистика превосходит критическое значение, различие между сравниваемыми величинами следует признать значимым.

Описанный способ сравнения случайных величин - вычисление тестовой статистики и сравнение ее с табличным критическим значением - является весьма общим. На таком принципе основано множество *статистических тестов* (или *критериев*) - процедур, призванных установить значимость различия между теми или иными случайными величинами. Тест, представленный формулой (18) и предназначенный для сравнения среднего значения и константы, называется *простым тестом Стьюдента*. В химическом анализе его следует применять всегда, когда возникает задача сравнения результатов анализа с каким-либо значением, которое можно считать точной величиной.

Пример 2. При определении никеля в стандартном образце сплава получена серия значений (% масс.) 12.11, 12.44, 12.32, 12.28, 12.42. Содержание никеля согласно паспорту образца - 12.38 %. Содержит ли использованная методика систематическую погрешность?

Решение. Паспортное содержание никеля считаем действительным (точным) значением и применяем простой тест Стьюдента. Имеем:

$$\bar{x} = 12.314, s(x) = 0.132, n = 5, f = 4, a = 12.38.$$

$$\xi = \frac{|\bar{x} - a|}{s(x)} \sqrt{n} = \frac{12.38 - 12.314}{0.132} \sqrt{5} = 1.12 < t(P = 0.95, f = 4) = 2.78$$

Отличие результата анализа от действительного значения незначимо, методика не содержит систематической погрешности.

7 Сравнение двух средних. Критерий Стьюдента

При интерпретации результатов химического анализа возникают и более сложные задачи. Предположим, необходимо сравнить два результата анализа одного и того же образца, полученные разными методами, и при этом оба результата содержат сравнимые между собой случайные погрешности. В этом случае уже нельзя ни один из результатов считать точной величиной и, соответственно, применять простой тест Стьюдента. Математически задача сводится в этом случае к установлению значимости различия между двумя средними значениями $\bar{x}_1$ и $\bar{x}_2$.

Для решения этой задачи используют *модифицированный тест Стьюдента*. Он существует в двух вариантах: точном и приближенном. Точный вариант применяют тогда, когда дисперсии соответствующих величин $s_1^2 = s^2(x_1)$ и $s_2^2 = s^2(x_2)$ различаются незначимо (что, в свою очередь, необходимо предварительно проверить с помощью еще одного статистического теста - теста Фишера, см. следующий раздел). При значимом различии s_1^2 и s_2^2 применяют приближенный вариант (приближение Уэлча).

В точном варианте модифицированного теста Стьюдента тестовая статистика вычисляется как

$$\xi = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\bar{s}(x)} \sqrt{\frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2}} \quad (7.1)$$

Как видим, по способу вычисления она весьма похожа на тестовую статистику простого теста Стьюдента (см. формулу (18)). В выражении (19) n_1 и n_2 - числа параллельных значений, из которых рассчитаны величины $\bar{x}_1$ и $\bar{x}_2$, соответственно, а $\bar{s}(x)$ - *среднее стандартное отклонение*, вычисляемое как

$$\bar{s}(x) = \sqrt{\bar{s}^2(x)} = \sqrt{\frac{f_1 s_1^2 + f_2 s_2^2}{f_1 + f_2}} \quad (7.2)$$

Величины f_1 и f_2 - числа степеней свободы соответствующих дисперсий, равные n_1-1 и n_2-1 . Критическим значением служит коэффициент Стьюдента $t(P, f)$ для выбранной доверительной вероятности P (обычно 0.95) и числа степеней свободы

$$f = f_1 + f_2 = n_1 + n_2 - 2 \quad (7.3)$$

Таким образом, значимое различие между $\bar{x}_1$ и $\bar{x}_2$ имеет место тогда, когда

$$\frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\bar{s}(x)} \sqrt{\frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2}} > t(P, f = n_1 + n_2 - 2) \quad (7.4)$$

В приближении Уэлча тестовая статистика вычисляется следующим образом:

$$\xi = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (7.5)$$

Критическим значением вновь служит коэффициент Стьюдента $t(P, f)$. Число степеней свободы в этом случае вычисляется как

$$f = \frac{(s_1^2 / n_1 + s_2^2 / n_2)^2}{\frac{(s_1^2 / n_1)^2}{n_1 - 1} + \frac{(s_2^2 / n_2)^2}{n_2 - 1}} \quad (7.6)$$

и округляется до ближайшего целого числа. Приближенный вариант теста Стьюдента недостаточно достоверен, особенно при малых значениях f_1 и f_2 .

8 Сравнение дисперсий двух серий данных. Критерий Фишера

Для выбора между точным и приближенным вариантом модифицированного теста Стьюдента необходимо предварительно установить, есть ли значимое различие между величинами s_1^2 и s_2^2 , т.е. дисперсий обеих серий данных. Разумеется, задача сравнения дисперсий имеет и вполне самостоятельное значение.

Как и средние $\bar{x}$, дисперсии s^2 тоже представляют собой случайные величины. Поэтому и их сравнение тоже нужно производить с использованием соответствующих статистических тестов. Тест для сравнения двух дисперсий был предложен английским биологом Р.Фишером и носит его имя.

В тесте Фишера тестовой статистикой служит отношение большей дисперсии к меньшей:

$$\xi = \frac{s_1^2}{s_2^2} \quad (8.1)$$

Подчеркнем, что необходимо, чтобы $s_1^2 \geq s_2^2$ и, соответственно, $\xi \geq 1$, в противном случае индексы следует поменять местами. Критическим значением служит специальный коэффициент Фишера $F(P, f_1, f_2)$, зависящий от трех параметров - доверительной вероятности P и чисел степеней свободы f_1 и f_2 дисперсий s_1^2 и s_2^2 , соответственно. Значения коэффициентов Фишера для стандартной доверительной вероятности $P=0.95$ приведены в табл. 2 (приложение). Обратите внимание, что $F(f_1, f_2) \neq F(f_2, f_1)$, поэтому при пользовании этой таблицей надо быть очень внимательными.

Если отношение дисперсий (25) меньше, чем соответствующее значение $F(P, f_1, f_2)$, это означает, что различие между s_1^2 и s_2^2 незначимо - дисперсия обеих серий одинакова, - или, как говорят, "дисперсии однородны". В этом случае можно вычислить *среднюю дисперсию* $\bar{s}^2$ по формуле (20) и пользоваться ею как общей характеристикой дисперсий обеих серий. Число степеней свободы этой дисперсии равно $f_1 + f_2$. Если же дисперсии неоднородны, вычисление средней дисперсии, очевидно, лишено смысла.

Еще раз обратим внимание, что тест Фишера предназначен для сравнения только дисперсий результатов, но никак не самих результатов (т.е. средних). Делать какие-либо выводы о различии средних значений, наличии в той или иной серии данных систематической погрешности, различиях в составе образцов и т.д. на основании теста Фишера недопустимо. Для сравнения средних значений после теста Фишера следует применять тест Стьюдента (в той или иной его разновидности).

Пример 3. Примесь тиофена в бензоле (% массовой доли) определяли спектрофотометрическим (1) и хроматографическим (2) методами. Получили следующие серии данных:

(1) 0.12 0.19 0.16 0.14

(2) 0.18 0.32 0.24 0.25 0.28

Известно, что хроматографическая методика не содержит систематической погрешности. Содержит ли систематическую погрешность спектрофотометрическая методика?

Решение. Вычислим средние и дисперсии для обеих серий:

(1) $\bar{x} = 0.153$, $s_1^2 = 8.91 \cdot 10^{-4}$, $n_1=4$, $f_1=3$

(2) $\bar{x} = 0.254$, $s_2^2 = 2.68 \cdot 10^{-3}$, $n_2=5$, $f_2=4$

Сравним дисперсии серий по тесту Фишера:

$\xi = s_2^2 / s_1^2 = 3.0$ (делим большую дисперсию на меньшую!)

Критическое значение $F(0.95, 4, 3) = 9.1$ (не $F(0.95, 3, 4) = 6.6!$)

$\xi < F$, дисперсии данных одинаковы. Поэтому вычисляем среднее стандартное отклонение и применяем точный вариант теста Стьюдента:

$$\bar{s}(x) = \sqrt{\frac{3 \cdot 8.91 \cdot 10^{-4} + 4 \cdot 2.68 \cdot 10^{-3}}{3 + 4}} = 0.0437$$

$$\xi = \frac{0.254 - 0.153}{0.0437} \sqrt{\frac{4 \cdot 5}{4 + 5}} = 3.27 \quad t(P=0.95, f=7) = 2.37$$

$\xi > t$, средние различаются значимо, спектрофотометрическая методика содержит систематическую погрешность (отрицательную).

Пример 4. В образце сплава определили медь спектрографическим атомно-эмиссионным (1) и титриметрическим (2) методами. Получены следующие результаты (% массовой доли).

(1) 12.1 14.1 13.6 14.8

(2) 13.40 13.75 13.65 13.58 13.60 13.45

Известно, что титриметрическая методика не содержит систематической погрешности. Содержит ли систематическую погрешность атомно-эмиссионная методика?

Решение. Вычислим средние и дисперсии для обеих серий:

$$(1) \bar{x} = 13.65, s_1^2 = 1.31, n_1=4, f_1=3$$

$$(2) \bar{x} = 13.57, s_2^2 = 1.66 \cdot 10^{-2}, n_2=6, f_2=5$$

Сравним дисперсии данных по тесту Фишера:

$$\xi = s_1^2 / s_2^2 = 78.8$$

Критическое значение $F(0.95, 3, 5) = 5.4$. $\xi > F$, дисперсии данных различаются. Для сравнения средних значений применяем приближенный тест Стьюдента-Уэлча:

$$\xi = \frac{13.65 - 13.57}{\sqrt{\frac{1.31}{4} + \frac{1.66 \cdot 10^{-2}}{6}}} = 0.14, \quad f = \frac{(1.31/4 + 1.66 \cdot 10^{-2}/6)^2}{\frac{(1.31/4)^2}{3} + \frac{(1.66 \cdot 10^{-2}/6)^2}{5}} = 3.05 \sim 3,$$

$t(P=0.95, f=3) = 3.18$. $\xi < t$, значимое различие между средними и систематическая погрешность атомно-эмиссионной методики отсутствуют.

Поскольку случайная погрешность титриметрических данных намного меньше, чем атомно-эмиссионных, можно значение 13.57 считать точной величиной и применить простой тест Стьюдента:

$$\xi = \frac{13.65 - 13.57}{\sqrt{1.31}} \sqrt{4} = 0.14 < t(P=0.95, f=3) = 3.18$$

И в этом случае также делаем вывод об отсутствии систематической погрешности атомно-эмиссионной методики.

9 Выявление промахов. Q-тест

В обрабатываемой серии данных должны отсутствовать промахи (с. 9). Поэтому прежде, чем проводить любую обработку данных (начиная с вычисления среднего), следует выяснить, содержит ли она промахи, и если да, то исключить их из рассмотрения. Для выявления промахов служит еще один статистический тест, называемый Q-тестом.

Алгоритм Q-теста состоит в следующем. Серию данных упорядочивают по возрастанию: $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_{n-1} \leq x_n$. В качестве возможного промаха рассматривают одно из крайних значений x_1 или x_n - то, которое дальше отстоит от соседнего значения, т.е. для которого больше разность $x_2 - x_1$ либо, соответственно, $x_n - x_{n-1}$. Обозначим эту разность как W_1 . Размах всей серии, т.е. разность между максимальным и минимальным значением $x_n - x_1$, обозначим W_0 . Тестовой статистикой является отношение

$$\xi = \frac{W_1}{W_0} \quad (9.1)$$

Эта величина заключена в пределах от 0 до 1. Чем дальше отстоит "подозрительное" значение от основной массы данных, тем выше вероятность того, что это промах - и тем больше, в свою очередь, величина ξ . Критической величиной служит табличное значение Q-коэффициента $Q(P, n)$ (табл. 3, приложение), зависящее от доверительной вероятности и общего числа данных в серии. Если тестовая статистика превышает критическую величину ($\xi > Q$), соответствующее значение считают промахом и из серии данных исключают. После этого следует проверить на наличие промахов оставшиеся данные (с другим значением Q), поскольку промах в серии может быть не один.

При применении Q-теста вместо стандартной доверительной вероятности, равной 0.95, обычно используют значение $P=0.90$. Наиболее достоверные результаты получаются при $n=5-7$. Для серий большего или меньшего размера Q-тест недостаточно надежен.

Пример 5. При спектрофотометрическом анализе раствора органического красителя получены значения оптической плотности, равные 0.376, 0.398, 0.371, 0.366, 0.372 и 0.379. Содержит ли эта серия промахи? Чему равно среднее значение оптической плотности? Охарактеризуйте воспроизводимость измерения оптической плотности для данного образца.

Решение. Располагаем полученные результаты в порядке возрастания:

0.366 0.371 0.372 0.376 0.379 0.398

Разность 0.371-0.366 равна 0.005, а 0.398-0.379 равна 0.019, поэтому кандидат в промахи - значение 0.398, а $W_1=0.019$. Размах выборки $W_0=0.398-0.366=0.032$. Тестовая статистика равна $\xi = 0.019/0.032 = 0.59$. Критическая величина $Q(P=0.90, n=6)$ равна 0.56. Таким образом, $\xi > Q$, значение 0.398 - промах, его следует исключить.

Проверяем оставшуюся серию значений: 0.371-0.366=0.005, 0.379-0.376=0.003, поэтому следующий кандидат в промахи - 0.366. Имеем: $W_1=0.005$, $W_0=0.379-0.366=0.013$, $\xi = 0.005/0.013 = 0.38$, $Q(P=0.90, n=5)=0.64$. $\xi < Q$, значение 0.366 промахом не является.

Среднее значение оптической плотности составляет

$$\bar{x} = \frac{0.366 + 0.371 + 0.372 + 0.376 + 0.379}{5} = 0.373$$

а его стандартное отклонение - $s(x) = 0.005$. Воспроизводимость охарактеризуем относительным стандартным отклонением (с. 9) $s_r(x)=s(x)/\bar{x} = 0.005/0.373 = 0.013$.

Обработка серии данных вместе с промахом была бы в этом случае грубой ошибкой и привела бы к серьезному искажению значений $\bar{x}$ и $s(x)$.

Приложение А (справочное)

Практическая работа 1

Среднее арифметическое. Среднеквадратическое отклонение.

Среднее арифметическое выборки - выборочное среднее - лучшая оценка генерального среднего. Поэтому при измерении какой-либо величины за результат принимается среднеарифметическое результатов отдельных замеров (после исключения систематических погрешностей). Среднее из определений (замеров) обозначается как $\bar{X}_n$:

$$\bar{X}_n = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} \quad (4.1)$$

Среднеквадратическое отклонение результатов измерения S_x - наиболее обоснованная и распространенная мера случайных погрешностей. В случае, когда имеется n единичных измерений величины X , среднеквадратическое отклонение рассчитывается по формуле:

$$S_x = \sqrt{\frac{(X_1 - \bar{X}_n)^2 + (X_2 - \bar{X}_n)^2 + \dots + (X_n - \bar{X}_n)^2}{n - 1}} \quad (4.2)$$

или

$$S_x = \sqrt{\frac{(X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_n^2) - \frac{(X_1 + X_2 + \dots + X_n)^2}{n}}{n - 1}}, \quad (4.3)$$

где n - объем выборки (число замеров), S_x - среднеквадратическое отклонение, $X_1, X_2, \dots, X_n$ - результаты замеров, $\bar{X}_n$ - выборочное среднее. Последняя формула более удобна при расчетах на калькуляторах. При вычислениях по этим двум формулам возведение в квадрат должно выполняться без округления результатов (причем точность резко уменьшается при малых n). Величина S_x называется среднеквадратичной погрешностью результатов отдельного измерения. Она имеет ту же размерность, что и переменная X . Относительная точность расчета S_x от 50 до 100 относительных %, поэтому для S_x записываются 1 - 2 значащие цифры.

Величина среднеквадратического отклонения выборки S при больших n (~ 100) может быть довольно близка к среднеквадратическому отклонению генеральной совокупности σ . При малых n значения S могут сильно отличаться от "истинного значения" σ . Поэтому желательно оценивать доверительные интервалы по следующей схеме.

- Рассчитывают среднеквадратическое отклонение S_x по приведенным формулам.
- Задают необходимую доверительную вероятность P . Обычно $P = 0.95$.

Доверительная вероятность измерений должна задаваться самим экспериментатором. Эта величина, определяющая надежность результатов. Чем более ответственны результаты, тем более высокую доверительную вероятность надо принимать. Для технических и аналитических определений (например состав фаз, параметров элементарной ячейки и

других очень точных измерений) обычно принимается доверительная вероятность 0.95. Для важных измерений (на которых базируется новый закон, новое положение или от которых зависит безопасность людей) $P = 0.99$.

3. По таблице А.1 для принятой P и n находят доверительные границы отклонения величины S_x (в долях S_x) Y_1 и Y_2 .

Таблица А.1 Коэффициенты Y_1 и Y_2 для оценки доверительных интервалов погрешностей расчета среднеквадратического отклонения.

n	P= 0.95		P= 0.90	
	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2
2	0.42	32	0.51	16
3	0.52	6.3	0.58	4.4
4	0.57	3.7	0.62	2.9
5	0.60	2.9	0.65	2.4
6	0.62	2.5	0.67	2.1
7	0.64	2.2	0.69	1.9
8	0.66	2.0	0.70	1.8
9	0.68	1.9	0.72	1.7
10	0.69	1.8	0.73	1.6
12	0.71	1.7	0.75	1.5
14	0.73	1.6	0.76	1.5
16	0.74	1.5	0.77	1.4
18	0.75	1.5	0.79	1.4
20	0.76	1.5	0.79	1.4
25	0.78	1.4	0.81	1.3
30	0.80	1.3	0.83	1.3
50	0.84	1.2	0.86	1.2
100	0.88	1.2	0.90	1.1
200	0.91	1.1	0.93	1.1

4. Находят доверительные границы отклонения S_x :

$$S_{\min} = S_x Y_1, \quad S_{\max} = S_x Y_2,$$

Полученные значения $S_{\min}$ и $S_{\max}$ означают, что с вероятностью P величина S_x лежит между ними. С учетом доверительных интервалов S_x далее рассчитываются доверительные интервалы погрешности измерения.

Рассмотрим пример. $S_x = 0.03$, $n = 3$. Оценим границы доверительных интервалов.

1. Принимаем $P=0.95$.

2. По табл. 6 для $P=0.95$ и $n = 3$ находим $Y_1 = 0.52$, $Y_2 = 6.3$.

3. $S_{\min} = 0.52 \cdot 0.03 = 0.015$, $S_{\max} = 0.19$. Так, с вероятностью 0.95 S_x может находиться в интервале от 0.015 до 0.19.

Следует помнить, что величина среднеквадратического отклонения выборки сама по себе хотя и несет некоторую информацию о параметрах выборки, но не является достаточной характеристикой. Об этом нельзя забывать и считать статистическую обработку законченной.

Пример. При определении состава синтезированного в опыте плагиоклаза получили путем замеров на микрозонде 10 значений $X_{\text{Ап}}^{\text{Pl}}$: 0.30, 0.31, 0.28, 0.29, 0.32, 0.31, 0.27, 0.29, 0.29, 0.30. Необходимо определить среднее арифметическое и среднеквадратическую ошибку (S_x) и доверительные интервалы для S_x .

1. Обозначим $X_{\text{Ап}}^{\text{Pl}}$ за X , $X_1=0.3$, $X_2=0.31$,, $X_{10}=0.30$.

2. Вычислим среднее

$$\bar{X} = \frac{X_1 + \dots + X_{10}}{10} = 0.296 \approx 0.30$$

3. Вычислим S_x

$$S_x = \sqrt{\frac{(0.30 - 0.30)^2 + (0.30 - 0.31)^2 + \dots + (0.30 - 0.30)^2}{10 - 1}} = 0.015 \approx 0.02.$$

4. Оценим границы доверительного интервала для S_x ($n = 10$, задаем $P = 0.95$), по табл. 6 находим (для $n = 10$ и $P = 0.95$) величины Y_1 и Y_2 : $Y_1 = 0.69$, $Y_2 = 1.8$, $S_{\text{мин}} = 0.02 \cdot 0.69 = 0.014 \pm 0.01$, $S_{\text{макс}} = 0.02 \cdot 1.8 = 0.036 \pm 0.04$.

5. Среднее значение $X_{\text{Ап}}^{\text{Pl}} = 0.30$; среднеквадратическая погрешность $S_x = 0.02$.

6. С вероятностью 0.95 $0.04 \geq S_x \geq 0.01$

Коэффициентом вариации результатов наблюдений (измерений) является относительная величина среднеквадратического отклонения:

$$V_x = [S_x / \bar{X}_n] 100\%.$$

Коэффициент вариации позволяет сравнивать влияние случайных погрешностей на результат измерения в разных сериях или проводимых различными методами.

Приложение Б

(справочное)

Практическая работа 2

Исключение выпадающих (анормальных) результатов измерений («промахи»)

Очень часто при замерах (определениях) какой-либо величины возникают сомнения: надо ли отбрасывать результаты замера, несколько отличающихся от всех, какова значимость такого отклонения. Может быть два варианта существования "анормальных" замеров.

1. Замер принадлежит к той же генеральной совокупности, но вероятность его появления мала. В этом случае его исключать нельзя, и расчеты среднего арифметического и среднеквадратического отклонения необходимо проводить с учетом этого замера.

2. Отклоняющийся результат - следствие погрешности в записи (промаха) и не подчиняется случайным законам отклонения от генерального среднего. В этом случае его надо отбросить.

Решение задачи об отбрасывании какого-либо значения надо проводить с большой осторожностью, предварительно проанализировав условия, в которых он получен. Может быть удастся оценить достоверность этого результата и без вероятностного подхода. В противном случае нужно воспользоваться следующими методами.

1. Среди n результатов находят $X_{\min}$ и $X_{\max}$, которые подлежат проверке.

2. Подсчитывают среднее данной выборки:

$$\bar{X} = \frac{X_{\min} + X_2 + \dots + X_{\max}}{n}.$$

3. Подсчитывают выборочное среднеквадратическое отклонение:

$$S_x = \sqrt{\frac{(X_{\min} - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + (X_{\max} - \bar{X})^2}{n - 1}}.$$

4. Находят следующие отношения:

$$U_{\max} = \frac{X_{\max} - \bar{X}}{S_x} \text{ и } U_{\min} = \frac{\bar{X} - X_{\min}}{S_x}.$$

5. Принимают необходимую доверительную вероятность (для наших целей $P=0.95$).

6. Находят величину β по табл. Б.1 при принятом значении P и выборке объема n .

7. $U_{\max}$ и $U_{\min}$, полученные в п. 4, сравнивают с величиной β по п. 6. Если $U_{\max} \geq \beta$, то проверяемый результат может быть исключен.

Пример. При определении состава синтетического санидина получены следующие содержания K_2O в минерале: 13,1; 12,9; 13,3; 14,1 весовых процентов.

1. Сомнительное значение 14,1.

$$2. \bar{X} = \frac{13.1+12.9+13.3+14.1}{4} = 13.4$$

$$3. S_x = \sqrt{\frac{(13.4 - 13.1)^2 + (13.4 - 12.9)^2 + (13.4 - 13.3)^2 + (13.4 - 14.1)^2}{4 - 1}} = 0.5$$

$$4. U = \frac{14.111 - 13.44}{0.5} = 1.4.$$

5. Принимаем $P = 0.95$.

6. Для $P = 0.95$ и $n = 4$ $\beta = 1.46$ (по табл. 27). $U < \beta$ ($1.4 < 1.46$), результат 14.1 не может быть исключен.

Другой пример. Было получено 5 значений рН для равновесия минерал - раствор: 4.3, 4.2, 4.3, 4.1, 5.3

1. Необходимо проверить 5.3 .

2. $\bar{X} = 4.4$.

$$3. S_x = \sqrt{\frac{(4.4 - 4.3)^2 + (4.4 - 4.2)^2 + (4.4 - 4.3)^2 + (4.4 - 4.1)^2 + (4.4 - 5.3)^2}{5 - 1}} = 0.5$$

$$4. U = \frac{5.3 - 4.4}{0.5} = 1.8.$$

5. Принимаем $\alpha = 0.95$.

6. По таблице Б.1 $\beta = 1.67$ ($n = 5$, $\alpha = 0.95$).

7. $U > \beta$, результат 5.3 можно исключить.

Таблица Б.1 Коэффициенты β для различных значений доверительной вероятности P .

β	Доверительный интервал P		
n	0.90	0.95	0.99
3	1.15	1.15	1.15
4	1.42	1.46	1.48
5	1.60	1.67	1.72
6	1.73	1.82	1.89
7	1.83	1.94	2.02
8	1.91	2.03	2.13
9	1.98	2.11	2.21
10	2.03	2.18	2.29
11	2.09	2.23	2.36
12	2.13	2.29	2.41
13	2.17	2.33	2.47
14	2.21	2.37	2.50
15	2.25	2.41	2.55
16	2.28	2.44	2.58
18	2.34	2.50	2.66
20	2.38	2.56	2.71

Приложение В (справочное)

Практическая работа 3

Оценка границ доверительного интервала величины погрешности для малых выборок.

Погрешность анализа определяется по формуле

$$\varepsilon = \pm \frac{t_{\alpha} S_X}{\sqrt{n}},$$

где S_X - среднеквадратическое отклонение, t_n - коэффициент Стьюдента для оценки погрешности при малых n ($n \leq 20$).

Стьюдент - псевдоним английского химика В.Госсета, предложившего в 1908 г. применять коэффициент t_n .

Фактически t_n применяется вместо Z при $n < 10$. При n стремящемся к бесконечности распределение Стьюдента совпадает с нормальным распределением с единичной

дисперсией: $t_n = \frac{\varepsilon}{S_X}$; значения коэффициентов приведены в таблице В.1

Таблица В.1 Значения коэффициентов Стьюдента t_n (для двусторонней проверки).

	Доверительная вероятность Р						
п	0.3	0.5	0.8	0.9	0.95	0.99	0.999
2	0.51	1.00	3.1	6.3	12.7(6.3)*	63.7	636.6
3	0.45	0.82	1.9	2.9	4.3(2.9)	9.9	31.6
4	0.42	0.77	1.6	2.4	3.2(2.4)	5.8	12.9
5	0.41	0.74	1.5	2.1	2.8(2.1)	4.6	8.6
6	0.41	0.73	1.5	2.0	2.6(2.0)	4.0	6.9
7	0.40	0.72	1.4	1.9	2.4(1.9)	3.7	6.0
8	0.40	0.71	1.4	1.9	2.4(1.9)	3.5	5.4
9	0.40	0.71	1.4	1.9	2.3(1.9)	3.4	5.0
10	0.40	0.70	1.4	1.8	2.3(1.8)	3.3	4.8
12	0.40	0.70	1.4	1.8	2.2(1.8)	3.1	4.3
14	0.39	0.69	1.4	1.8	2.2(1.8)	3.0	4.2
16	0.39	0.69	1.4	1.8	2.2(1.8)	2.9	4.0
20	0.39	0.69	1.3	1.7	2.1(1.7)	2.9	3.9
30	0.39	0.68	1.3	1.7	2.0(1.7)	2.8	3.7
∞	0.39	0.67	1.3	1.6	2.0(1.6)	2.6	3.3

*В скобках даны величины t_n для $P = 0.95$ при односторонней проверке. Проверка называется двусторонней или односторонней в зависимости от того, как оценивать погрешности величины X - по обе стороны среднего значения ($\pm$) или по одну сторону от среднего соответственно.

Рассмотрим еще пример. При измерении плотности минерала получен ряд следующих значений ($n=5$): 2.75, 2.78, 2.76, 2.77, 2.76. Определить среднее значение и границы доверительного интервала при вероятности $P = 0.95$.

$$\bar{X} = \frac{2.75 + 2.78 + 2.76 + 2.77 + 2.76}{5} = 2.76$$

1. Вычислим

$$S_x = \sqrt{\frac{(2.75-2.76)^2 + (2.78-2.76)^2 + (2.76-2.76)^2 + (2.77-2.76)^2 + (2.76-2.76)^2}{5-1}} = 0.06.$$

2. Вычислим S_x

3. По табл. 27 находим: для $P = 0.95$ и $n = 5$ $t_n = 2.78$.

$$\varepsilon = \pm \frac{t_{\alpha} S_x}{\sqrt{n}} = \frac{2.78 \cdot 0.06}{\sqrt{5}} = 0.07$$

4. Находим

, если $n < 20$, то $\varepsilon = t_n S_x$.

5. Итак, плотность минерала $\bar{X} = 2.76 \pm 0.07$, т.е. вероятность отклонения в замерах за интервал ± 0.07 - 5%.

Приложение Г (справочное)

Практическая работа 4

Сравнение двух выборочных средних при известных параметрах двух выборок.

В практике петрологического эксперимента часто возникает вопрос о значимости различий двух (двух или больше) серий замеров. Например, изменился ли состав минерала в результате опыта (произошло ли смещение реакции) или нет? Для этого необходимо выполнить статистический анализ.

Ход анализа. Гипотеза: средние значения обеих серий замеров совпадают, т.е. в пределах точности различия нет.

1. Устанавливают объем выборок n_1 и n_2 .
2. Вычисляют S_1 и S_2 для обеих выборок. Вычисляют $S_{1,2}$:

$$S_{1,2} = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}.$$

$$t_{2\pi}^p = \frac{X_1 - X_2}{S_{1,2} \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$$

3. Вычисляют
4. Принимают доверительную вероятность ($P = 0.95$).
5. Определяют, какую проверку надо произвести (скорее всего, двустороннюю).
6. По значению P и n находим табличное значение t_n (см. табл.). При этом надо учесть, что по таблице $n = n_1 + n_2 - 1$.
7. Сравнивают абсолютную величину t_n^p с t_n :
 - а) если $t_n^p > t_n$, гипотеза отбрасывается, т.е. результаты статистически значимы.
 - б) если $t_n^p \leq t_n$, гипотеза принимается, т.е. разница величин статистически не значима.

Рассмотрим пример. В ходе реакции мольная доля Mg в гранате изменилась от $X_{\text{Mg}}^{\text{Gr}} = 0.21$ до $X_{\text{Mg}}^{\text{Gr}} = 0.24$. Можно ли приписать это изменение только погрешности анализа (другими словами, считать, что состав граната не изменился)? Условия: S_1 и S_2 (для исходного и конечного материалов навески граната) соответственно равны 0.005 и 0.020 при $n_1 = 10$ и $n_2 = 5$.

Гипотеза: средние значения не отличаются друг от друга.

1. $S_1 = 0.005$ и $S_2 = 0.02$.

$$t_{\text{ан}}^P = \frac{0.24 - 0.21}{0,012 \sqrt{\frac{1}{10} + \frac{1}{5}}} = 4.55.$$

2.

3. Принимаем $P = 0.95$.

4. Для $P = 0.95$ и двусторонней проверки $n = 10 + 5 - 1 = 14$, $t_n = 2.2$ (см. табл. 28).

5. Сравниваем рассчитанную величину (t_n^P) с табличным t_n : $t_n^P > t_n$ ($4.55 > 2.2$). Таким образом, с вероятностью 0.95 произошла реакция с изменением состава граната.

Еще пример. В одном шлифе габбро найдены 2 зерна плагиоклаза состава An_{50} и An_{55} ($X_{Ca}^{Pl} = 0.50$ и 0.55 соответственно). Можно ли считать составы плагиоклазов одинаковыми? Условия : $S_1 = S_2 = 0.03$, $n_1 = n_2 = 3$, $P = 0.95$.

1. Рассчитываем $S_{1,2}$:

$$S_{1,2} = \sqrt{\frac{(3-1)(0.03)^2 + (3-1)(0.03)^2}{3+3-2}} = 0.03$$

2. Рассчитываем t_n^P :

$$t_{\text{ан}}^P = \frac{0.55 - 0.50}{0.03 \sqrt{\frac{1}{3} + \frac{1}{3}}} = 2.04 \approx 2.0.$$

3. Находим по табл. 28 значения t_n . $n = 3 + 3 - 1 = 5$. $t_n = 2.8$.

4. Сравниваем t_n^P и t_n :

$$t_n^P < t_n.$$

Таким образом, составы плагиоклазов (An_{50} и An_{55}) значимо не различаются, и разница в составах обусловлена лишь погрешностями в определении составов плагиоклазов.

Приложение Г
(справочное)
Практическая работа 5
Аппроксимация экспериментальных зависимостей методом наименьших квадратов (МНК)

До сих пор мы рассматривали погрешности при измерениях какой - либо одной величины. Но бывают случаи, когда необходимо определить зависимость между двумя величинами (X и Y). К ним относятся:

- Оценка силы связи (корреляции) между величинами X и Y.
- Нахождение аналитической зависимости между величинами X и Y (нахождение уравнения регрессии).
- Оценка степени аппроксимации данной зависимости уравнением регрессии.

Примерами могут служить широко используемые зависимости коэффициента распределения компонентов между фазами от температуры ($\ln K_D = A \cdot 10^3/T + B$) и от состава X одной из фаз ($\ln K_D = AX^2 + BX + C$).

Расчет коэффициентов корреляции. Прежде чем находить аналитическую зависимость между величинами X и Y, следует определить, существует ли связь между этими двумя параметрами (например, иногда неясно, зависит ли коэффициент распределения элемента между фазами от состава фаз или от f_{O_2} и т.д.). Для решения подобного рода задач проводят корреляционный анализ.

Допустим, что у нас есть набор значений двух величин X и Y. Мы хотим проверить, существует ли зависимость между этими величинами, и оценить ее значимость. Для этого необходимо рассчитать *выборочный коэффициент корреляции* r_{XY} :

$$r_{XY} = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2}}.$$

Полученные значения r_{XY} сравнивают с табличными значениями (табл. 8) для заданной доверительной вероятности и числа экспериментальных данных n . Обычно доверительную вероятность (P) выбирают 0.95, что подходит для большинства экспериментальных исследований. Если рассчитанный r_{XY} больше соответствующего (для заданных n и P) значения коэффициента корреляции из таблицы Г.1, то связь между величинами X и Y значима с вероятностью P.

Рассмотрим расчет коэффициента корреляции на конкретном примере. Пусть для некоторых двух фаз получен набор значений коэффициентов распределения элементов ($\ln K_D \equiv Y$) для приведенной температуры $t^* = 10^3/T \equiv X$. Необходимо определить, зависит ли величина $\ln K_D$ (Y) от t^* (X) и велика ли эта связь.

1. Расчеты удобно вести по приведенной формуле, записывая результаты в таблицу типа таблицы Г.2.

Рассчитаем коэффициент корреляции:

$$r_{XY} = \frac{0.532}{\sqrt{1.099 \cdot 0.274}} = 0.969.$$

Таблица Г.1 Значения коэффициентов корреляции (r_{xy}) для различных доверительных вероятностей.

$(r_{x,y})$	Доверительная вероятность P		
n	0.90	0.95	0.99
2	0.988	0.997	1.000
3	0.900	0.950	0.990
4	0.805	0.878	0.959
5	0.729	0.811	0.917
6	0.669	0.754	0.874
7	0.621	0.707	0.834
8	0.582	0.666	0.798
9	0.549	0.632	0.765
10	0.521	0.602	0.735
12	0.476	0.553	0.684
14	0.441	0.514	0.641
15	0.412	0.482	0.606
18	0.389	0.456	0.575
20	0.369	0.433	0.549
25	0.322	0.381	0.487
30	0.296	0.349	0.449
40	0.257	0.304	0.393
50	0.231	0.273	0.354
60	0.211	0.250	0.325
80	0.183	0.217	0.283
100	0.164	0.195	0.254

Таблица Г.2 Расчет коэффициента корреляции.

n	X_i	Y_i	$X_i - \bar{X}$	$Y_i - \bar{Y}$	$(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})$	$(X_i - \bar{X})^2$	$(Y_i - \bar{Y})^2$
1	1.00	0.21	- 0.43	- 0.23	0.099	0.185	0.053
2	1.10	0.30	- 0.33	- 0.14	0.046	0.109	0.020
3	1.15	0.28	- 0.28	-0.16	0.045	0.078	0.026
4	1.20	0.27	- 0.23	-0.17	0.039	0.053	0.029
5	1.20	0.38	- 0.23	-0.06	0.014	0.053	0.004
6	1.30	0.37	- 0.13	-0.07	0.009	0.017	0.005
7	1.40	0.43	- 0.03	-0.01	0.000	0.001	0.000
8	1.40	0.48	- 0.03	0.04	-0.001	0.001	0.002
9	1.50	0.45	0.07	0.01	0.001	0.005	0.000
10	1.60	0.56	0.17	0.12	0.020	0.029	0.014
11	1.70	0.57	0.27	0.13	0.035	0.073	0.017
12	1.80	0.58	0.37	0.14	0.052	0.137	0.020
13	1.80	0.63	0.37	0.19	0.070	0.137	0.036
14	1.90	0.66	0.47	0.22	0.103	0.221	0.048
S	20.05	6.17	-	-	0.532	1.099	0.274
Среднее	1.43	0.44	-	-	-	-	-

2. Задаем доверительную вероятность $P = 0.95$.

3. Сравниваем расчетную величину $r_{XY} = 0.969$ с табличными данными (табл. 30) для $n = 14$, $P = 0.95$.

4. Расчетный r_{XY} (0.969) больше, чем табличное значение (0.514). Следовательно, существует значимая (на уровне 0.95) связь между $\ln K_D$ и t^* .

Теперь надо найти **аналитическую зависимость** между $\ln K_D$ и t^* или в общем случае функциональную зависимость вида $Y = f(X)$.

В результате эксперимента мы получаем для значений аргумента ($X_1, X_2, \dots, X_n$) набор значений функций ($Y_1, Y_2, \dots, Y_n$). Если соединить последовательно точки $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ ломаной линией, она не является графическим изображением функции $Y = f(X)$, так как при повторении данной серии опытов мы получим ломаную линию, отличную от первой. Значит, измеренные значения Y будут отклоняться от истинной кривой $Y = f(X)$ вследствие статистического разброса. Наша задача состоит в том, чтобы аппроксимировать экспериментальные данные гладкой (не ломаной) кривой, которая проходила бы как можно ближе к истинной зависимости $Y = f(X)$.

Теория вероятности показывает, что наилучшим приближением будет такая кривая (или прямая) линия, для которой сумма квадратов расстояний по вертикали от точек до кривой будет минимальной. Метод нахождения кривой, соответствующей этому условию, и называется *методом наименьших квадратов* (МНК). Фактически это условие минимума соответствует предположению, что разброс точек Y_i относительно кривой $Y = f(X)$ подчиняется закону нормального распределения. Мерой этого распределения является среднеквадратическое отклонение:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [Y_i - Y(X_i)]^2}{n-1}} = \frac{1}{\sqrt{n-1}} \sum \Delta Y_i^*.$$

Требование минимального разброса соответствует минимальному значению этого среднего квадрата. Обычно форму кривой $Y = f(X)$ задают полиномами вида:

$$Y(X) = \alpha_0 + \alpha_1 X + \alpha_2 X^2 + \dots + \alpha_m X^m.$$

Нахождение коэффициентов этого полинома сводится к минимизации S_x методами математического анализа, к решению уравнений вида:

$$\sum_{j=1}^n \left(Y_j - \sum_{k=0}^m \alpha_k t_j^k \right) t_j^i = 0,$$

где $i = 0, 1, 2, \dots, n$; $j = 0, 1, 2, \dots, m$; $m < n-1$.

Для решения этих уравнений применяют итерационный (численный) метод. Фактически без применения компьютера расчет (подбор) коэффициентов α функции $Y = f(X)$ можно проводить лишь для линейной зависимости: $Y = \alpha_1 X + \alpha_0$ (т.е. $Y = \alpha X + b$).

Для степени $m > 1$ расчет коэффициента α_m выполняется на компьютерах.

Приложение Д

(справочное)

Практическая работа 6

Расчет параметров линейной зависимости $Y = aX + b$.

Приведем уравнения, позволяющие рассчитывать величины a и b без их вывода.

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i Y_i) - X \sum_{i=1}^n Y_i}{\sum_{i=1}^n (X_i)^2 - X \sum_{i=1}^n X_i}; b = Y - aX.$$

Продолжим рассмотрение предыдущего примера, в котором для некоторых 2 фаз была получена следующая зависимость $\ln K_D(Y)$ от обратной температуры $t^* = 10^3 / T(X)$. Запишем линейное уравнение связи $\ln K_D(Y) = at^*(X) + b$.

$$X; Y; X_i; Y_i; \sum_{i=1}^n Y_i; X_i^2; \sum_{i=1}^n (X_i)^2; Y_i^2; \sum_{i=1}^n (Y_i)^2.$$

Вычислим величины

Вычисление удобно представить в виде таблицы (таблица Д.1)

Таблица Д.1. Расчет параметров линейной зависимости.

n	X_i	Y_i	$X_i Y_i$	Y_i^2	X_i^2
1	1.00	0.21	0.21	0.044	1.00
2	1.10	0.30	0.33	0.090	1.21
3	1.15	0.28	0.32	0.078	1.32
4	1.20	0.27	0.32	0.073	1.44
5	1.20	0.38	0.46	0.144	1.44
6	1.30	0.37	0.48	0.137	1.69
7	1.40	0.43	0.60	0.185	1.96
8	1.40	0.48	0.67	0.230	1.96
9	1.50	0.45	0.68	0.203	2.25
10	1.60	0.56	0.90	0.314	2.56
11	1.70	0.57	0.97	0.325	2.89
12	1.80	0.58	1.04	0.336	3.24
13	1.80	0.63	1.13	0.397	3.24
14	1.90	0.66	1.25	0.436	3.61
Σ	20.05	6.17	9.36	2.992	29.81
Среднее	1.43	0.44	0.67	0.213	2.13

Вычислим параметры a и b :

$$a = \frac{9.36 - (1.43 \cdot 6.17)}{29.81 - (1.43 \cdot 20.05)} = \frac{0.537}{1.139} = 0.471,$$

$$b = 0.44 - 0.471 \cdot 1.43 = -0.234.$$

Итак, зависимость $Y = aX + b$ или $\ln K_D = at^* + b$ выражается линейным уравнением $\ln K_D = 0.471t^* - 0.234$.

Приложение Е

(справочное)

Практическая работа 7

Расчет точности аппроксимации данных уравнением $Y = aX + b$ ¹.

Оценив связи между X и Y (t^* и $\ln K_D$) (коэффициент корреляции) и найдя линейное уравнение связи, необходимо оценить степень аппроксимации линейным уравнением этой зависимости. Это можно сделать, рассчитывая среднеквадратическое отклонение расчетных значений (Y_p) от экспериментальных (Y_i):

$$S_Y^* = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - Y_p)^2}{n - 1}}.$$

Затем рассчитывают погрешность аппроксимации (ε_{Y^*}) по критерию, предварительно задав доверительную вероятность:

$$\varepsilon_Y^* = \frac{t_{\alpha n} S_Y^*}{\sqrt{n}}.$$

Рассчитаем значение S_{Y^*} и ε_{Y^*} для зависимости $\ln K_D = 0.471t^* - 0.234$ (таблица Е.1).

Таблица Е.1 Расчет точности аппроксимации.

n	X_i	Y_i	Y_p	$Y_i - Y_p$	$(Y_i - Y_p)^2$
1	1.00	0.21	0.24	- 0.03	0.0009
2	1.10	0.30	0.28	0.02	0.0004
3	1.15	0.28	0.31	- 0.03	0.0009
4	1.20	0.27	0.33	- 0.06	0.0036
5	1.20	0.38	0.33	0.05	0.0025
6	1.30	0.37	0.38	- 0.01	0.0001
7	1.40	0.43	0.43	0.00	0.0000
8	1.40	0.48	0.43	0.05	0.0025
9	1.50	0.45	0.47	- 0.02	0.0004
10	1.60	0.56	0.52	0.04	0.0016
11	1.70	0.57	0.57	0.00	0.0000
12	1.80	0.58	0.61	- 0.03	0.0009
13	1.80	0.63	0.61	0.02	0.0004
14	1.90	0.66	0.66	0.00	0.0000
$\bar{a}$	-	-	-	-	0.0142

¹ Подобный расчет можно проводить и для уравнений более высоких степеней.

1. Рассчитаем для заданных X_i по найденному уравнению $Y = 0.471X - 0.234$ значения Y_p ; $(Y_i - Y_p)$; $(Y_i - Y_p)^2$ (табл.13).

2. Вычислим S_{Y^*} :

$$S_Y^* = \sqrt{\frac{0.0142}{14-1}} = 0.033$$

3. Выберем $P = 0.95$ и по табл. 28 для $n = 14$ найдем $t_n = 2.2$.

4. Вычислим величину ε_Y^* :

$$\varepsilon_Y^* = \frac{t_{\alpha n} S_Y^*}{\sqrt{n}} = \frac{2.2 \cdot 0.033}{\sqrt{14}} = 0.22$$

Итак, уравнение $Y = 0.471X - 0.234$ описывает экспериментальную зависимость $\ln K_D = (Y)$ от $t^* (X)$ с погрешностью 0.02 для доверительной вероятности $P = 0.95$. Практически это означает, что с вероятностью 0.95 все экспериментальные точки будут находиться в пределах ± 0.02 от расчетной прямой.

Порядок обработки зависимости двух параметров следующий:

1. Рассчитывается коэффициент корреляции r_{XY} .
2. По табл. 10 оценивается (для выбранного значения P и количества пар X и Y - n) значимость связи X и Y .
3. Находятся коэффициенты линейного уравнения связи $Y = \alpha X + b$.
4. Вычисляется S^*_Y (среднеквадратическое отклонение кривой $Y = \alpha X + b$ от экспериментальных точек).
5. Задаем доверительную вероятность P . Обычно $P = 0.95$.
6. По табл. 28 находим значение t_n для выбранного P и количества точек (пар) - n .
7. Рассчитываем погрешность аппроксимации по формуле:

$$\varepsilon_Y^* = \pm \frac{t_{\alpha n} S_Y^*}{\sqrt{n}},$$

Приложение Ж (справочное)

Алгоритм обработки результатов измерений

В заключение напомним **порядок статистической обработки серии измерений**. С подобной работой наиболее часто приходится сталкиваться экспериментатору:

1. Вычисляется среднее арифметическое выборки (из n результатов измерений):

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i.$$

2. Находятся погрешности отдельных измерений: $\Delta = X - X_i$.

3. Вычисляется среднеквадратическое отклонение результатов измерений:

$$S_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta X_i^2}{n-1}}$$

4. Если один результат измерений (или несколько) резко отличается от остальных, то следует проверить, не является ли этот результат промахом, предварительно выбрав уровень значимости q (для большинства наших измерений $q = 0.95$).

5. Определяется коэффициент Стьюдента $t_{p,n}$ для доверительной вероятности P и числа измерений n (см.табл).

6. Находят границы доверительного интервала:

Доверительные границы в случае нормального закона распределения вычисляются как

$$\pm tS / \sqrt{n}, \pm tS_{\bar{X}},$$
$$\Delta X = S_X \cdot t_{p,n}$$

где S , $S_{\bar{X}}$ - средние квадратические отклонения (погрешности), соответственно, единичного и среднего арифметического результатов измерений;

где $t_{p,n}$ - коэффициент Стьюдента, зависящий от доверительной вероятности P и числа измерений n .

$$S_{\bar{X}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}},$$

$$\varepsilon = t_{an} \frac{S_X}{\sqrt{n}}.$$

7. Окончательный результат записывается в виде $X = \bar{X} \pm \varepsilon$;

8. Вычисляется коэффициент вариации данной серии замеров:

$$V_X = \frac{S_X}{\bar{X}} 100\%.$$

Приложение 3 (справочное) **Измерения физических величин**

3.1 измерение физической величины;

Совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей и получение значения этой величины.

Примеры

1 В простейшем случае, прикладывая линейку с делениями к какой-либо детали, по сути сравнивают ее размер с единицей, хранимой линейкой, и, произведя отсчет, получают значение величины (длины, высоты, толщины и других параметров детали).

2 С помощью измерительного прибора сравнивают размер величины, преобразованной в перемещение указателя, с единицей, хранимой шкалой этого прибора, и проводят отсчет.

Примечания

1 Приведенное определение понятия "измерение" удовлетворяет общему уравнению измерений, что имеет существенное значение в деле упорядочения системы понятий в метрологии. В нем учтена техническая сторона (совокупность операций), раскрыта метрологическая суть измерений (сравнение с единицей) и показан гносеологический аспект (получение значения величины).

2 От термина "измерение" происходит термин "измерять", которым широко пользуются на практике. Все же нередко применяются такие термины, как "мерить", "обмерять", "замерять", "промерять", не вписывающиеся в систему метрологических терминов. Их применять не следует.

Не следует также применять такие выражения, как "измерение значения" (например, мгновенного значения напряжения или его среднего квадратического значения), так как значение величины - это уже результат измерений.

3 В тех случаях, когда невозможно выполнить измерение (не выделена величина как физическая и не определена единица измерений этой величины) практикуется *оценивание* таких величин по условным шкалам

3.2 равноточные измерения

Ряд измерений какой-либо величины, выполненных одинаковыми по точности средствами измерений в одних и тех же условиях с одинаковой тщательностью.

Примечание - Прежде чем обрабатывать ряд измерений, необходимо убедиться в том, что все измерения этого ряда являются равноточными

3.3 неравноточные измерения

Ряд измерений какой-либо величины, выполненных различающимися по точности средствами измерений и (или) в разных условиях.

Примечание - Ряд неравноточных измерений обрабатывают с учетом веса отдельных измерений, входящих в ряд

3.4 однократное измерение

Измерение, выполненное один раз.

Примечание - Во многих случаях на практике выполняются именно однократные измерения. Например, измерение конкретного момента времени по часам обычно производится один раз

3.5 многократное измерение

Измерение физической величины одного и того же размера, результат которого получен из нескольких следующих друг за другом измерений, т.е. состоящее из ряда однократных измерений

3.6 статическое измерение

Измерение физической величины, принимаемой в соответствии с конкретной измерительной задачей за неизменную на протяжении времени измерения.

Примеры

1 Измерение длины детали при нормальной температуре.

2 Измерение размеров земельного участка

3.7 динамическое измерение

Измерение изменяющейся по размеру физической величины.

Примечания

1 Термин элемент "динамическое" относится к измеряемой величине.

2 Строго говоря, все физические величины подвержены тем или иным изменениям во времени. В этом убеждает применение все более и более чувствительных средств измерений, которые дают возможность обнаруживать изменение величин, ранее считавшихся постоянными, поэтому разделение измерений на динамические и статические является условным

3.8 абсолютное измерение

Измерение, основанное на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и (или) использовании значений физических констант.

Пример - Измерение силы $F = mg$ основано на измерении основной величины - массы m и использовании физической постоянной g (в точке измерения массы).

Примечание - Понятие *абсолютное измерение* применяется как противоположное понятию *относительное измерение* и рассматривается как измерение величины в ее единицах. В таком понимании это понятие находит все большее и большее применение

3.9 относительное измерение

Измерение отношения величины к одноименной величине, играющей роль единицы, или измерение изменения величины по отношению к одноименной величине, принимаемой за исходную.

Пример - Измерение активности радионуклида в источнике по отношению к активности радионуклида в однотипном источнике, аттестованном в качестве эталонной меры активности

3.10 прямое измерение

Измерение, при котором искомое значение физической величины получают непосредственно.

Примечание - Термин *прямое измерение* возник как противоположный термину *косвенное измерение*. Строго говоря, измерение всегда прямое и рассматривается как сравнение величины с ее единицей. В этом случае лучше применять термин *прямой метод измерений*.

Примеры

1 Измерение длины детали микрометром.

2 Измерение силы тока амперметром.

3 Измерение массы на весах

3.11 косвенное измерение

Определение искомого значения физической величины на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной.

Пример - Определение плотности D тела цилиндрической формы по результатам прямых измерений массы m , высоты h и диаметра цилиндра d , связанных с плотностью уравнением

$$D = \frac{m}{0,25\pi d^2 h}.$$

Примечание - Во многих случаях вместо термина *косвенное измерение* применяют термин *косвенный метод измерений*

3.12 совокупные измерения

Проводимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при которых искомые значения величин определяют путем решения системы уравнений, получаемых при измерениях этих величин в различных сочетаниях.

Примечание - Для определения значений искомых величин число уравнений должно быть не меньше числа величин.

Пример - Значение массы отдельных гирь набора определяют по известному значению массы одной из гирь и по результатам измерений (сравнений) масс различных сочетаний гирь

3.13 совместные измерения

Проводимые одновременно измерения двух или нескольких неоднородных величин для определения зависимости между ними

3.14 наблюдение при измерении

Операции, проводимые при измерении и имеющие целью своевременно и правильно произвести отсчет.

Примечание - Не следует заменять термин *измерение* термином *наблюдение*

3.15 вид измерений

Часть области измерений, имеющая свои особенности и отличающаяся однородностью измеряемых величин.

Пример - В области электрических и магнитных измерений могут быть выделены как виды измерений: измерения электрического сопротивления, электродвижущей силы, электрического напряжения, магнитной индукции и др.

3.16 подвид измерений

Часть вида измерений, выделяющаяся особенностями измерений однородной величины (по диапазону, по размеру величины и др.).

Пример - При измерении длины выделяют измерения больших длин (в десятках, сотнях, тысячах километров) или измерения сверхмалых длин - толщин пленок

3.17 физическая величина

Одно из свойств физического объекта (физической системы, явления или процесса), общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них.

3.18 Измеряемая физическая величина;

Физическая величина, подлежащая измерению, измеряемая или измеренная в соответствии с основной целью измерительной задачи

3.19 размер физической величины;

Количественная определенность физической величины, присущая конкретному материальному объекту, системе, явлению или процессу

3.20 значение физической величины;

Выражение размера физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц

3.21 числовое значение физической величины;

Отвлеченное число, входящее в значение величины

3.22 истинное значение физической величины;

Значение физической величины, которое идеальным образом характеризует в качественном и количественном отношении соответствующую физическую величину.

Примечание - Истинное значение физической величины может быть соотнесено с понятием абсолютной истины. Оно может быть получено только в результате бесконечного процесса измерений с бесконечным совершенствованием методов и средств измерений

3.23 действительное значение физической величины;

Значение физической величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него

3.24 результат измерения физической величины;

Значение величины, полученное путем ее измерения

3.25 неисправленный результат измерения;

Значение величины, полученное при измерении до введения в него поправок, учитывающих систематические погрешности

3.26 исправленный результат измерения;

Полученное при измерении значение величины и уточненное путем введения в него необходимых поправок на действие систематических погрешностей

3.27 сходимость результатов измерений;

сходимость измерений

Близость друг к другу результатов измерений одной и той же величины, выполненных повторно одними и теми же средствами, одним и тем же методом в одинаковых условиях и с одинаковой тщательностью.

Примечание - Сходимость измерений двух групп многократных измерений может характеризоваться размахом, средней квадратической или средней арифметической погрешностью

3.28 воспроизводимость результатов измерений

Близость результатов измерений одной и той же величины, полученных в разных местах, разными методами, разными средствами, разными операторами, в разное время, но приведенных к одним и тем же условиям измерений (температуре, давлению, влажности и др.).

Примечание - Воспроизводимость измерений может характеризоваться средними квадратическими погрешностями сравниваемых рядов измерений

3.29 ряд результатов измерений

Значения одной и той же величины, последовательно полученные из следующих друг за другом измерений

3.30 среднее взвешенное значение величины;

Среднее значение величины из ряда неравноточных измерений, определенное с учетом веса каждого единичного измерения (см. 8.8).

Примечание - Среднее взвешенное значение иногда называют *средним весовым*

3.31 вес результата измерений;

Положительное число (p), служащее оценкой доверия к тому или иному отдельному результату измерения, входящему в ряд неравноточных измерений.

Примечание - В большинстве случаев принято считать, что веса входящих в ряд неравноточных измерений обратно пропорциональны квадратам их средних квадратических погрешностей, т.е. $p_i = 1/S_i^2$. Для простоты обычно результату с большей погрешностью приписывают вес, равный единице ($p=1$), а остальные веса находят по отношению к нему.

ПРИЛОЖЕНИЕ И

(справочное)

Систематические погрешности

Систематические погрешности можно подразделить на следующие группы.

1. Погрешности, природа которых нам известна и величина которых может быть достаточно точно определена. Такие погрешности могут быть исключены введением соответствующих поправок. К погрешностям такого рода можно отнести "дрейф" рентгеновского дифрактометра: для каждой серии замеров можно ввести поправку, введя так называемый "стандарт" - вещество, для которого точно известны положения пиков на дифрактограммах. Определив поправки, можно проводить дальнейшие измерения, не вводя стандарт в исследуемый образец.

2. Другой вид систематических погрешностей - это погрешности известного происхождения, но неизвестной величины. К их числу относятся погрешности измерительных приборов. Если на приборе указан класс точности 0,5, то это означает, что показания прибора верны с точностью до 0,5% от всей действующей шкалы прибора. Систематической погрешностью такого типа будет погрешность в определении давления манометром (класс 0.5), рассчитанного на измерение давления 4000 атм. Это значит, что давление мы измеряем с точностью 0.5% от всей шкалы, т.е. 20 атм. Систематические погрешности этого типа не могут быть исключены, но их наибольшее значение, как правило, известно. Если, измеряя давление, мы получили значение 2000 атм, то можем написать $P = 2000 \pm 20$. Здесь ± 20 означает, что давление лежит в пределах от 1980 до 2020.

3. Третий вид систематических погрешностей - самый опасный, это погрешности, о существовании которых мы не подозреваем, хотя величина их может быть очень значительна. Они чаще всего появляются при сложных измерениях. Иногда бывает, что величина, которая измерена, как нам кажется, с точностью 2 - 3%, оказывается в 2 - 3 раза больше или меньше найденной величины. Например, измеряя скорость диффузии какого-либо элемента в твердой фазе, мы можем не учесть, что в данном образце существует сеть дислокаций, за счет которых скорость диффузии увеличится в несколько раз. Распознать такую ошибку будет трудно, т. к. повторные замеры распределения компонентов на микроанализаторах будут давать одну и ту же картину, а краевые зоны разных образцов будут иметь одну и ту же высокую плотность дислокаций. Такая погрешность может быть выявлена только при тщательной проверке всех этапов эксперимента, используя разные методики приготовления образцов и т. п.

Таким образом, при проведении эксперимента необходимо тщательно проанализировать все возможные источники систематических погрешностей и исключить их (если это возможно).

Разделение систематических и случайных погрешностей до некоторой степени условно. Можно предвидеть ситуацию, в которой систематическая погрешность неизвестного происхождения будет трудно выявляться и не учитываться. В то же время источниками случайных погрешностей могут быть неконтролируемые изменения параметров эксперимента в сложной системе: изменения внешней (по отношению к изучаемой системе) среды, неоднородность материала исходной навески. Фактически, если эти изменения происходят достаточно быстро, то они должны рассматриваться как фактор, способствующий появлению случайных погрешностей.

Случайные погрешности неустранимы из опытных данных, но они могут быть выявлены и количественно оценены при математической обработке экспериментальных данных, в чем и заключается основная цель статистического анализа.

Интересно рассмотреть соотношения величин систематических и случайных погрешностей. Возможны два случая. 1) Величина систематической погрешности больше величины случайной. В этом случае, проводя серию опытов, мы будем получать постоянные значения какой - либо величины; подобный вариант встречается сравнительно редко и чаще всего связан с недостаточной чувствительностью измерительного прибора. 2) Случайные погрешности больше систематических. Ясно, что для повышения точности измерений в первом случае надо уменьшать величину систематической погрешности (повысить чувствительность прибора) до тех пор, пока она не станет меньше случайной погрешности. Во втором - необходимо уменьшить величину случайной погрешности, это можно сделать, увеличивая количество измерений. В работе экспериментатора чаще всего встречается вторая ситуация, и повысить точность измерений можно, только увеличивая их число. Это не всегда возможно из соображений времени, экономики и т.д. В этом случае мы можем только приближенно оценить нижний предел возможной погрешности по так называемым приборным погрешностям. Реальная величина погрешности может быть значительно выше.

ПРИЛОЖЕНИЕ К (справочное) Запись чисел. Правила округления

Результаты любого эксперимента выражаются цифрами. Запись должна быть подчинена определенным правилам, произвол в этом деле недопустим. В этом смысле говорят о правильной и неправильной записи результатов. Следует иметь в виду, что неправильная запись может значительно обесценивать результаты даже блестящей экспериментальной работы, поэтому вопрос этот более серьезен, чем может показаться. Общее правило записи таково: она должна содержать только значащие цифры. Значащими считаются все цифры, кроме нулей в начале десятичной дроби (слева от запятой) и нулей в конце числа, если они поставлены вместо неизвестных цифр.

Рассмотрим пример. В качестве условий проведения опыта указано $P = 30\ 000$ бар. Если все эти цифры значащие, то нули обозначают отсутствие единиц соответствующих разрядов, другими словами, мы ручаемся за то, что точность нашего измерения давления не хуже ± 1 бар. На самом деле это далеко не так: точность ниже на три порядка. Поэтому приведенная запись неверна, она создает совершенно ложное представление о точности эксперимента. Правильной записью будет 30×10^3 бар или 30 кбар. В такой записи только две значащие цифры, и последняя из них соответствует реальной точности эксперимента.

Другой пример. В результате серии измерений определена плотность $\rho = 13,60$ г / см³. В этой записи 4 значащие цифры, т.е. плотность измерена с точностью до единицы во втором знаке после запятой - до $\pm 0,01$ г/см³. Если бы реальная точность составляла только $\pm 0,1$ г/см³, правильной записью было бы 13,6 г/см³. Пусть, однако, при реальной точности $\pm 0,01$ г/см³ шкала измерительного прибора позволяет получать значение в следующем разряде (тысячные доли г/см³). Как поступить с этими значениями? Очевидно, что просто отбросить их было бы неверно, ибо значения, например, 13,615 и 13,605 г/см³ заметно отличаются. Такие цифры (в данном случае 0,00n г/см³) называются сомнительными; это значит, что n может принимать любое значение в пределах от 1 до 10. При записи результатов можно поступать двояко:

а) отбрасывать все приближенные цифры,

б) оставлять последней приближенную цифру ("принцип А.Н. Крылова"). Например, число 1,9931 (0,0031 - сомнительные цифры) записывается в первом варианте как 1,99, а во втором – 1,993 (сохраняя последнюю сомнительную цифру 3).

В приведенных примерах мы провели *округление* результата. Округлением числа называется уменьшение числа значащих цифр. Правила округления сводятся к следующему:

- если отбрасывается цифра меньше 5, то предпоследняя цифра остается без изменения: $1,9932 \rightarrow 1,993$;

- если отбрасывается цифра больше 5, то предпоследняя цифра увеличивается на единицу: $1,9937 \rightarrow 1,994$;

- если отбрасывается цифра 5, то предпоследняя цифра:

останется неизменной, если перед ней четное число: $1,9925 \rightarrow 1,992$.

увеличится на единицу, если перед ней нечетное число: $1,9935 \rightarrow 1,994$.

Запись надо вести так, чтобы все значащие цифры были верны, и лишь последняя была бы приближенной:

не $D = 1,4231 \pm 0,005$, а $1,413 \pm 0,005$, не $P = 38,742 \pm 0,04$, а $38,74 \pm 0,04$.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(справочное)

Оценка погрешности косвенных измерений

При косвенных измерениях искомая физическая величина A является функцией величин $X, Y, Z, \dots$, которые могут быть получены с помощью прямых измерений. Результат косвенного измерения записывается в виде:

$$A \pm \Delta A$$

где $A = f(X, Y, Z, \dots)$ - значение искомой величины, рассчитанное по средним значениям параметров $X, Y, Z, \dots$, каждый из которых измеряется, как правило, по несколько раз. ΔA - абсолютная погрешность косвенного измерения, зависящая от погрешностей параметров $X, Y, Z, \dots$ (т.е. от $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \dots$).

В простейших случаях абсолютную и относительную погрешность косвенных измерений подсчитать нетрудно. Рассмотрим несколько примеров.

Пусть $A = X + Y$. Если известны погрешности ΔX и ΔY , то

$$A \pm \Delta A = (X \pm \Delta X) + (Y \pm \Delta Y)$$

Максимальное значение погрешности равно при этом

$$\Delta A = \Delta X + \Delta Y.$$

Такова же будет максимальная абсолютная погрешность при $A = X - Y$.

Таким образом, относительные погрешности величин, являющихся суммой или разностью двух параметров, равны соответственно :

$$E = \frac{\Delta X + \Delta Y}{X + Y} \quad \text{и} \quad E = \frac{\Delta X + \Delta Y}{X - Y}$$

Пусть теперь $A = X \cdot Y$ - тогда

$$A \pm \Delta A = (X \pm \Delta X)(Y \pm \Delta Y) = X \cdot Y \pm X \cdot \Delta Y \pm Y \cdot \Delta X + \Delta X \cdot \Delta Y$$

Пренебрегая слагаемым второго порядка малости $|\Delta X \cdot \Delta Y|$ имеем:

$$\Delta A = X \cdot \Delta Y + Y \cdot \Delta X$$

$$E = \frac{X \cdot \Delta Y + Y \cdot \Delta X}{X \cdot Y} \quad \text{или} \quad E = \frac{\Delta X}{X} + \frac{\Delta Y}{Y}$$

Если $A = \frac{X}{Y}$, то $A \pm \Delta A = \frac{X \pm \Delta X}{Y \pm \Delta Y}$.

Максимальное значение погрешности ΔA получится в случае, если погрешности в числителе и в знаменателе данного выражения взять с разными знаками. Тогда можно записать:

$$A \pm \Delta A = \frac{X + \Delta X}{Y - \Delta Y} = \frac{(X + \Delta X)(Y + \Delta Y)}{(Y - \Delta Y)(Y + \Delta Y)} = \frac{XY + Y \cdot \Delta X + X \cdot \Delta Y}{Y^2}$$

Здесь мы пренебрегли членами $(\Delta Y)^2$ и $\Delta X \cdot \Delta Y$. Максимальная абсолютная погрешность равна в этом случае

$$\Delta A = \frac{Y \cdot \Delta X + X \cdot \Delta Y}{Y^2},$$

а относительная погрешность равна

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta X}{X} + \frac{\Delta Y}{Y}$$

Полученные результаты легко обобщаются на произвольное количество сомножителей. Если в самом общем случае

$$A = C \frac{X^\alpha \cdot Y^\beta \cdot \dots}{Z^\gamma},$$

где C — постоянный коэффициент, а $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ — любые целые или дробные числа, то относительную погрешность косвенного измерения величины A можно записать в виде :

$$E = \frac{\Delta A}{A} = \alpha \frac{\Delta X}{X} + \beta \frac{\Delta Y}{Y} + \gamma \frac{\Delta Z}{Z} + \dots$$

Простота последнего выражения указывает на то, что в большинстве случаев удобно оценить сначала относительную погрешность косвенного измерения, а потом уже найти его абсолютную погрешность. Следует, однако, обратить внимание на то обстоятельство, что приведенные формулы применимы только в том случае, если параметры $X, Y, Z, \dots$ не зависят друг от друга. Если же, к

примеру, $A = \frac{Z}{Y}$, где $Z = X + Y$ расчет приведет к неправильному результату, т.к. погрешности одной и той же величины Y будут приписаны различные знаки, поскольку указанная величина фигурирует как в числителе, так и в знаменателе исходного выражения.

Более общие правила вычисления погрешностей, позволяющие избежать подобных ошибок, можно получить, используя дифференциальное исчисление.

Пусть по-прежнему $A = f(X, Y, Z, \dots)$. Тогда относительную погрешность косвенного измерения $E = \frac{\Delta A}{A}$ можно записать в виде $E = \frac{dA}{A}$. С другой стороны, $\frac{dA}{A} = d(\ln A)$ Таким образом, относительная погрешность величины A равна полному дифференциалу натурального логарифма функции, определяющей зависимость данной величины от измеряемых, т.е.

$$E = \frac{\Delta A}{A}$$

Таким образом, для нахождения необходимо:

- 1) Прологарифмировать исходную формулу $\ln A = \ln f(X, Y, Z, \dots)$
- 2) Продифференцировать полученное уравнение, заменив затем дифференциалы $dA, dX, dY, \dots$ погрешностями $\Delta A, \Delta X, \Delta Y, \dots$;
- 3) Сгруппировать члены, содержащие одни и те же погрешности, вынести эти погрешности за скобки, а выражения в скобках взять по модулю;
- 4) заменить знаки “-” перед коэффициентами при погрешностях на знак “+” (для нахождения максимального значения Δ).

Общая формула для расчета относительной погрешности будет при этом выглядеть следующим

образом:

$$E = \frac{\Delta A}{A} = \left| \frac{1}{f} \frac{df}{dX} \right| \Delta X + \left| \frac{1}{f} \frac{df}{dY} \right| \Delta Y + \left| \frac{1}{f} \frac{df}{dZ} \right| \Delta Z + \dots$$

В качестве примера приведем оценку относительной погрешности величины γ , вычисляемой по формуле $\gamma = \frac{H}{H-h}$, где средние значения параметров, полученные после проведения серии измерений (отсчеты по шкале манометра).

$$\begin{aligned} \ln \gamma &= \ln H - \ln(H-h) \\ \frac{d\gamma}{\gamma} &= \frac{dH}{H} - \frac{d(H-h)}{H-h} = \frac{dH}{H} - \frac{dH}{H-h} + \frac{dh}{H-h} \\ \frac{\Delta\gamma}{\gamma} &= \left| \frac{1}{H} - \frac{1}{H-h} \right| \Delta H + \left| \frac{1}{H-h} \right| \Delta h = \left| \frac{-h}{H(H-h)} \right| \Delta H + \left| \frac{1}{H-h} \right| \Delta h \end{aligned}$$

Надо сказать, что расчет по формуле приводит, как правило, к завышению погрешности результата косвенных измерений. Причем это завышение зависит от числа параметров X, Y, Z, ... Если, например, имеется пять таких параметров, то вероятность того, что все ошибки будут иметь заданный знак равна $\frac{1}{16}$. При большем их числе указанная вероятность будет еще меньше. Таким образом, понятно, что максимально возможное значение относительной погрешности, даваемое этим выражением, во многих случаях значительно больше реальной погрешности результата.

Теория вероятностей дает более правильные формулы для оценки погрешностей косвенных измерений. Если при прямых измерениях параметров X, Y, Z ... доминирующей является случайная погрешность, то погрешность косвенного измерения также является случайной величиной. Это означает, что следует искать среднюю квадратичную погрешность результата. Так, если $A = X + Y$, то вместо выражений указанных выше будем иметь :

$$A_{\text{кг}} = \sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2} \quad \text{и} \quad E = \frac{\sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2}}{X + Y}$$

Общая формула для расчета относительной погрешности будет в этом случае иметь следующий вид :

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{1}{f} \sqrt{\left(\frac{df}{dX} \Delta X \right)^2 + \left(\frac{df}{dY} \Delta Y \right)^2 + \left(\frac{df}{dZ} \Delta Z \right)^2 + \dots}$$

или

$$\frac{\Delta A}{A} = \sqrt{\left(\frac{d \ln f}{dX} \Delta X \right)^2 + \left(\frac{d \ln f}{dY} \Delta Y \right)^2 + \left(\frac{d \ln f}{dZ} \Delta Z \right)^2 + \dots}$$

В частности, при $A = C \frac{X^\alpha \cdot Y^\beta \cdot \dots}{Z^\gamma}$ имеем:
$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{1}{f} \sqrt{\left(\alpha \frac{\Delta X}{X} \right)^2 + \left(\beta \frac{\Delta Y}{Y} \right)^2 + \left(\gamma \frac{\Delta Z}{Z} \right)^2 + \dots}$$

Таблица Г.1

№	Вид функции $R=f(X,Y,Z)$	Абсолютная погрешность (ε)	Относительная погрешность, $Q = \varepsilon / R$
1	$A X + B Y$	$\sqrt{A^2 \varepsilon_X^2 + B^2 \varepsilon_Y^2}$	$\frac{\sqrt{A^2 \varepsilon_X^2 + B^2 \varepsilon_Y^2}}{AX + BY}$
2	$A X - B Y$	$\sqrt{A^2 \varepsilon_X^2 + B^2 \varepsilon_Y^2}$	$\frac{\sqrt{A^2 \varepsilon_X^2 + B^2 \varepsilon_Y^2}}{AX - BY}$
3	$AX+BY+CZ$	$\sqrt{A^2 \varepsilon_X^2 + B^2 \varepsilon_Y^2 + C^2 \varepsilon_Z^2}$	$\frac{\sqrt{A^2 \varepsilon_X^2 + B^2 \varepsilon_Y^2 + C^2 \varepsilon_Z^2}}{AX + BY + CZ}$
4	$X Y$	$\sqrt{(\bar{X})^2 \varepsilon_Y^2 + (\bar{Y})^2 \varepsilon_X^2}$	$\sqrt{\frac{\varepsilon_X^2}{(\bar{X})^2} + \frac{\varepsilon_Y^2}{(\bar{Y})^2}}$
5	$XY Z$	$\sqrt{(\bar{Y})^2 (\bar{Z})^2 \varepsilon_X^2 + (\bar{Z})^2 (\bar{X})^2 \varepsilon_Y^2 + (\bar{X})^2 (\bar{Y})^2 \varepsilon_Z^2}$	$\sqrt{\frac{\varepsilon_X^2}{\bar{X}^2} + \frac{\varepsilon_Y^2}{\bar{Y}^2} + \frac{\varepsilon_Z^2}{\bar{Z}^2}}$
6	X / Y	$\frac{\sqrt{\bar{Y}^2 \varepsilon_X^2 + \bar{X}^2 \varepsilon_Y^2}}{\bar{Y}^2}$	$\sqrt{\frac{\varepsilon_X^2}{(\bar{X})^2} + \frac{\varepsilon_Y^2}{(\bar{Y})^2}}$
7	$X / X + Y$	$\frac{\sqrt{\bar{Y}^2 \varepsilon_X^2 + \bar{X}^2 \varepsilon_Y^2}}{(\bar{X} + \bar{Y})^2}$	$\frac{\sqrt{\bar{Y}^2 \varepsilon_X^2 + \bar{X}^2 \varepsilon_Y^2}}{X(\bar{X} + \bar{Y})}$
8	$XY + Z$	$\sqrt{\bar{Y}^2 \varepsilon_X^2 + \bar{X}^2 \varepsilon_Y^2 + \varepsilon_Z^2}$	$\frac{\sqrt{\bar{Y}^2 \varepsilon_X^2 + \bar{X}^2 \varepsilon_Y^2 + \varepsilon_Z^2}}{X \cdot \bar{Y} + \bar{Z}}$

Библиография

- Зайдель А.Н. Элементарные оценки погрешностей измерений. - Л, 1968.
- Кассандро́ва О.Н., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений. - М, 1970.
- Котельников Р.Б. Статистическая обработка экспериментальных данных. Вып. 7 (33), М, 1960.
- Налимов В.В. Применение математической статистики при анализе вещества. - М, 1960.

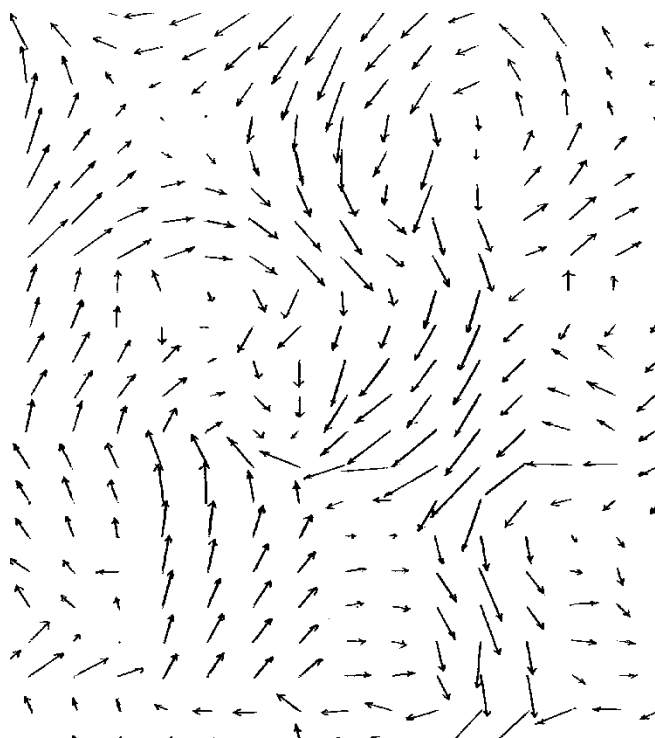
Минобрнауки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования

«Уральский государственный горный университет»

В. Б. ВИНОГРАДОВ, К. В. ВАНДЫШЕВА

ТЕОРИЯ ПОЛЯ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ



Екатеринбург – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	4
Векторное поле.....	5
Дифференциальные операторы.....	10
Напряженность векторного поля.....	17
Потенциал поля.....	26
Вихревое поле.....	32
Поле поляризующихся сред.....	32
Уравнение Лапласа.....	41
Потенциал двумерных тел.....	49
Намагничивание тел с высокой магнитной восприимчивостью.....	50
Учет взаимного влияния тел с высокой намагниченностью.....	53
Электрическое поле постоянного тока.....	56
Проводящий шар в поле точечного источника тока.....	60
Магнитное поле постоянного тока.....	62
Переменное электромагнитное поле.....	71
Волновые уравнения.....	78
Элементы теории упругости.....	85
Упругие волны.....	91
Тепловое поле.....	98
Литература.....	109

ПРЕДИСЛОВИЕ

Существующие учебники и учебные пособия по рассматриваемой дисциплине опубликованы более 15 лет назад и не соответствуют новым учебным программам. Они написаны электроразведчиками, в этих учебных изданиях преобладает описание электрических полей. Как правило, в них не рассматривается тепловое поле, количество измерений и приложений в геологии и геофизике которого очень быстро растет. Обучение студентов специальности «Геофизические методы исследования скважин» требует равного освещения теории всех полей, применяемых в геофизике.

Данное пособие в значительной степени отражает содержание курса Овчинникова И. К, у которого учился автор. С благодарностью автор вспоминает встречи с Е. Г. Булахом, автором одного из учебников по теории поля. Однако за отбор материала учебного пособия полностью отвечает автор. Формулы в учебном пособии приводятся в единицах СГСЭ и СГСМ, иногда в единицах, используемых в практической деятельности.

Быстрое развитие компьютерных технологий оказывает влияние на все стороны нашей жизни, в том числе на освоение теоретических дисциплин. Поэтому в пособии приводятся примеры решения задач с помощью математических пакетов.

Выражаю свою благодарность И. В. Гордеевой за помощь в работе. Благодарю также студентов групп ГИС-09 и РФ-09.

Замечания прошу направлять по адресу: 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, д. 30, УГГУ, факультет геологии и геофизики, кафедра геофизики.

ВЕКТОРНОЕ ПОЛЕ

При внесении материального объекта в некоторое пространство он начинает оказывать влияние на окружающие его объекты, которое проявляется в действии механических (пондеромоторных) или иных сил. При рассмотрении физических явлений удобно считать, что силы, воздействующие на объект, существуют независимо от того, вносим мы его в поле или нет. Мы говорим, что объекты создают поле и являются источниками физического поля. Задача определения силового поля состоит в определении векторной величины, характеризующей силу в каждой точке.

Для качественного и количественного описания полей вводят систему координат и используют скаляры, векторы, тензоры и иные математические объекты и структуры. Наиболее часто используют декартовую (X,Y,Z) , цилиндрическую (R,Φ,Z) и сферическую (R,Φ, Θ) системы координат.

Вектором в алгебре называют упорядоченную тройку чисел: $\{X,Y,Z\}$. Иное определение вектора – направленный отрезок. Для характеристики вектора необходимо указывать его длину и направление либо три проекции на оси координат. Вектор в декартовой системе координат определяют проекциями на соответствующие оси $\{a_x, a_y, a_z\}$. В дальнейшем векторы будем обозначать $A, \vec{a}, \vec{A}, \{a_x, a_y, a_z\}$.

Радиус-вектором $\vec{R}$ назовем вектор, начало находится в точке O с источником поля, координаты (x_0, y_0, z_0) , а конец в точке наблюдения с координатами (x, y, z) , т. е. $\vec{R}\{x - x_0, y - y_0, z - z_0\}$ (рис. 1). Для векторов определены операции сложения, вычитания, скалярного произведения, векторного произведения и другие.

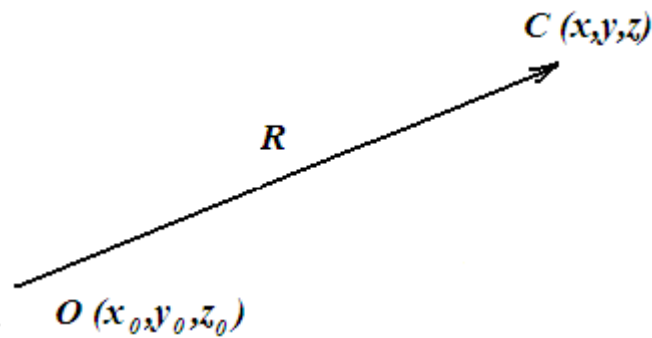


Рис. 1. К определению понятия радиуса-вектора

Операция сложения векторов:

$$\vec{a} + \vec{b} = \vec{i}(a_x + b_x) + \vec{j}(a_y + b_y) + \vec{k}(a_z + b_z), \quad |\vec{a} + \vec{b}| = \sqrt{a^2 + 2ab \cos \varphi + b^2},$$

где φ – угол между векторами.

Вычитание векторов

$$\vec{a} - \vec{b} = \vec{i}(a_x - b_x) + \vec{j}(a_y - b_y) + \vec{k}(a_z - b_z), \quad |\vec{a} - \vec{b}| = \sqrt{a^2 - 2ab \cos \varphi + b^2}$$

Умножение вектора на число:

$$\alpha \vec{b} = \{\alpha b_x, \alpha b_y, \alpha b_z\}.$$

Скалярное произведение двух векторов:

$$(\vec{a} \vec{b}) = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z.$$

Векторное произведение двух векторов определяют выражением:

$$\vec{a} \times \vec{b} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix} = \vec{i}(a_y b_z - a_z b_y) - \vec{j}(a_x b_z - a_z b_x) + \vec{k}(a_x b_y - a_y b_x).$$

Угол между векторами:

$$\varphi = \arccos \frac{a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \sqrt{b_x^2 + b_y^2 + b_z^2}}.$$

Вычислим скалярное и векторное произведения векторов $\vec{g}(1,3,4)$, $\vec{d}(2,6,5)$,

$\vec{f}(y^2, \ln z, \sin x)$, $\vec{h}(e^x, \frac{1}{y}, z)$:

$$(\vec{g} \vec{d}) = 2 + 18 + 20 = 40, \quad \vec{g} \times \vec{d} = -9\vec{i} + 3\vec{j}, \quad (\vec{f} \vec{h}) = y^2 e^x + \frac{\ln z}{y} + z \sin x,$$

$$\vec{f} \times \vec{h} = \vec{i}(z \ln z - \frac{\sin x}{y}) - \vec{j}(y^2 z - e^x \sin x) + \vec{k}(y - e^x \ln z).$$

При теоретических рассуждений и вычислениях часто векторные уравнения записывают в проекциях на оси координат. Проекции векторного уравнения

$$\vec{E} = \int_V \frac{\rho \vec{R} dV}{R^3} \text{ на оси координат имеют вид:}$$

$$E_x = \int_V \frac{\rho(x-x_0)dV}{R^3}, E_y = \int_V \frac{\rho(y-y_0)dV}{R^3}, E_z = \int_V \frac{\rho(z-z_0)dV}{R^3}.$$

В настоящее время математические операции с векторами удобно проводить с помощью математических пакетов Matlab и других.

При изучении физических полей устанавливают соотношения между двумя векторными величинами. Как правило, коэффициент пропорциональности является физическим параметром среды (плотность, скорость распространения волн, электропроводность). Такие физические параметры горных пород часто зависят от направления. Взаимосвязь в матричном виде принимает вид:

$$\vec{Q} = \begin{vmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{vmatrix} \vec{D}, \quad \vec{Q} = K \vec{D}.$$

Девять коэффициентов, записанные в виде матрицы в математике, называют тензором второго порядка. Направления векторов в левой и правой частях в вышеприведенных уравнениях не совпадают. Скалярные величины называют тензором нулевого порядка. Например, плотность является коэффициентом пропорциональности между объемом и массой. Компоненты тензора зависят от выбора системы координат. Тензорами второго порядка являются электропроводность и магнитная восприимчивость.

При решении задач теории полей часто встречается интеграл одного типа, который имеет геометрическую интерпретацию – **телесный угол**. Телесный угол Ω , под которым видна из точки наблюдения O поверхность S , определяют формулой (рис. 2):

$$\Omega = \int_S \frac{\cos \alpha}{R^2} dS,$$

где α – угол между радиусом-вектором и внешней нормалью $\vec{n}$ к поверхности S , для которой вычисляется телесный угол.

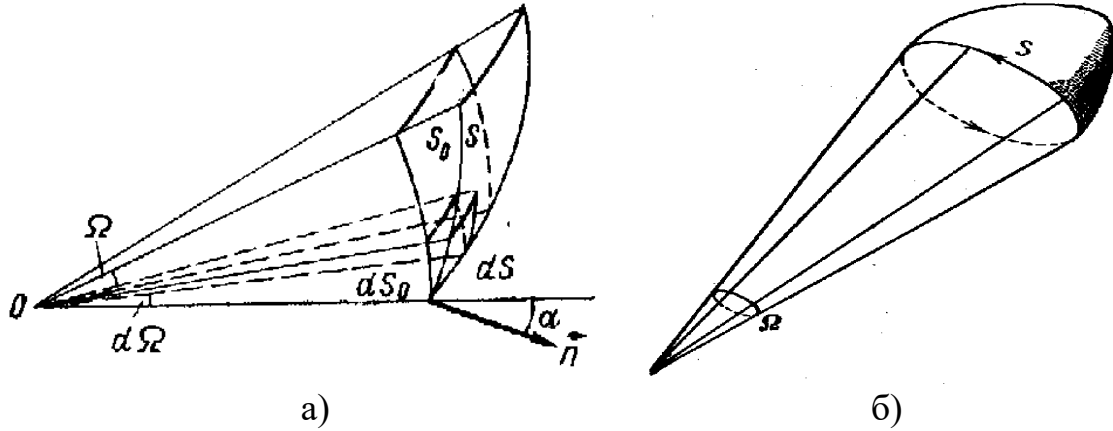


Рис. 2. К определению понятия телесного угла: (а), (б)

Телесный угол, под которым видно все пространство, равен 4π . Телесный угол, под которым видна некоторая поверхность, определяют по аналогии с плоским углом. В некоторых случаях телесный угол определяется легко. Телесный угол, под которым видна грань куба из его центра, равен $\Omega = 4\pi/6 = 2\pi/3$. Телесный угол, под которым видна из центра грань пентагондодекаэдра или ромбододекаэдра, равен $\Omega = 4\pi/12 = \pi/3$. Из сферической тригонометрии известно, что трехгранный угол равен сумме образующих его двугранных углов минус π . Следовательно, телесный угол, под которым видно основание пирамиды в виде выпуклого многоугольника равен $\Omega = \sum_{i=1}^n A_i - \pi(n-2) = 2\pi - \sum_{i=1}^n (\pi - A_i)$, где A_i – двугранные углы пирамиды, n – число сторон многоугольника. Каждое слагаемое в последнем выражении вычисляют:

$$\pi - A_i = \arccos \frac{\vec{r}_i \times \vec{r}_{i+1}}{|\vec{r}_i| |\vec{r}_{i+1}|} = \arccos \frac{r_{ix}r_{i+1x} + r_{iy}r_{i+1y} + r_{iz}r_{i+1z}}{\sqrt{(r_{ix}^2 + r_{iy}^2 + r_{iz}^2)(r_{i+1x}^2 + r_{i+1y}^2 + r_{i+1z}^2)}},$$

$$r_i = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ x - x_i & y - y_i & z - z_i \\ x_i - x_{i-1} & y_i - y_{i-1} & 0 \end{vmatrix}, \quad r_{i+1} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ x - x_{i+1} & y - y_{i+1} & z - z_{i+1} \\ x_{i+1} - x_i & y_{i+1} - y_i & 0 \end{vmatrix}.$$

Для любой поверхности можно выполнить триангуляцию (разбиение на треугольники) и вычислить телесный угол как сумму углов видимости всех

треугольников. Полученная формула позволяет вычислить физические поля, например гравитационное поле горизонтальной пластинки в виде многоугольника $g = k\sigma\Omega$, где k – гравитационная постоянная.

Телесный угол при вершине сферического треугольника ΔABC определяют по формуле Люилье:

$$\operatorname{tg} \frac{\Omega}{4} = \left(\operatorname{tg} \frac{l}{2} \operatorname{tg} \frac{l-a}{2} \operatorname{tg} \frac{l-b}{2} \operatorname{tg} \frac{l-c}{2} \right),$$

где a, b, c – длины сторон сферического треугольника, $2l = a + b + c$. Если радиус сферы равен 1:

$$a = \arccos \frac{\vec{B} \times \vec{C}}{|\vec{B}| |\vec{C}|}, \quad b = \arccos \frac{\vec{A} \times \vec{C}}{|\vec{A}| |\vec{C}|}, \quad c = \arccos \frac{\vec{B} \times \vec{A}}{|\vec{B}| |\vec{A}|}.$$

Вычислим телесный угол, под которым из вершины видно основание прямого конуса (рис. 3, а):

$$\Omega = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^a \frac{hrdr}{(r^2 + h^2)^{3/2}} = 2\pi h \left(\frac{1}{h} - \frac{1}{\sqrt{a^2 + h^2}} \right).$$

Этот интеграл можно вычислить с помощью математических пакетов, для этого достаточно вычислить внутренний интеграл:

$$\int \frac{r}{(r^2 + h^2)^{3/2}} dr = -\frac{1}{\sqrt{h^2 + r^2}}.$$

Осталось лишь подставить пределы и умножить на величину первого интеграла 2π и h .

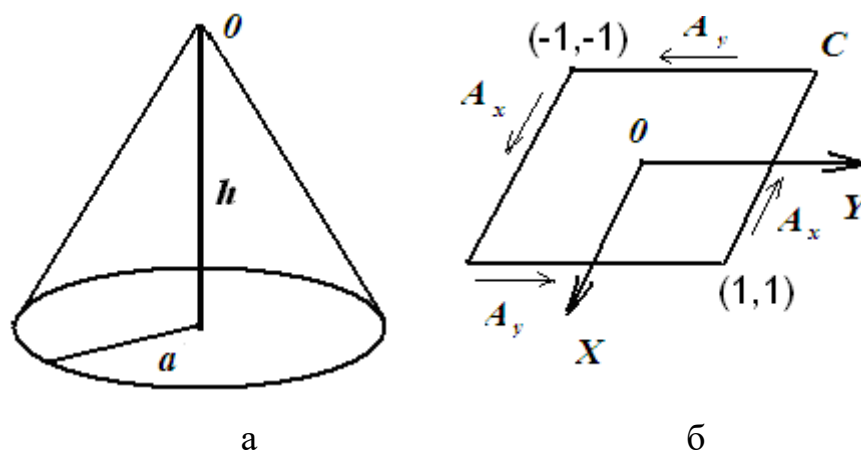


Рис. 3. К вычислению телесного угла при вершине прямого конуса (а), циркуляции вектора по контуру (б)

Циркуляцией вектора по контуру L называют интеграл по замкнутому контуру от проекции вектора на касательную к L :

$$\oint_L A_L dL.$$

Вычислим циркуляцию вектора $\vec{A}\left\{\frac{-2y}{x^2+1}, \frac{2x}{y^2+1}\right\}$. В качестве контура интегрирования C (рис. 3, б) выберем прямоугольник с вершинами $(-1,-1)$, $(1,-1)$, $(1,1)$, $(-1,1)$:

$$\oint_C A_l dl = \int_{-1}^1 \frac{2dx}{x^2+1} + \int_{-1}^1 \frac{2dy}{y^2+1} + \int_{-1}^1 \frac{2dx}{x^2+1} + \int_{-1}^1 \frac{2dy}{y^2+1} = 8 \arctg x \Big|_{-1}^1 = 4\pi.$$

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ОПЕРАТОРЫ

Градиентом скалярного поля f называют вектор $\text{grad } f$:

в декартовой системе координат $\text{grad } f = \vec{i} \frac{\partial f}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial f}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial f}{\partial z}$;

в цилиндрической системе координат $\text{grad } f = \frac{\partial f}{\partial r} \vec{i}_r + \frac{1}{r^2} \frac{\partial f}{\partial \varphi} \vec{i}_\varphi + \frac{\partial f}{\partial z} \vec{i}_z$;

в сферической системе координат $\text{grad } f = \frac{\partial f}{\partial r} \vec{i}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial \theta} \vec{i}_\theta + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial f}{\partial \varphi} \vec{i}_\varphi$.

Градиент характеризует изменчивость поля в малой окрестности точки, его можно назвать вектором пространственной скорости поля. Он характеризует поведение поля вблизи выбранной точки. Направление градиента есть направление наиболее быстрого возрастания поля (рис. 4), а его величина равна максимальному значению производной из всех возможных значений в данной точке. Градиент не зависит от выбранной системы координат (инвариант), производная функции по любому направлению равна проекции градиента на это направление:

$$\frac{\partial U}{\partial l} = \text{grad}_l U$$

Вычислим градиент функции, обратной радиусу-вектору $\frac{1}{R}$:

$$\text{grad} \frac{1}{R} = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{R} \right) + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{R} \right) + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{R} \right) = - \left(\vec{i} \frac{x-x_0}{R^3} + \vec{j} \frac{y-y_0}{R^3} + \vec{k} \frac{z-z_0}{R^3} \right).$$

Те же вычисления можно осуществить с помощью пакета Mathematica:

$$\begin{aligned} D \left[\frac{1}{((x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2)^{1/2}}, x \right] &= - \frac{x-x_0}{((x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2)^{3/2}}; \\ D \left[\frac{1}{((x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2)^{1/2}}, y \right] &= - \frac{y-y_0}{((x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2)^{3/2}}; \\ D \left[\frac{1}{((x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2)^{1/2}}, z \right] &= - \frac{z-z_0}{((x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2)^{3/2}}. \end{aligned}$$

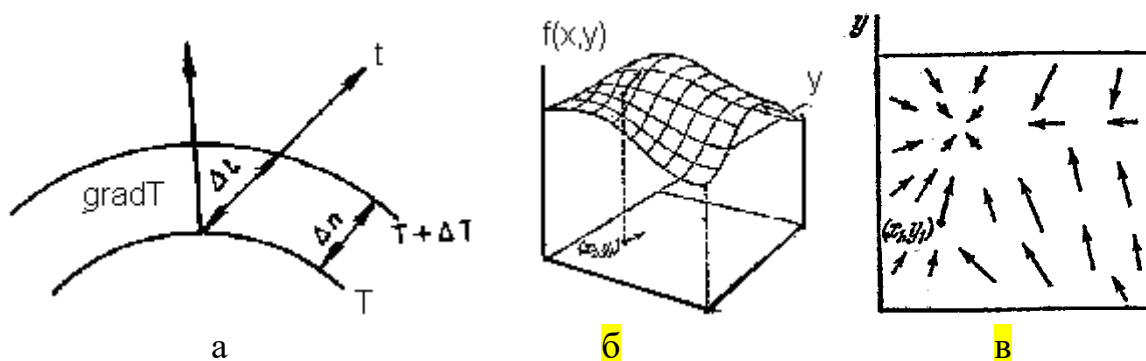


Рис. 4. К определению понятия градиента (а). График скалярной функции (б) и план ее градиента (в)

Вычислим вертикальный градиент гравитационного поля Земли, считая ее шаром. Поле шара $g = \frac{kM}{r^2}$. Вертикальный градиент направлен радиально:

$$\frac{\partial g}{\partial r} = - \frac{2kM}{r^3} = - \frac{6.67 \times 10^{-11} \times 5.976 \times 10^{24}}{(6.367 \times 10^6)^3} = 3.089 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-2}.$$

Предел отношения поверхностного интеграла нормальной по отношению к поверхности S составляющей вектора к объему этой поверхности, при стремлении последнего к нулю $\lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\iint_S a_n dS}{\Delta V}$ называют **расходимостью**, или

дивергенцией. Расходимость характеризует плотность источников поля.

Расходимость вектора в декартовых координатах может быть вычислена по формуле:

$$\text{div} \vec{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z}.$$

В цилиндрической системе координат дивергенция

$$\operatorname{div} \vec{D} = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial(rD_r)}{\partial r} + \frac{\partial D_\varphi}{\partial \varphi} + r \frac{\partial D_z}{\partial z} \right).$$

В сферической системе координат расходимость определена выражением:

$$\operatorname{div} \vec{D} = \frac{1}{r^2 \sin \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial(r^2 D_r)}{\partial r} + r \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta D_\theta) + r \frac{\partial D_\varphi}{\partial \varphi} \right).$$

Вычислим дивергенцию градиента скалярной функции f :

$$\operatorname{div} \operatorname{grad} f = \operatorname{div} \left(\vec{i} \frac{\partial f}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial f}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial f}{\partial z} \right) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = \Delta f,$$

где $\Delta = \operatorname{div} \operatorname{grad} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа (лапласиан).

Уравнение $\Delta U = 0$ называют уравнением Лапласа.

Предел отношения интеграла по замкнутому контуру от проекции вектора поля на касательную к контуру к площади, охватываемой контуром, при стремлении последней к нулю:

$$\lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\oint \vec{a}_l dl}{\Delta S} = \operatorname{rot} \vec{a}$$

называют **вихрем** или **ротором** вектора.

Этот предел называют также плотностью циркуляции вектора. На рис. 5 приведены 6 планов векторов полей со значением их расходимости и вихря. В каждом случае приведен контур, который позволяет оценить расходимость и вихрь.

Ротор не зависит от выбора системы координат. Вихрь и дивергенция-инварианты поля относительно системы координат. Вихрь и ротор векторного поля однозначно определяют поле с точностью до постоянного слагаемого. Это свойство двух дифференциальных операторов позволило Максвеллу всего четырьмя уравнениями описать электромагнитное поле.

Вихрь вектора в декартовых координатах имеет вид:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & E_y & E_z \end{vmatrix} = \vec{i} \left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \right) - \vec{j} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) + \vec{k} \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right),$$

в сферических координатах:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = \left(\frac{1}{r \sin \Theta} \frac{\partial E_r}{\partial \varphi} - \frac{1}{r} \frac{\partial(r E_\varphi)}{\partial r} \right) \vec{e}_\Theta + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial E_\Theta}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial E_r}{\partial \Theta} \right) \vec{e}_\varphi + \frac{1}{r \sin \Theta} \left(\frac{\partial(\sin \Theta E_\varphi)}{\partial \Theta} - \frac{\partial E_\Theta}{\partial \varphi} \right) \vec{e}_r,$$

в цилиндрических координатах:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial E_\varphi}{\partial z} \right) \vec{e}_r + \left(\frac{\partial E_r}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial r} \right) \vec{e}_\varphi + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial(E_\varphi r)}{\partial r} - \frac{\partial E_r}{\partial \varphi} \right) \vec{e}_z.$$

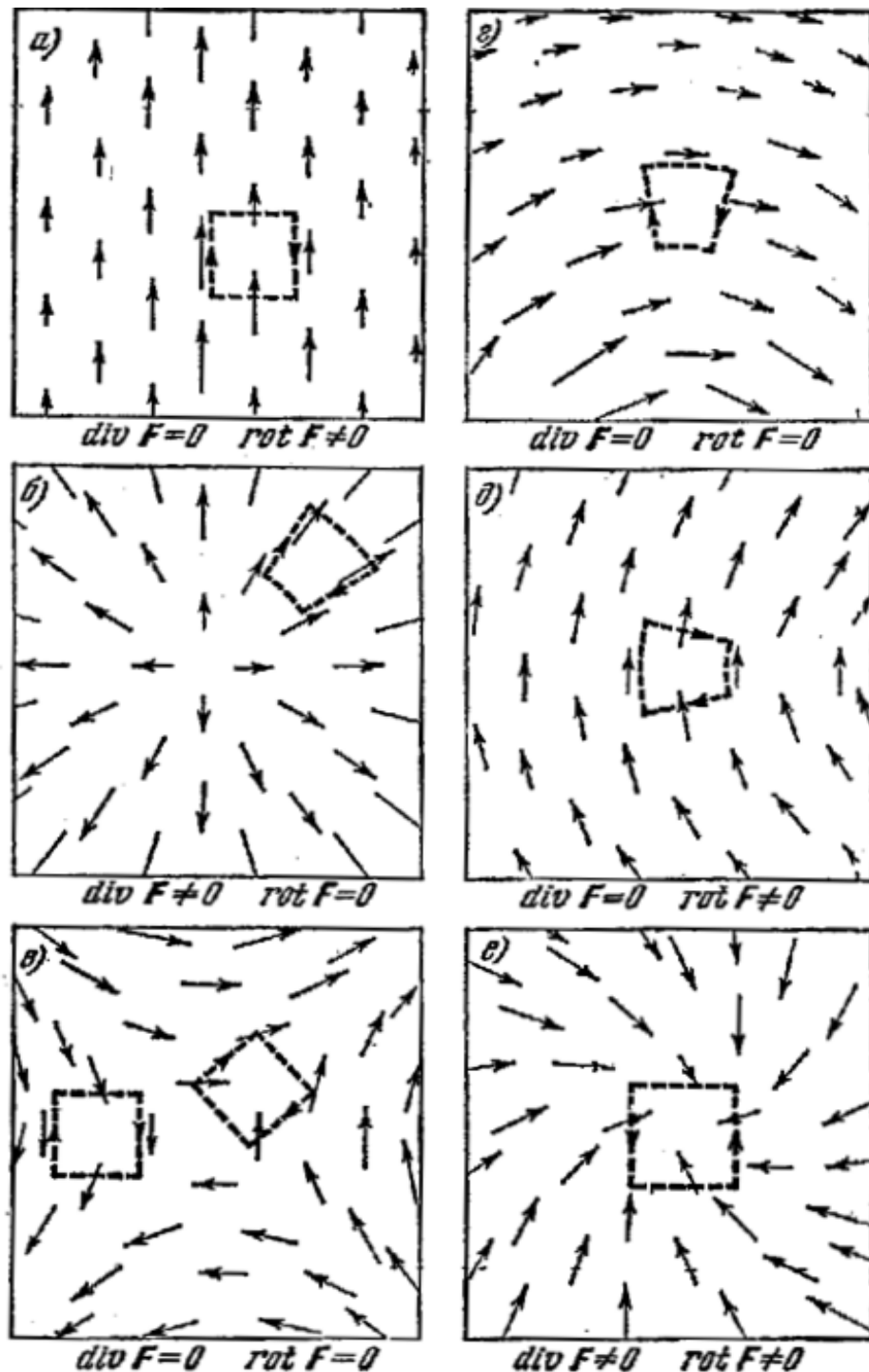


Рис. 5. Дивергенция и вихрь различных векторных полей

Вычислим величину $\text{rot rot } \vec{A}$:

$$\text{rot rot } \vec{A} = \text{grad div } \vec{A} - \Delta \vec{A}.$$

Градиент, расходимость и вихрь часто называют пространственными производными.

Оператором Гамильтона называют дифференциальный оператор (оператор набла):

$$\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}.$$

Дифференциальные операторы позволяют компактно записывать уравнения, описывающие физические поля:

$$Q - \lambda C + D\Delta C - \text{div}(C\vec{v}) = \frac{\partial C}{\partial t} \text{ — уравнение переноса радиоактивного газа;}$$

$$\Delta T + F = c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \text{ — уравнение распределения температуры;}$$

$$\Delta U - \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + b \frac{\partial U}{\partial t} + CU = -F \text{ — телеграфные уравнения;}$$

$$\Delta \vec{U}_1 - \frac{1}{v_p^2} \frac{\partial^2 \vec{U}_1}{\partial t^2} = -\frac{1}{\rho v_p^2} \vec{F}_1 \text{ — уравнение распространения продольных волн и}$$

другие.

Определенную в области задания уравнения действительную функцию, непрерывную вместе со своими частными производными, входящими в уравнение, и обращающую его в тождество, называют регулярным решением. Решения, перестающие быть регулярными в изолированных точках или множествах особого вида, называют фундаментальными.

При проведении преобразований для решения задачи дифференциальные операторы надо воспринимать так же, как таблицу умножения или таблицу сложения, т.е. как формальное правило соответствия одного выражения другому.

ЗАДАЧИ

1. Найдите градиент функций $1/R^3$ и $1/R$.
2. Докажите тождество $\text{div } \vec{A} \times \vec{B} = (\vec{B}, \text{rot } \vec{A}) - (\vec{A}, \text{rot } \vec{B})$.

3. Вычислите телесный угол, под которым из вершины пирамиды высотой $2a$ видно ее основание, если основание пирамиды – квадрат со стороной a . Решение проведите двумя способами.

4. Вычислите телесный угол при вершине прямого конуса высотой $3a$ и диаметром основания a .

5. Вычислите расхожимость градиента функции $U = x^3 y^2 z$.

6. Вычислите дивергенцию векторов $\vec{R}$ и $\vec{A} = xy\vec{i} + yz\vec{j} + xz\vec{k}$.

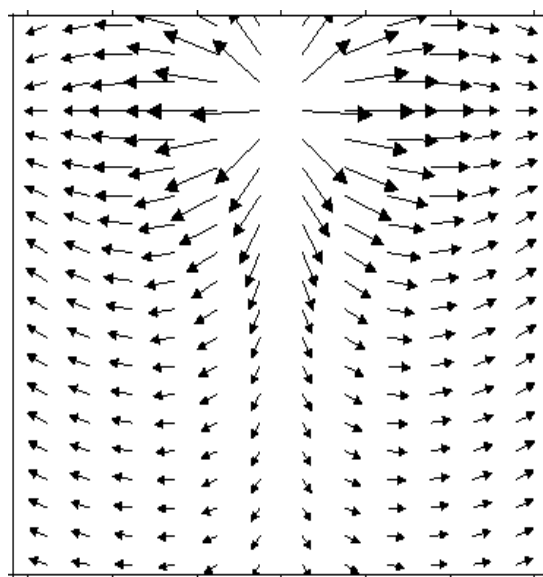
7. Найдите циркуляцию вектора $\vec{A} = y\vec{i}$ по окружности $x = a \cos t$, $y = a + a \sin t$, лежащего в плоскости XOY , $z=0$.

8. Найдите $\text{rot rot } \vec{A}$.

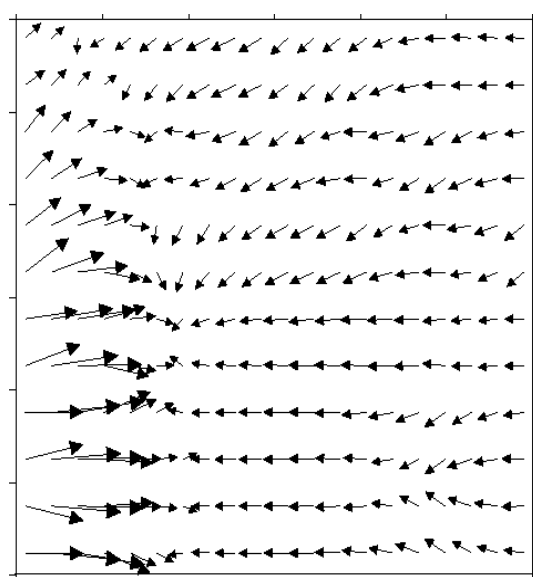
9. Найдите вихрь вектора $\vec{R}$.

10. Докажите, что $\text{rot } \vec{A} + \text{rot } \vec{B} = \text{rot } (\vec{A} + \vec{B})$.

11. Вычислите вихрь векторного произведения радиус-вектора $\vec{R}$ и постоянного вектора $\vec{A}$.



а



б

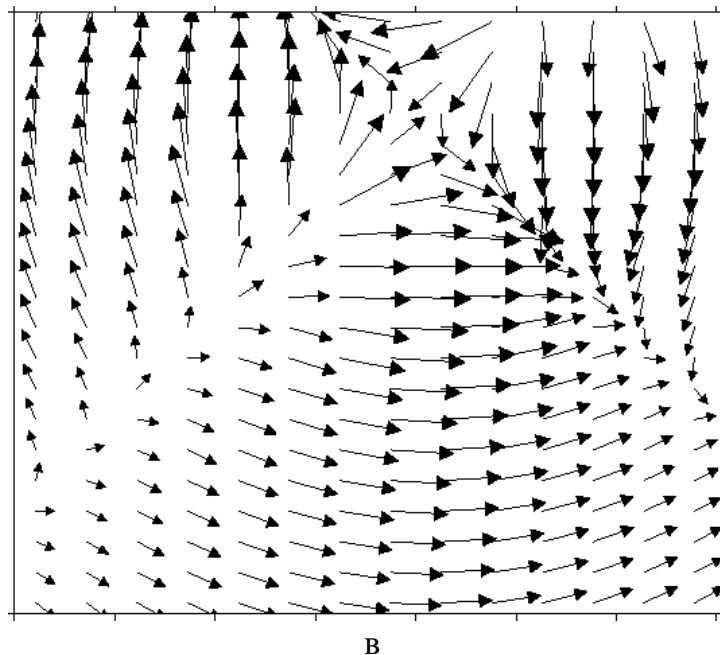


Рис. 6. Векторные поля:

12. Оцените вихрь и расходимость векторных полей представленных на рис. 6.

НАПРЯЖЕННОСТЬ ВЕКТОРНОГО ПОЛЯ

В теоретических рассуждениях рассматривают идеализированные источники поля (рис. 7):

1. **Точечный источник** – заряд в точке, объем которой равен нулю. Такое приближение удобно при рассмотрении поля на расстояниях во много раз превосходящих собственные размеры источника (см. рис. 7, а, б).

2. **Линейный источник** – заряд, распределенный вдоль некоторой линии. Площадь поперечного сечения источника равна нулю. Источник принято характеризовать линейной плотностью заряда χ , которая равна заряду, линии длиной 1.

3. **Поверхностный источник** – заряд, распределенный по некоторой поверхности. Толщина поверхности равна нулю. Источник характеризуют поверхностной плотностью зарядов, т.е. зарядом участка поверхности площадь которого равна 1.

4. **Объемный источник** – заряд, распределенный в некоторой части пространства, ограниченной некоторой замкнутой поверхностью. Источнику приписывают объемную плотность заряда.

В геофизике измеряются различные характеристики физических полей: в магниторазведке модуль вектора индукции геомагнитного поля T , в гравиразведке – напряженность гравитационного поля g , в электроразведке (при измерении естественного поля) – потенциал U . Поэтому необходимо знать свойства и особенности каждой из измеряемых характеристик поля для различных источников.

Напряженностью гравитационного и электрического полей называют силу, с которой поле действует на единичную массу или единичный положительный заряд. Законы изменения напряженности гравитационного и электростатического полей точечных источников установлены опытным путем Кавендишем и Кулоном. Их математическая запись одинакова с точностью до обозначений:

$$E = \frac{\varepsilon Q}{R^2}, \quad g = \frac{kM}{R^2} \text{ или в векторной форме } \vec{E} = \frac{\varepsilon Q \vec{R}}{R^3}, \quad \vec{g} = \frac{kM \vec{R}}{R^3}.$$

Направление вектора напряженности точечного источника радиальное. Принято считать, что если $E > 0$, то вектор направлен от источника, если $E < 0$, то векторы направлены к источнику поля. Однако между источниками гравитационного и электрического полей существенное различие: не существует тел с отрицательной массой. Вектор напряженности гравитационного поля всегда направлен к источнику. На основе этих результатов можно получить законы изменения напряженности поля линейного, поверхностного и объемного источника. Для этого достаточно разбить изучаемый объект на элементарные источники и проинтегрировать выражение для точечного источника.

Теоретические рассуждения проводят в векторной форме, вычисления осуществляют в скалярной форме, т.е. используют запись уравнений в проекциях на оси координат. В декартовой системе проекции вектора напряженности на оси координат

$$E_x = \frac{Q(x - x_0)}{R^3}, \quad E_y = \frac{Q(y - y_0)}{R^3}, \quad E_z = \frac{Q(z - z_0)}{R^3}.$$

Экспериментальным путем установлен **принцип суперпозиции**: вектор напряженности совокупности точечных источников равен векторной сумме векторов напряженности отдельных источников (рис. 7, в, г):

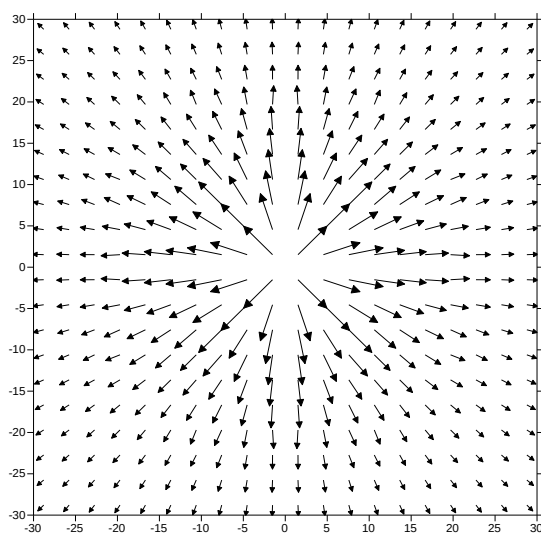
$$\vec{E} = \sum_{i=1}^N \frac{Q_i \vec{R}_i}{R_i^3}.$$

Свойства напряженности векторного поля точечного источника:

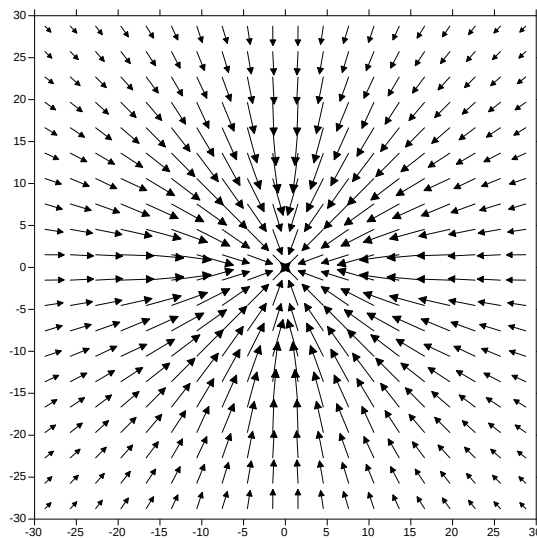
1. Напряженность поля точечного источника непрерывна вне источника.
2. При стремлении точки вычисления к бесконечности напряженность поля стремиться к нулю:

$$\lim_{R \rightarrow \infty} E = 0.$$

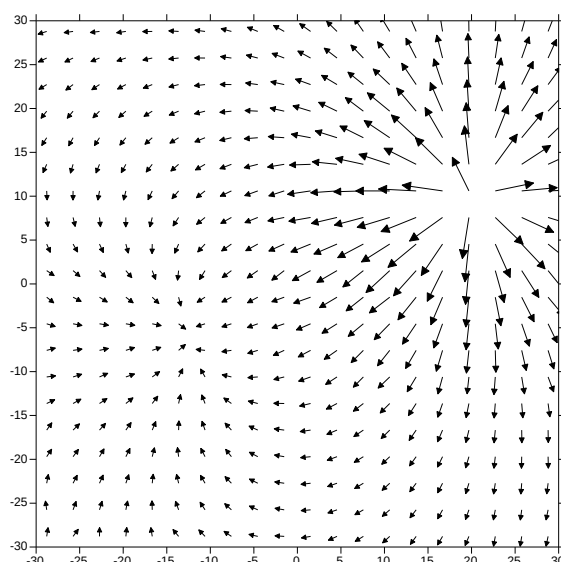
3. При неограниченном приближении к источнику напряженность поля неограниченно возрастает.



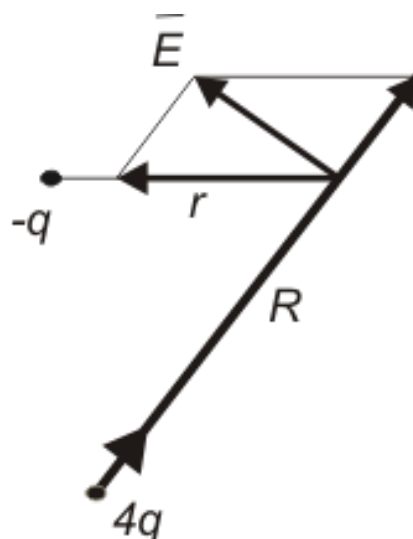
а



б



В



Г

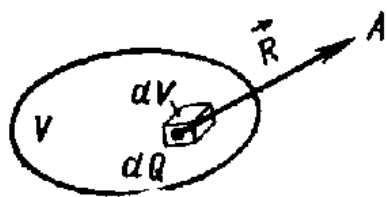
Рис. 7. Векторы напряженности поля точечных источников: положительного точечного заряда (а); отрицательного заряда (б); двух разноименных зарядов (в, г)

Напряженность поля линейных, поверхностных и объемных источников. Для определения полей этих объектов их разбивают на элементарные источники и на основе принципа суперпозиции интегрированием получают формулы вычисления векторов напряженности полей (рис. 8).

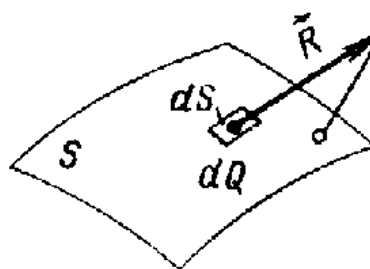
Напряженность поля линейного источника описывается выражениями:

$$\vec{E} = \int_l \chi \frac{\vec{R}}{R^3} dl, \quad E_x = \int_l \chi \frac{x-x_0}{R^3} dl, \quad E_y = \int_l \chi \frac{y-y_0}{R^3} dl, \quad E_z = \int_l \chi \frac{z-z_0}{R^3} dl,$$

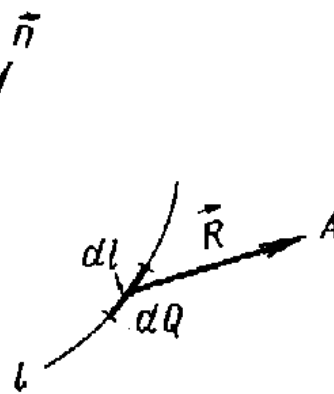
где χ – линейная плотность зарядов (диполей, масс). Эта величина численно равна заряду линии единичной длины (массе линии длиной 1).



а



б



в

Рис. 8. К определению объемного (а), поверхностного (б) и линейного (в) источников

Свойства напряженности поля линейного источника рассмотрим на примере кольца (рис. 9). Поле вычислим на оси кольца. Из симметрии задачи следует, что вектор напряженности в точках оси диска направлен вдоль этой оси, т.е. $E=E_z$:

$$E_z = \chi \int_0^{2\pi} \frac{rd\varphi}{(r^2 + z^2)^{3/2}} = 4\pi\chi \frac{1}{\sqrt{r^2 + z^2}}.$$

Напряженность поля линейного источника стремится к нулю при удалении от источника. Она всюду конечна и непрерывна вне источника, а при приближении к источнику стремиться к бесконечности.

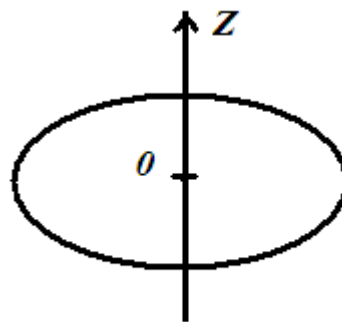


Рис. 9. Линейный источник кольцевой формы

Напряженность поверхностного источника с плотностью поверхностных зарядов (масс, диполей) σ имеет вид:

$$\vec{E} = \int_S \sigma \frac{\vec{R}}{R^3} ds.$$

Свойства напряженности поля поверхностного источника поля рассмотрим на примере диска радиуса a с плотностью поверхностных зарядов σ . Поле вычислим на оси диска (рис. 10). Начало полярной системы координат поместим в центре диска. Исходя из симметрии задачи вектор напряженности в точках, принадлежащих оси диска, направлен вдоль оси z , т.е. $E=E_z$:

$$E = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^a \frac{(z - z_0) r dr}{\left[(z - z_0)^2 + r^2 \right]^{3/2}} = -2\pi \sqrt{z^2 + r^2} \Big|_0^a.$$

Напряженность поверхностного поля вне источника всюду конечна, а при пересечении поверхности источника ее нормальная составляющая терпит разрыв $4\pi\sigma$. В остальной части пространства напряженность поля непрерывна, а при удалении от источника стремится к нулю (см. рис. 10, а).

Свойства напряженности поля объемных источников поля рассмотрим на примере вертикального кругового цилиндра (см. рис. 10, б) высотой $2h$ и радиусом основания a . Вычислим напряженность поля на оси цилиндра. Решение проведем в цилиндрической системе координат, которая отвечает симметрии задачи. Начало координат поместим в центр цилиндра, ось Z направим вдоль оси цилиндра. Из симметрии задачи следует, что вектор напряженности на оси цилиндра направлен вдоль этой оси:

$$E = E_z = \rho \int_{-h}^h dz_0 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^a \frac{r dr}{\left[r^2 + (z - z_0)^2 \right]^{3/2}} = 2\pi\rho \int_{-h}^h \frac{r dr}{\sqrt{r^2 + (z - z_0)^2}} = 2\pi\rho \sqrt{r^2 + (z - z_0)^2},$$

Далее необходимо рассмотреть два случая: для точки расчета, находящейся внутри цилиндра ($z < h$), и для точки расчета, расположенной вне цилиндра ($z > h$).

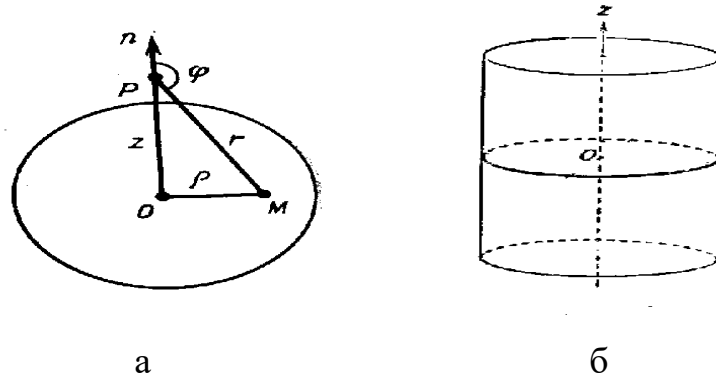


Рис. 10. К вычислению напряженности поля диска (а), вертикального кругового цилиндра (б)

В первом случае:

$$E = 2\pi\rho \left(\sqrt{a^2 + (z - h)^2} + z + h - \sqrt{a^2 + (z + h)^2} - (z - h) \right) = 2\pi \left(2h + \sqrt{a^2 + (z - h)^2} - \sqrt{a^2 + (z + h)^2} \right).$$

Во втором случае:

$$\begin{aligned}
 E &= 2\pi\rho\left[\sqrt{a^2 + (z - z_0)^2} - |z - z_0|\right] + 2\pi\rho\left[\sqrt{a^2 + (z - z_0)^2} - |z - z_0|\right] = \\
 &= 2\pi\rho\left(a - \sqrt{a^2 + (z - h)^2} + z + h - \sqrt{a^2 + (z + h)^2} - h + z - a\right) = \\
 &= 2\pi\rho\left(2z + \sqrt{a^2 + (z - h)^2} - \sqrt{a^2 + (z + h)^2}\right).
 \end{aligned}$$

Полученный результат показывает, что напряженность поля объемного источника всюду конечна, непрерывна и при удалении от источника стремится к нулю.

Обращение в бесконечность и нарушение непрерывности носят формальный характер и получаются только вследствие сделанных допущений, что существуют необъемные источники с бесконечно большой плотностью.

На практике очень часто строят модели среды, состоящие из параллелепипедов. В декартовой системе координат вычислим поле прямоугольного параллелепипеда. Вертикальная составляющая вектора напряженности поля:

$$\begin{aligned}
 E &= \rho \int_{-a}^a dx_0 \int_{-b}^b dy_0 \int_{-c}^c \frac{(z - z_0) dz_0}{((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2)^{3/2}} = \\
 &= -\rho \int_{-a}^a dx_0 \int_{-b}^b \frac{dy_0}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}} = \\
 &= \rho \int_{-a}^a \ln\left(y - y_0 + \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}\right) dx_0 = \\
 &= -\rho\left((x - x_0) \ln\left(y - y_0 + \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}\right) + \right. \\
 &\quad \left. + (y - y_0) \ln\left(x - x_0 + \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}\right) - \right. \\
 &\quad \left. - (z - z_0) \operatorname{arctg} \frac{(x - x_0)(y - y_0)}{(z - z_0)\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}}\right) \Big| \Big| \Big|.
 \end{aligned}$$

Потоком вектора напряженности через поверхность S (рис. 11 и 12) назовем величину

$$N = \int_S E_n dS,$$

где E_n – нормальная составляющая вектора напряженности поля к поверхности. Название «поток» заимствовано из гидродинамики, где эта величина имеет ясный физический смысл (рис. 11, б).

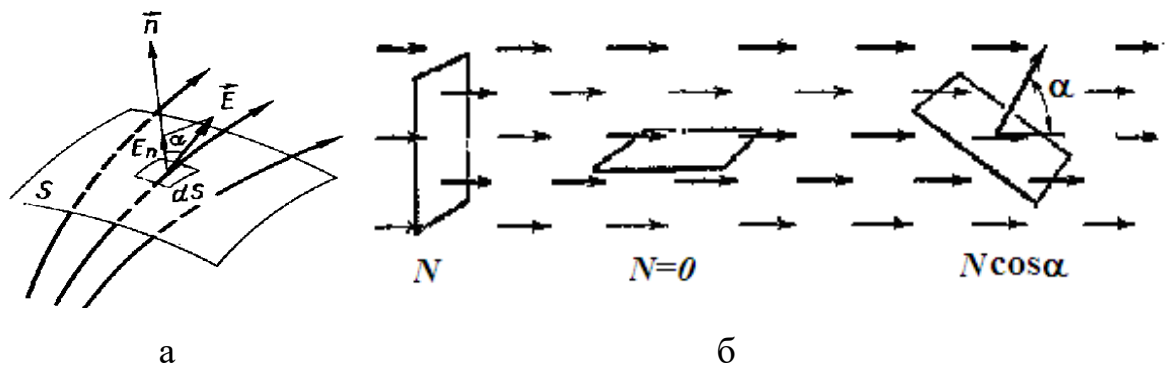


Рис. 11. К определению понятия потока

Поток вектора напряженности точечного источника через поверхность S можно записать в виде:

$$N = \int_S \frac{Q \cos \alpha dS}{R^2} = Q\Omega,$$

где Ω – телесный угол, под которым видна поверхность из точки, где располагается источник.

Таким образом, поток напряженности точечного источника через охватывающую его поверхность равен произведению заряда (массы) на телесный угол, под которым видна поверхность из точки, где располагается источник. Когда поле возбуждается не одним источником, поток вектора через произвольную замкнутую поверхность равен произведению 4π на величину заряда, расположенного внутри поверхности.

Если $N > 0$, то внутри замкнутой поверхности S имеются источники поля.

Если $N < 0$, то внутри замкнутой поверхности есть поглотители потока (например, поглотители тепла).

Если $N = 0$, то внутри замкнутой поверхности нет источников, либо мощность имеющихся источников равна мощности поглощения потока вектора.

Теорема Гаусса – Остроградского: поток вектора напряженности поля через замкнутую поверхность, охватывающую источник, равен $4\pi Q$, а через

поверхность, не охватывающую источник равен нулю. Теорема справедлива для любых источников поля. Теорема Гаусса – Остроградского может быть записана в дифференциальной форме:

$$\operatorname{Div} E = \begin{cases} 4\pi\rho & (\text{в точках с источниками}) \\ 0 & (\text{в точках без источников}). \end{cases}$$

Поток вектора через замкнутую поверхность, охватывающую источник, равен потоку того же вектора через сферу, охватывающую тот же источник (см. рис. 12).

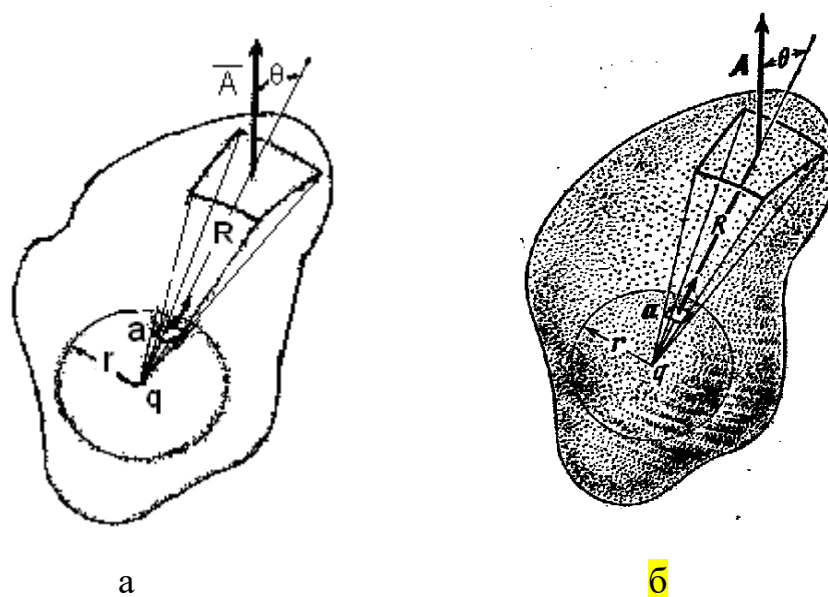


Рис. 12. Поток вектора через замкнутую поверхность равен потоку того же вектора через сферу:

При теоретических рассуждениях используются **формула Гаусса – Остроградского**:

$$\int_S E_n dS = \int_V \operatorname{div} \vec{E} dV,$$

формула Грина:

$$\int_C E_n dl = \int_S \operatorname{div} \vec{E} dS.$$

Данные формулы позволяют преобразовать поверхностный интеграл в объемный и наоборот, а поверхностный интеграл преобразовать в контурный интеграл.

Вычислим поток напряженности точечного источника, находящегося на оси цилиндра через боковую поверхность цилиндра. Начало координат расположим в центре цилиндра, высоту цилиндра обозначим $2h$, радиус основания – r , точечный источник находится на расстоянии a от центра цилиндра. Поток через боковую поверхность цилиндра равен произведению заряда на разность полного телесного угла 4π и суммы углов, под которыми из источника видны оба основания конуса. Выше телесный угол, под которым видно основание конуса из его вершины был вычислен (глава «Векторное поле»). Поэтому можем записать:

$$N = Q \left(4\pi - \pi + \frac{\pi(a-h)}{\sqrt{r^2 + (a-h)^2}} - \pi + \frac{\pi(a+h)}{\sqrt{r^2 + (a+h)^2}} \right) = Q\pi \left(\frac{a-h}{\sqrt{r^2 + (a-h)^2}} + \frac{a+h}{\sqrt{r^2 + (a+h)^2}} \right).$$

ЗАДАЧИ

1. Вычислите поток векторов $\vec{A} = x\vec{i} + 2y\vec{k}$ и $\vec{B} = x^2\vec{j} - y\vec{k}$ через сферу с центром в начале координат и радиусом $r=1$.
2. Вычислите поток вектора напряженности через боковую поверхность цилиндра, если поле обусловлено точечным зарядом $Q=5$, находящимся на середине оси цилиндра.
3. Вычислите поток вектора $\vec{A} = (x^2 + y^2)\vec{i} + (y^2 + z^2)\vec{j} + (z^2 + x^2)\vec{k}$ через поверхность куба, ограниченного плоскостями $x=0, x=1, y=0, y=1, z=0, z=1$.
4. Определите напряженность поля, создаваемого половиной шара радиусом a с плотностью ρ в точках, расположенных на ребре и в центре сферической поверхности.
5. Определите напряженность поля пластинки с поверхностной плотностью 5 в виде ромба на перпендикуляре, проходящем через его центр.

ПОТЕНЦИАЛ ПОЛЯ

Пусть в каждой точке пространства существует векторное поле E . Потенциалом поля назовем скалярную однозначную функцию $U(x,y,z)$, частная производная которой по любому направлению, взятая с обратным знаком, равна составляющей вектора напряженности поля по этому направлению:

$$E_l = \frac{\partial U}{\partial l}.$$

Если такая функция существует, поле называется потенциальным. Вектор

$$\vec{i} \frac{\partial U}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial U}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial U}{\partial z} = -\text{grad } U$$

назовем градиентом потенциала. В символической форме:

$$\vec{E} = -\text{grad } U, \quad E_x = -\frac{\partial U}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial U}{\partial y}, \quad E_z = -\frac{\partial U}{\partial z}.$$

Для потенциальности поля необходимо и достаточно, чтобы циркуляция вектора поля по любому контуру равнялась нулю:

$$\oint A_l dl = 0.$$

В силовых полях численное значение интеграла $\int_a^b A_l dl$ равно работе по перемещению единичного источника из точки A в точку B .

Дифференциальный критерий потенциальности поля

$$\text{rot } \vec{E} = 0.$$

Чтобы поле было потенциальным необходимо и достаточно, чтобы во всех точках плотность вихревых источников поля равнялась нулю, то есть поле должно быть безвихревым.

Формула Стокса. Циркуляция вектора по контуру равна потоку вихря вектора через произвольную поверхность, ограниченную этим контуром:

$$\oint A_l dl = \int_S \text{rot}_n \vec{A} dS.$$

Формула применяется для преобразования контурного интеграла к поверхностному интегралу и наоборот.

Потенциал точечного источника, как легко проверить:

$$U = \frac{Q}{R}.$$

Потенциал точечного источника в точках, свободных от источников, конечен и непрерывен, а при удалении от него стремится к нулю обратно пропорционально квадрату расстояния.

Потенциал линейного источника

$$U = \int_l \frac{\chi}{R} dl.$$

Рассмотрим свойства линейного источника на примере стержня (рис. 13). Поскольку задача обладает осевой симметрией, совместим начало координат с центром стержня, ось z направим вдоль стержня. Его потенциал примет вид:

$$U(r, z_0) = \int_{-l}^l \frac{\chi dz_0}{\sqrt{r^2 + (z - z_0)^2}} = \chi \ln \frac{\sqrt{r^2 + (z + l)^2} + z + l}{\sqrt{r^2 + (z - l)^2} + z - l}.$$

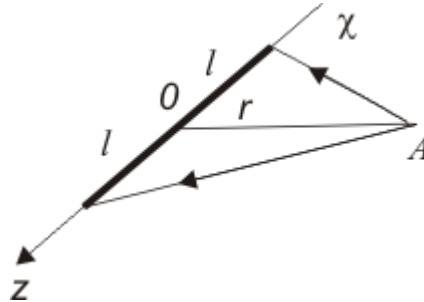


Рис. 13. К вычислению потенциала стержня

Потенциал стержня на оси z вне стержня имеет вид:

$$U = \chi \ln \frac{z + l}{z - l}.$$

Из этого выражения следует, что при приближении к стержню потенциал стремится к бесконечности. В остальных точках пространства потенциал конечен, непрерывен, а при удалении от источника стремится к нулю.

Потенциал поверхностного источника рассмотрим на примере диска. Потенциал на оси диска определится выражением:

$$U = \int_0^a \frac{\sigma r dr d\phi}{\sqrt{r^2 + z^2}} = 2\pi\sigma(\sqrt{a^2 + z^2} - |z|).$$

Потенциал в центре диска равен $2\pi\sigma a$. При пересечении поверхности диска потенциал остается непрерывным и конечным. Однако производная потенциала по нормали к диску терпит разрыв при пересечении диска. При удалении от диска потенциал стремится к нулю (рис. 14). Эти утверждения справедливы для всех поверхностных источников.

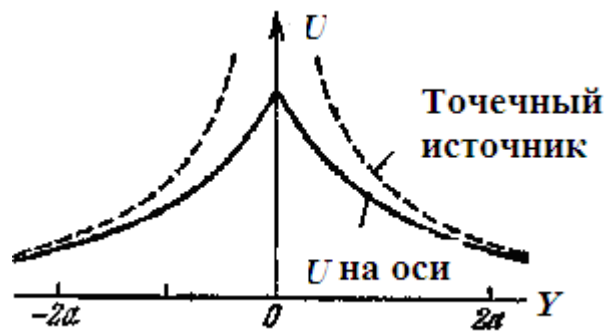
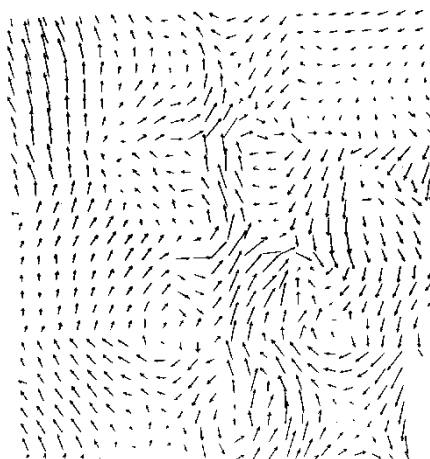


Рис. 14. Графики изменения потенциала диска и точечного источника

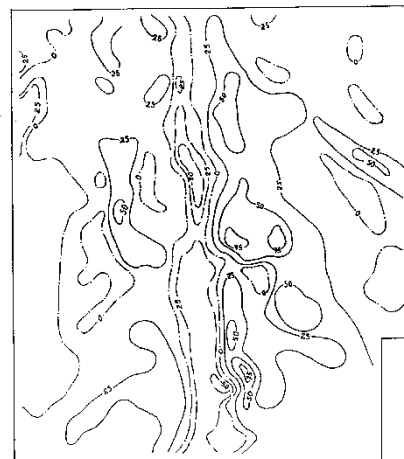
Векторные поля принято изображать графически в виде проекций вектора напряженности на горизонтальную плоскость (рис. 15, а) или в виде планов изолиний величин проекций (рис. 15, б).

Потенциал объемного источника рассмотрим на примере шара (рис. 16). Во внешней по отношению к шару точке потенциал шара радиусом r с объемной плотностью ρ на расстоянии от центра шара L :

$$\begin{aligned}
 U &= \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} \sin \theta d\theta \int_0^a \frac{\rho r^2 dr}{\sqrt{L^2 + r^2 - 2rL \cos \theta}} = \frac{\pi \rho}{L} \int_0^a r dr \int_0^{\pi} \frac{d(-2Lr \cos \theta) d\theta}{\sqrt{L^2 + r^2 - 2rL \cos \theta}} = \\
 &= \frac{2\pi \rho}{L} \int_0^a \left(\sqrt{L^2 + r^2 + 2rL} - \sqrt{L^2 + r^2 - 2rL} \right) r dr = \frac{2\pi \rho}{L} \int_0^a \left(|L+r| - |L-r| \right) r dr = \frac{4\pi \rho}{L} \left. \frac{r^3}{3} \right|_0^a = \\
 &= \frac{4\pi \rho a^3}{L} = \frac{Q}{L}.
 \end{aligned}$$



а



б

Рис. 15. Способы графического изображения векторного поля: в виде векторов (а); изолиниями проекции вектора на вертикаль (б)

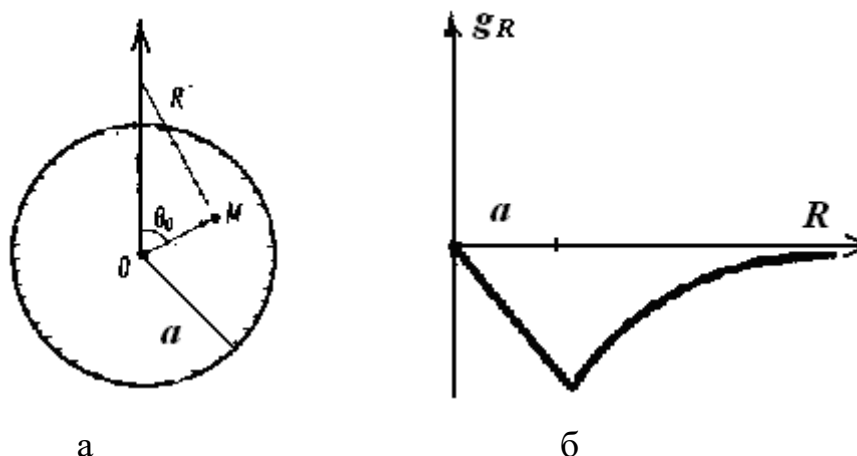


Рис. 16. К вычислению потенциала и напряженности поля шара (а). График зависимости напряженности гравитационного поля шара от расстояния до его центра (б)

Полученное решение совпадает с потенциалом точечного источника с тем же зарядом Q . При вычислении потенциала внутри шара последний интеграл необходимо разбить на два:

$$U = \frac{2\pi\rho}{z} \int_0^a (|z+r| - |z-r|) r dr = \frac{2\pi\rho}{z} \left(\int_0^a (z+r) r dr - \int_0^z (z-r) r dr - \int_z^a (r-z) r dr \right) = 2\pi\rho \left(a^2 - \frac{z^2}{3} \right).$$

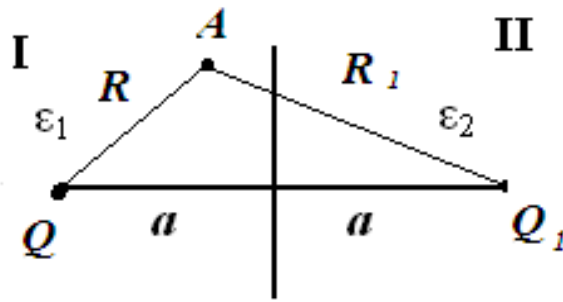
На поверхности шара и вне шара оба выражения принимают одинаковые значения. Потенциал шара всюду конечен, непрерывен, при удалении от источника стремится к нулю. Такими же свойствами обладает потенциал любого объемного источника.

Найдем потенциал поля, создаваемого точечным зарядом Q , расположенным в среде с диэлектрической проницаемостью ε_1 на расстоянии a от плоской границы раздела со средой с диэлектрической проницаемостью ε_2 (рис. 17). Задачу решим методом зеркальных изображений. Симметрично относительно границы раздела введем во второй среде фиктивный источник Q_1 . Потенциал в точке A

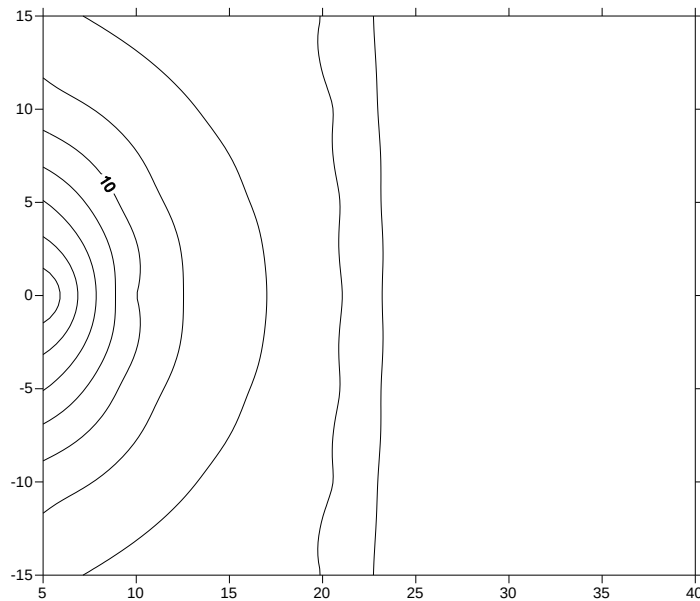
$$U_1 = \frac{Q}{\varepsilon_1 R} + \frac{Q_1}{\varepsilon_2 R_1}.$$

Потенциал во второй среде будем искать как поле фиктивного заряда Q_2 находящегося на месте заряда Q_1 :

$$U_2 = \frac{Q_2}{R}.$$



а



б

Рис. 17. Точечный заряд вблизи плоской границы раздела двух сред (а). План изолиний потенциала в среде с плоской границей раздела (б)

На плоской границе раздела ($R = a$) выполняются условия непрерывности потенциала $U_1 = U_2$ и скачок нормальной составляющей напряженности поля (

$$\epsilon_1 \frac{\partial U_1}{\partial n} = \epsilon_2 \frac{\partial U_2}{\partial n}):$$

$$\frac{Q + Q_1}{\epsilon_1} = \frac{Q_2}{\epsilon_2}, \quad Q - Q_1 = Q_2.$$

Находим два неизвестных из двух уравнений:

$$Q_1 = Q \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}, \quad Q_2 = Q \frac{2\epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}.$$

Потенциал поля определится после подстановки найденных величин фиктивных зарядов в вышеприведенные уравнения:

$$U_2 = \frac{2\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \frac{Q}{R}.$$

Величину $k = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}$ называют коэффициентом отражения поля от плоской границы, а величину $1 - k = \frac{2\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}$ называют коэффициентом прохождения.

ВИХРЕВОЕ ПОЛЕ

Векторное поле $\vec{E}$ называют соленоидальным (вихревым), если поток поля через замкнутую поверхность, ограничивающую любую область, равен нулю:

$$\int_S E_n dS = 0.$$

Силовые линии соленоидального поля замкнуты. В области S не должно быть источников потенциальных полей. Соленоидальное поле порождается вихревыми источниками с плотностью $\vec{q} = \text{rot } \vec{E}$. Дифференциальные уравнения соленоидального поля:

$$\text{div } \vec{E} = 0, \text{ rot } \vec{E} = \vec{q}, \text{ div } \vec{q} = 0.$$

Произвольное векторное поле может иметь потенциальную и вихревую части:

$$\vec{E} = -\text{grad} \left(\int_V \frac{\rho dV}{R} \right) + \text{rot} \left(\int_V \frac{\vec{q} dV}{R} \right).$$

Дифференциальные характеристики произвольного вектора определяют его структуру:

$$\vec{E} = \text{grad} \left(\int_V \frac{\text{div } \vec{E}}{R} dV \right) + \text{rot} \left(\int_V \frac{\text{rot } \vec{E}}{R} dV \right).$$

УРАВНЕНИЕ ЛАПЛАСА

Оператором Лапласа называют дифференциальный оператор, который в декартовых координатах представляет собой сумму вторых частных производных по x, y, z :

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

Дифференциальное уравнение в частных производных вида

$$\Delta U = \operatorname{div}(\operatorname{grad} U) = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0$$

называют уравнением Лапласа. Уравнение Лапласа описывает стационарное тепловое поле, потенциальное течение жидкости, электрическое поле постоянного тока, электростатическое поле, магнитостатическое поле, процесс диффузии.

В сферических координатах уравнение Лапласа:

$$\Delta U = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial U}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} = 0.$$

Непрерывную функцию вместе со своими производными в некоторой области, удовлетворяющую уравнению Лапласа, называют гармонической в этой области. Основные свойства гармонических функций:

- если функция U гармоническая в области T , ограниченной некоторой поверхностью, то справедливо равенство:

$$\sum_S \frac{\partial U}{\partial n} dS = 0,$$

где S – любая замкнутая поверхность, целиком лежащая в области T ;

- если функция U гармоническая в области T , а M – точка, лежащая внутри T , то справедливо:

$$U(M) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_D U dS,$$

где D – сфера с центром в точке M , целиком лежащая в области T ;

- если функция U , определенная и непрерывная в замкнутой области T , удовлетворяет уравнению Лапласа внутри T , то максимальное и минимальное значения эта функция принимает на поверхности, ограничивающей область T ;

- если известны значения гармонической функции U в области T , во всех точках ограничивающей эту область поверхности S , то функция U может быть определена в любой точке T ;

- если гармоническая функция U , определенная в области T , принимает на поверхности, ограничивающей область, постоянное значение, то всюду в этой области она принимает это постоянное значение.

Одним из способов решения уравнения Лапласа является способ разделения переменных (метод Фурье). Искомую функцию представляют в виде произведения функций, каждая из которых зависит только от одной переменной:

$$U(x, y, z) = X(x)Y(y)Z(z), \quad U(r, \theta, \varphi) = R(r)\Theta(\theta)\Phi(\varphi), \quad U(r, \varphi, z) = R(r)\Phi(\varphi)Z(z).$$

В цилиндрических координатах уравнение Лапласа имеет вид:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial^2 R}{\partial r^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} = 0.$$

После подстановки функции, предложенной Фурье:

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} = \gamma^2 Z, \quad \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \varphi^2} + n\Phi = 0, \quad \frac{\partial^2 R}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial R}{\partial r} + \left(\gamma^2 - \frac{n^2}{r^2} \right) R = 0.$$

Решение первых двух уравнений:

$$Z = e^{-\gamma z}, \quad \Phi = e^{n\varphi i}.$$

Третье уравнение с помощью подстановки приводится к уравнению Бесселя:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{dy}{dx} + \left(1 - \frac{h^2}{x^2} \right) y = 0.$$

Его решением является цилиндрическая функция Бесселя первого рода:

$$R = J_n(\gamma r), \quad J_n(\gamma r) = \left(\frac{\gamma r}{2} \right)^n \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-\gamma r)^2 / 4)^k}{k! \Gamma(k + n + 1)},$$

где Γ – гамма-функция, $\Gamma(1)=\Gamma(2)=1$, $\Gamma(n+1)=n!$.

Бессель Ф. В. при обработке астрономических наблюдений исследовал цилиндрические функции для вычисления коэффициентов разложения в тригонометрический ряд радиус-векторов планет. Функция Бесселя с ростом аргумента колеблется относительно оси абсцисс с экспоненциально убывающей амплитудой. Представление функции, обратной расстоянию с помощью функций Бесселя имеет вид:

$$\frac{1}{\sqrt{r^2 + z^2}} = \int_0^\infty \exp(-tz) J_0(tz) dt, \quad z \geq 0,$$

$$\frac{1}{\sqrt{r^2 + z^2}} = \int_0^\infty \exp(tz) J_0(tz) dt, \quad z \leq 0.$$

Частное решение и общее решение третьего уравнения:

$$Z = e^{-\gamma z + \varphi n i} J(nr), \quad U(r, \varphi, z) = \sum_{n=0}^{\infty} e^{n \varphi i} \int_0^\infty C_n(\gamma) e^{-\gamma z} J(\gamma r) \gamma d\gamma,$$

где $C_n(\gamma) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{-n \varphi i} d\varphi \int_0^\infty U(r, \varphi) J_n(\gamma r) r dr.$

При некоторых специально подобранных законах изменения γ уравнение Лапласа имеет аналитическое решение. Например, И. К. Овчинников предложил для описания зависимости электропроводности от глубины использовать законы:

$$\gamma = \gamma_0 \left(\frac{ch\alpha(k+z)}{ch\alpha z} \right)^{\pm 2}, \quad \gamma = \gamma_0 \left(\frac{sh\alpha(k+z)}{sh\alpha z} \right)^{\pm 2}, \quad \gamma = \gamma_0 e^{\pm 2\alpha z},$$

которые позволяют получить аналитические решения уравнения Лапласа.

Поле вертикально поляризованной сферы. Пусть в однородной изотропной бесконечной среде находится равномерно поляризованная сфера, т. е. такая, что скачок потенциала на границе сферы с вмещающей средой линейно меняется в зависимости от глубины. Обозначим U_1 потенциал поля во вмещающей среде с проводимостью γ_1 , U_2 – потенциал поля внутри шара с проводимостью γ_2 , a – радиус шара, θ – угол между направлением поляризации и направлением из центра сферы на точку наблюдения. Равномерность поляризации обеспечивается распределением скачка потенциала на границе сферы и вмещающей среды по закону:

$$\Delta U = \Delta U_0 \cos \theta,$$

где ΔU_0 – наибольший скачок потенциала $U_1 - U_2$ на границе сферы.

Уравнение Лапласа в данном случае имеет вид:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \theta^2} + \frac{\operatorname{ctg} \theta}{r^2} \frac{\partial U}{\partial \theta} = 0.$$

Решение должно удовлетворять условиям:

$$U_1 - U_2 = \Delta U_0 \cos \theta, \quad \gamma_1 \frac{\partial U_1}{\partial r} = \gamma_2 \frac{\partial U_2}{\partial r}, \quad \text{при } r=a;$$

$$U_1 \rightarrow 0 \text{ при } r \rightarrow \infty, \quad U_2 = 0 \text{ при } r = 0.$$

Решение будем искать методом разделения переменных, полагая $U = f(r) \cos \theta$.

Подставим избранную функцию в уравнение Лапласа, получим:

$$\cos \theta \left(\frac{\partial^2 f}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial f}{\partial r} - 2 \frac{f}{r} \right) = 0,$$

откуда

$$\left(\frac{\partial^2 f}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial f}{\partial r} - 2 \frac{f}{r} \right) = 0.$$

Представим функцию f в виде произведения $f = r^2 \varphi$. Наше уравнение преобразуется:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} - \frac{2}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0.$$

Его решение, как легко убедиться подстановкой, $\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} = 2C^2 r$, $\frac{\partial \varphi}{\partial r} = C^2 r^2$,

где C – произвольная постоянная. Далее получим $\varphi = Ar^3 + B$, $f = ar + \frac{B}{r^2}$,

где A и B – произвольные постоянные. Решение исходного уравнения:

$$U = \left(Ar + \frac{B}{r^2} \right) \cos \theta,$$

После рассмотрения граничных условий:

$$U_1 = \frac{B}{r^2} \cos \theta, \quad U_2 = Ar \cos \theta,$$

$$U_1 = \frac{\gamma_2}{2\gamma_1 + \gamma_2} \Delta U_0 \frac{a^2}{r^2} \cos \theta, \quad U_2 = -\frac{2\gamma_1}{2\gamma_1 + \gamma_2} \Delta U_0 \frac{r}{a} \cos \theta.$$

На рис. 24, б представлен график изменения потенциала, вдоль вертикальной линии, проходящей через центр шара.

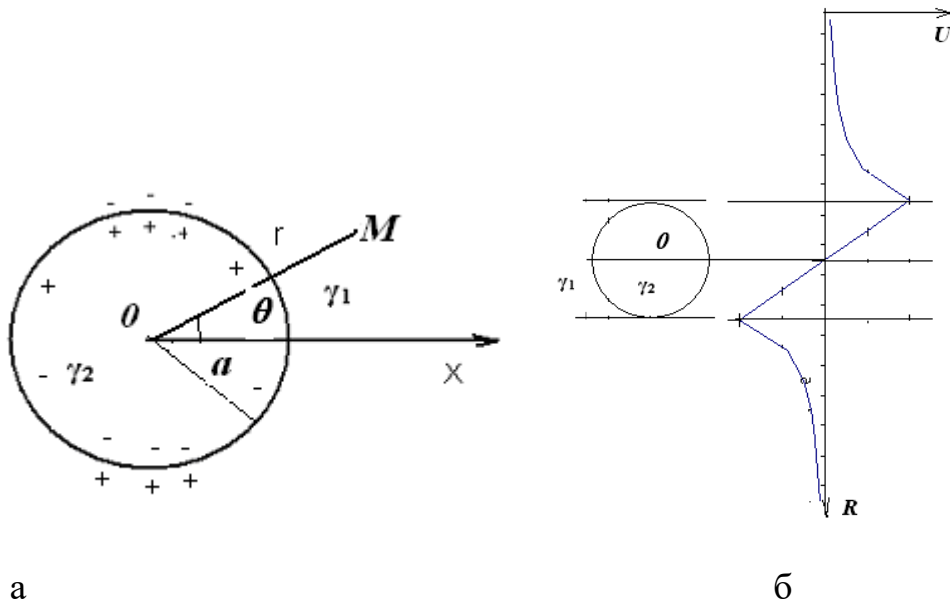


Рис. 24. Однородно вертикально поляризованная сфера (а) и график ее потенциала (б)

Намагничивание однородного шара однородным полем. Пусть в среде с постоянной магнитной проницаемостью μ_1 находится шар с радиусом равным a и постоянной магнитной проницаемостью μ_2 . Намагничивающее поле будем считать однородным, его напряженность обозначим H_0 (рис. 24). Потенциал первичного поля представим в виде $U_0 = -H_0 z = -H_0 R \cos \theta$.

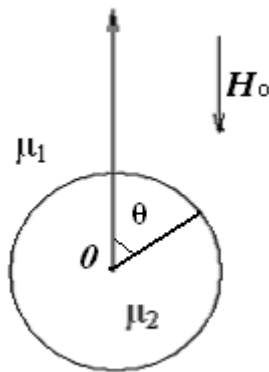


Рис. 25. К определению магнитного поля шара

Введем сферическую систему координат с началом в центре шара, полярную ось направим по намагничивающему полю. Решение будем искать в виде суммы первичного поля и аномального поля, обусловленного присутствием шара: $U(R, \theta) = U_0(R, \theta) + U_a(R, \theta)$. Второе слагаемое (аномальная компонента поля) вне шара и внутри шара имеет разное аналитическое представление. Аномальное поле вне шара обозначим $U_1(R, \theta)$, а потенциал внутри шара – $U_2(R, \theta)$. На поверхности шара ($R=a$) должны выполняться граничные условия:

$$U_1 = U_2 \cdot \mu_1 \frac{\partial U_1}{\partial R} = \mu_2 \frac{\partial U_2}{\partial R}.$$

Потенциалы U_1 и U_2 будем искать в виде:

$$U_1 = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{B_n P_n(\cos \theta)}{R^{n+1}}, \quad U_2 = \sum_{n=0}^{\infty} A_n R^n P_n(\cos \theta).$$

Коэффициенты A_n и B_n найдем, используя граничные условия (для краткости аргумент полиномов Лежандра приводить не будем):

$$-H_0 a \cos \theta + \sum_{n=0}^{\infty} A_n R^n P_n = -H_0 a \cos \theta + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{B_n P_n}{R^{n+1}},$$

$$\mu_1 \left(-H_0 \cos \theta - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(n+1) B_n P_n}{a^{n+2}} \right) = \mu_2 \left(-H_0 \cos \theta + \sum_{n=0}^{\infty} n A_n a^{n-1} P_n \right).$$

Эти равенства выполняются только в том случае, если коэффициенты при полиномах Лежандра с одинаковыми номерами в левой и правой частях будут равны. Удовлетворить этим условиям можно только в том случае, если:

$$1) A_n = B_n = 0 \text{ при } n \neq 1;$$

$$2) A_1 a^3 = B_1,$$

откуда получим:

$$\mu_1 \left(H_0 + \frac{2B_1}{a^3} \right) = \mu_2 (H_0 - A_1), \quad A_1 = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + 2\mu_1} H_0, \quad B_1 = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + 2\mu_1} a^3 H_0.$$

Таким образом, потенциал намагниченного шара определен внутри шара формулой

$$U_2 = -H_0 \cos \theta + \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + 2\mu_1} H_0 \cos \theta.$$

Векторы напряженности и индукции магнитного поля внутри шара постоянны и направлены параллельно намагничивающему полю. Это отражает общее положение о том, что тела, ограниченные поверхностями второго порядка, намагничиваются (поляризуются) однородно, все остальные тела намагничиваются неоднородно, то есть их намагниченность зависит от координат.

Вне шара потенциал:

$$U_1 = -H_0 \cos \theta + \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + 2\mu_1} \frac{a^3 H_0 \cos \theta}{R^2}$$

и совпадает с полем магнитного диполя, расположенного в центре шара, магнитный момент M которого равен магнитному моменту шара:

$$\vec{M} = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + 2\mu_1} a^3 H_0,$$

а намагниченность

$$\vec{J} = \frac{3}{4\pi} \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + 2\mu_1} H_0.$$

Компоненты напряженности поля:

$$X = 3M \frac{(x - x_0)(z - z_0)}{R^5}, \quad Y = 3M \frac{(y - y_0)(z - z_0)}{R^5},$$

$$Z = M \frac{2(z - z_0)^2 - (x - x_0)^2 - (y - y_0)^2}{R^5}.$$

Полученное для шара решение позволяет рассмотреть задачу о сферическом магнитном экране. Потенциал представляют в виде суммы трех потенциалов: во внешней области, во внутренней области и в самой сферической оболочке. Решение во всех областях должно удовлетворять уравнению Лапласа и граничным условиям. Магнитное поле внутри сферического экрана

$$H = \frac{9\mu_1\mu_2 H_0}{2(\mu_2^2 + 1)(r_2^3 - r_1^3)/r_2^3 + \mu_2(4r_1^3 + 5r_2^3)/r_2^3}.$$

Убывание интенсивности магнитного поля во внутренней области сферической оболочки оценивают коэффициентом экранирования, который равен отношению интенсивности поля внутри экрана к интенсивности поля во внешнем пространстве:

$$k = \frac{1}{1 + \frac{2(\mu_2 - 1)^2}{9\mu_2} \frac{r_2^3 - r_1^3}{r_2^3}}.$$

Экранирующий эффект тем больше, чем выше магнитная проницаемость экрана и его толщина. Это выражение используется при расчете экранов устройств, нуждающихся в защите от магнитных помех, например в скважинных приборах.

ПОТЕНЦИАЛ ДВУМЕРНЫХ ТЕЛ

В геологической практике часто встречаются объекты, размеры которых по одному направлению намного больше, чем в двух других (например, дайки). Поле таких объектов в направлении простирания почти не меняется. Такие объекты считают бесконечными по простиранию, а их сечение представляют идеализированными правильными геометрическими фигурами и их называют двумерными телами.

Потенциал однородной бесконечной нити с линейной плотностью χ :

$$U = 2\chi \ln \frac{1}{r},$$

его называют логарифмическим потенциалом.

В двумерном случае под линейным диполем понимают линию, состоящую из одинаковых элементарных диполей, либо две бесконечные линии с плотностью зарядов разного знака, расположенных на бесконечно малом расстоянии (рис. 26). Потенциал линейного диполя, дипольный момент которого M :

$$U = M \frac{\cos \theta}{r}.$$

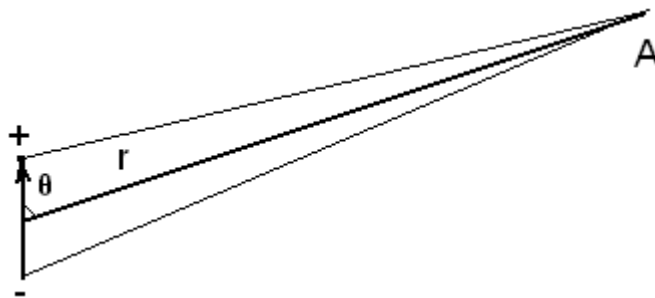


Рис. 25. К выводу формулы потенциала линейного диполя

Векторы магнитной индукции $\vec{B}$ и электрической поляризации $\vec{P}$. Магнитная индукция является основной силовой характеристикой магнитного поля. Напряженность магнитостатического поля $\vec{H}$ вводится уравнением

$$\vec{B} = 1 + 4\pi\chi\vec{H} = \mu\vec{H}.$$

Основное уравнение, описывающее магнитное поле:

$$\text{div } \vec{B} = 0.$$

Линии вектора магнитной индукции всегда замкнуты, магнитное поле соленоидальное. В случае пространственной изменчивости магнитной проницаемости это уравнение имеет вид:

$$\text{div}(\mu \text{grad } U) = 0.$$

Уравнения непрерывности потенциала и нормальной составляющей вектора магнитной индукции на поверхности раздела:

$$\mu_1 \frac{\partial U_1}{\partial n} = \mu_2 \frac{\partial U_2}{\partial n}, \quad U_1 = U_2.$$

Величина напряженности магнитного поля внутри магнетика $\vec{H}$ вводится соотношением:

$$\vec{H} = \vec{B} - 4\pi\vec{J}.$$

Таким образом, $\vec{H}$ – это не поле и не характеристика поля, это разность величин разной природы – поля и величины, характеризующей упорядоченность магнитных моментов. Вектор напряженности магнитного поля – удобная конструкция для теоретических рассуждений. Аналогично вводится вектор электрической индукции:

$$\vec{D} = \vec{E} + 4\pi\vec{P},$$

где P – вектор электрической поляризации, реальная физическая величина.

НАМАГНИЧИВАНИЕ ТЕЛ С ВЫСОКОЙ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТЬЮ

Распределение намагниченности в телах с высокими магнитными свойствами существенно зависит от формы тела. Расчет магнитных полей в таких случаях нельзя проводить исходя из принципа суперпозиции. Вычисления полей проводят, решая численными методами интегральные уравнения.

Уравнения вида

$$y(x) - \lambda \int_a^b K(x, x_0) y(x_0) dx_0 = \varphi(x).$$

где $y(x)$ – искомая функция, λ – параметр, называют линейными интегральными уравнениями Фредгольма второго рода. Интегральное уравнение

$$y_0(x) - \lambda \int_a^b K(x, x_0) y_0(x) dx_0 = 0$$

называют соответствующим однородным интегральным уравнением.

Общее решение интегрального уравнения Фредгольма второго рода есть сумма:

К интегральным уравнениям Фредгольма сводятся некоторые задачи теории упругости, например:

$$F(x) = y_0(x) + \varphi(x).$$

Если для $M > 0$ справедливо неравенство $|\lambda| < 1/M$ и $\int_a^b |K(x, x_0) dx_0| \leq M$ при $a \leq x \leq b$, интегральное уравнение имеет решение $F(x)$. Решение может быть найдено методом последовательных приближений. Искомое решение является пределом последовательности

$$y_0(x) = \varphi(x), \quad \varphi_n(x) = \varphi(x) + \lambda \int_a^b K(x, x_0) y_{n-1}(x_0) dx_0.$$

Эффект неоднородного намагничивания железорудных тел при современных средствах измерения магнитных полей необходимо учитывать, если их магнитная восприимчивость превышает 0,01 СИ.

Магнитный потенциал намагниченного тела

$$U = \int_V \vec{J} \text{grad} \frac{1}{r} dV_0.$$

Намагниченность неоднородно намагниченного тела ранее определена выражением

$$\vec{H} = \vec{B} - 4\pi\vec{J}.$$

Напряженность магнитного поля вне тела выразится интегральным уравнением:

$$\vec{H} = \vec{H}_0 - \frac{1}{4\pi} \text{grad} \int_V ((\mu - 1)\vec{H} + \vec{J}_n) \frac{\vec{r}}{r^3} dV_0.$$

Внешнее поле входит в данное уравнение дважды: как определяемая величина и в подынтегральное выражение величина, определяющая индуцированную намагниченность. Выражение в круглых скобках в подынтегральном выражении представляет собой сумму остаточной и индуцированной намагниченности. Ее называют вектором суммарной намагниченности. Проекцию этого вектора на внешнюю нормаль к поверхности намагниченного тела по аналогии с электрическими зарядами называют плотностью магнитных зарядов простого слоя.

Определим из последнего уравнения аномальное поле $\vec{H}_a = \vec{H} - \vec{H}_0$. Если известна плотность магнитных зарядов на поверхности, можно вычислить магнитное поле геологических объектов сложной формы, ограниченных поверхностью S . Вертикальную составляющую вектора аномалии магнитной индукции можно вычислить:

$$Z(A) = 100 \int_S J_n(M) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{R} \right) dS,$$

где $J_n(M)$ – плотность простого слоя в точке M поверхности S , n – нормаль к поверхности. Плотность зарядов определяется выражением

$$J_n(M) = \frac{\Delta\chi}{2\pi(2 + \chi_1 + \chi_2)} \int_S J_n(N) \frac{\partial}{\partial n_M} \left(\frac{1}{r} \right) dS - \frac{\Delta\chi}{2\pi(2 + \chi_1 + \chi_2)} T_{0n}(M),$$

где χ_1 и χ_2 – магнитная восприимчивость среды и объекта, $\Delta\chi$ – избыточная магнитная восприимчивость, T_0 – намагничивающее поле.

Часто интегральные уравнения решают численными методами. При этом изучаемый объем разбивается на конечное число элементарных ячеек, чаще всего прямоугольников или прямоугольных параллелепипедов, а интегральное уравнение аппроксимируют системой линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Для решения СЛАУ существует много методов, адаптированных к типу системы.

УЧЕТ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ТЕЛ С ВЫСОКОЙ НАМАГНИЧЕННОСТЬЮ

Если несколько тел с высокой намагниченностью близко расположены относительно друг друга, то их суммарное поле не равно сумме полей изолированных тел $Z_{01} + Z_{02}$. Принцип суперпозиции не выполняется. Алгоритм учета взаимного влияния разработан Ю. И. Блохом. Рассмотрим его на примере горизонтальных круговых цилиндров, которые, как ранее упоминалось, намагничиваются однородно.

Источником поля будем считать линейный магнитный диполь с магнитным моментом M , удаленный на расстояние L от цилиндра в горизонтальном направлении. Поместим начало координат на оси цилиндра. Потенциал кругового цилиндра радиусом a и магнитной проницаемостью μ в поле магнитного диполя вне цилиндра (рис. 27):

$$U_1 = \frac{M \cos \varphi}{r} = \frac{MR \cos \theta}{R^2 + L^2 + 2RL \sin \theta}$$

Потенциал поля внутри цилиндра будем искать в виде поля линейного диполя с моментом M_0 , расположенного в точке $(0, -l)$, где $l = a^2 / L$:

$$U_2 = M_0 \frac{R \cos \theta}{R^2 + l^2 + 2Rl \sin \theta}$$

После удовлетворения граничных условий внешний потенциал

$$U_1 = -\frac{M(\mu - 1)a^2 r \cos \theta}{(\mu + 1)(r^2 L^2 + a^4 + 2a^2 Lr \sin \theta)}.$$

Это аномальное поле совпадает с полем магнитного линейного диполя, смещенным в сторону внешнего источника (диполя) от оси цилиндра на расстояние $l = a^2 / L$ и магнитным моментом $M_0 = -\frac{M(\mu - 1)}{\mu + 1}$ (рис. 27, а).

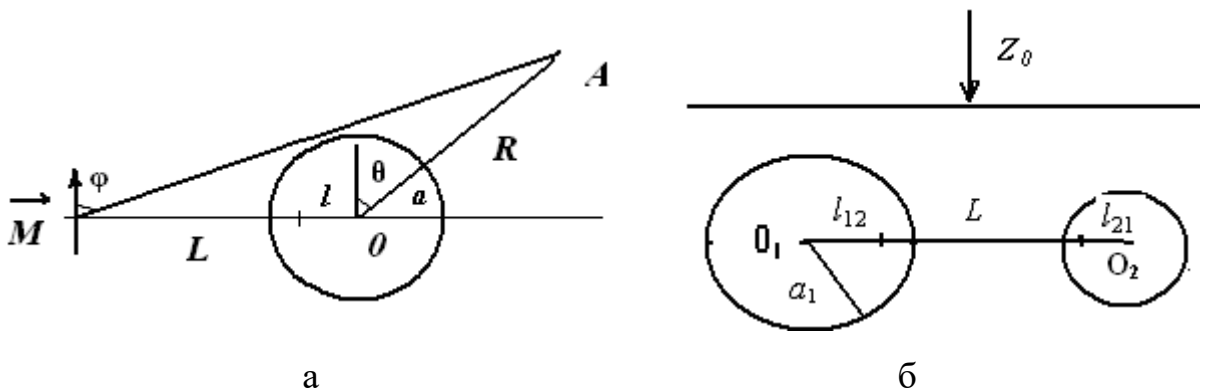


Рис. 27. Горизонтальный цилиндр в магнитном поле диполя (а). Два горизонтальных цилиндра в однородном магнитном поле (б)

Пусть два горизонтальных цилиндра расположены в магнитном поле Z_0 на расстоянии L по горизонтали. Начало координат совместим с осью первого цилиндра (рис. 27, б). Если цилиндры изолированы от влияния других тел, их поле совпадет с полем линейных диполей с магнитными моментами:

$$M_1 = \frac{\mu_1 - 1}{\mu_1 + 1} a_1^2 Z_0, \quad M_2 = \frac{\mu_2 - 1}{\mu_2 + 1} a_2^2 Z_0.$$

Влияние первого цилиндра на второй можно учесть добавлением линейного магнитного диполя, смещенного от оси второго цилиндра на расстояние $l_{21} = a_2^2 / L$ с магнитным моментом

$$M_{21} = -\frac{(\mu_2 - 1)(\mu_1 - 1)a_1^2 a_2^2 H_0}{(\mu_2 + 1)(\mu_1 + 1)L^2}.$$

Влияние второго цилиндра на первый можно учесть добавлением линейного магнитного диполя с таким же магнитным моментом $M_{12} = M_{21}$, смещенного от оси первого цилиндра в направлении второго цилиндра на расстояние $l_{12} = a_1^2 / L$. Вертикальная и горизонтальная компоненты напряженности магнитного поля взаимного влияния:

$$Z_1 = M_{12} \frac{z^2 - (x - l_{12})^2}{(z^2 + (x - l_{12})^2)^2}, \quad H_1 = -2M_{12} \frac{z(x - l_{12})}{(z^2 + (x - l_{12})^2)^2},$$

$$Z_2 = M_{21} \frac{z^2 - (x - L - l_{21})^2}{(z^2 + (x - L - l_{21})^2)^2}, \quad H_2 = -2M_{21} \frac{z(x - L - l_{21})}{(z^2 + (x - L - l_{21})^2)^2}.$$

Суммарное магнитное поле после первой итерации

$$Z_{\Sigma} = Z_0 + Z_{01} + Z_{02} + Z_1 + Z_2$$

Намагничивающее поле для обоих цилиндров изменится. Изменится и намагниченность обоих цилиндров. Процесс учета взаимного влияния можно аналогичным образом продолжить далее. Итерационный процесс быстро сходится. Расчеты показывают, что в зависимости от расположения тел относительно друг друга суммарное поле может как увеличиваться, так и уменьшаться относительно суммы полей изолированных тел. Изменение поля в результате взаимного влияния двух цилиндров может достигать 20 %.

ЗАДАЧИ

1. Вычислите напряженность аномального магнитного поля кругового горизонтального цилиндра с радиусом a и магнитной восприимчивостью μ_2 , находящегося в однородной изотропной среде с магнитной восприимчивостью μ_2 , возбуждаемого полем H_0 .

2. Докажите, что векторное поле $\vec{A} = 2xz\vec{i} + y^2\vec{j} + x^2\vec{k}$ потенциально, и найдите его потенциал.

3. Докажите, что функция $U = \exp(-i\alpha x - i\beta y - \gamma z)$ является решением уравнения Лапласа, если $\gamma^2 = \alpha^2 + \beta^2$.

4. Вычислите эффект экранирования для сферической оболочки с $r=8$ см и $r=8,5$ см, изготовленной из материала с $\gamma=5,14 \cdot 10^{17}$ ед. СГСЭ.

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Закон Ома в дифференциальной форме. Пусть в некотором пространстве с электропроводностью γ протекает ток (рис. 28). Рассмотрим цилиндр малых размеров такой, в котором ось цилиндра совпадает с направлением плотности тока. Тогда для цилиндра имеющего сопротивление R при плотности тока i , справедливы соотношения:

$$dI = -\frac{dU}{R}, dI = idS, R = \frac{dl}{\gamma dS}, idS = -\frac{dU}{dl}, i = -\gamma \frac{\partial U}{\partial l}, \vec{i} = \gamma \vec{E}.$$

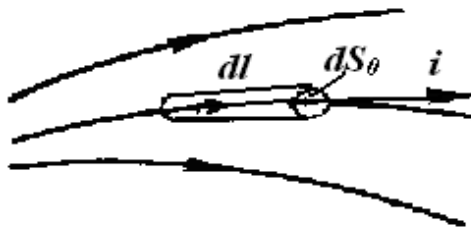


Рис. 28. К выводу закона Ома

Закон Ома в дифференциальной форме устанавливает соотношения между физическими характеристиками в бесконечно малом объеме, теоретически – в точке. В проекциях на оси координат закон записывается:

$$i_x = \gamma E_x, i_y = \gamma E_y, i_z = \gamma E_z.$$

Законы Кирхгофа в дифференциальной форме. Ток в некотором объеме равен изменению заряда в единицу времени:

$$\oint_S i_n dS = -\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV, \int_V \operatorname{div} \vec{i} = -\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV, \operatorname{div} \vec{i} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}.$$

Первое выражение называют первым законом Кирхгофа в дифференциальной форме. Второй закон Кирхгофа в интегральной форме имеет вид:

$$\oint_l E_l dl = 0, \oint_l E_l dl = \int_S \operatorname{rot} \vec{E} dS, \int_S \operatorname{rot} \vec{E} dS = 0, \operatorname{rot} \vec{E} = 0.$$

Электрическое поле постоянного тока – потенциальное безвихревое поле.

Закон Джоуля – Ленца в дифференциальной форме. Для элементарного объема в форме цилиндра мощность N определена по экспериментальным данным:

$$dN = R(dI)^2, R = \frac{1}{\gamma} \frac{dl}{dS}, dN = \frac{1}{\gamma} (dI)^2 \frac{dl}{dS}, dN = \frac{1}{\gamma} i^2 dV.$$

После интегрирования последнего выражения получим:

$$N = \frac{i^2}{\gamma}, N = \rho i^2.$$

Последнее выражение и есть закон Джоуля – Ленца в дифференциальной форме.

Объединенный закон постоянного тока. Для постоянного тока $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$.

Исходя из первого закона Кирхгофа получим:

$$\operatorname{div} \vec{i} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}, \operatorname{div} \gamma \vec{E} = 0, \operatorname{div} \operatorname{grad} U = 0, \Delta U = 0,$$

Граничные условия для потенциала постоянного тока:

$$\frac{\partial U_1}{\partial t} - \frac{\partial U_2}{\partial t} = \frac{\partial E_{21}}{\partial t}, E_{t1} - E_{t2} = \frac{\partial E_{21}}{\partial t},$$

$$i_{n1} = i_{n2}, \gamma_1 \frac{\partial U_1}{\partial n} = \gamma_2 \frac{\partial U_2}{\partial n}.$$

Экспериментально установлено, что ток (упорядоченное движение зарядов) создает постоянное электрическое поле и постоянное магнитное поле. Поскольку эти поля постоянны во времени и не оказывают влияния друг на друга, их можно рассматривать независимо.

При решении задач электрометрии пользуются понятием точечного источника тока. Это шарообразный объект с бесконечно малым радиусом. При расположении точечного источника тока в пространстве с него стекает ток I . Ток в однородной изотропной среде с электропроводностью γ будет растекаться радиально (вихрь и расходимость вектора тока равны 0). Плотность тока на удалении R будет равна $i = I / 4\pi R^2$. Напряженность поля $E = I / 4\pi\gamma R^2$, ее

направление совпадает с направлением вектора плотности тока. Потенциал поля вычислим в соответствии с его определением:

$$E = -\text{grad } U, \quad U = I / 4\pi\gamma R.$$

Рассмотрим поле точечного источника тока в присутствии вертикальной границы раздела сред с проводимостью γ_1 и γ_2 (рис. 29). Расстояние источника от границы до источника обозначим d . Границу атмосферы ($\gamma=0$) с земной поверхностью будем учитывать удвоением силы тока точечного источника. Решение задачи найдем методом зеркальных изображений. Влияние границы раздела будем учитывать введением фиктивного источника тока (M_2), с которого стекает ток $2I_2$, расположенного зеркально симметрично относительно реального источника (M_1).

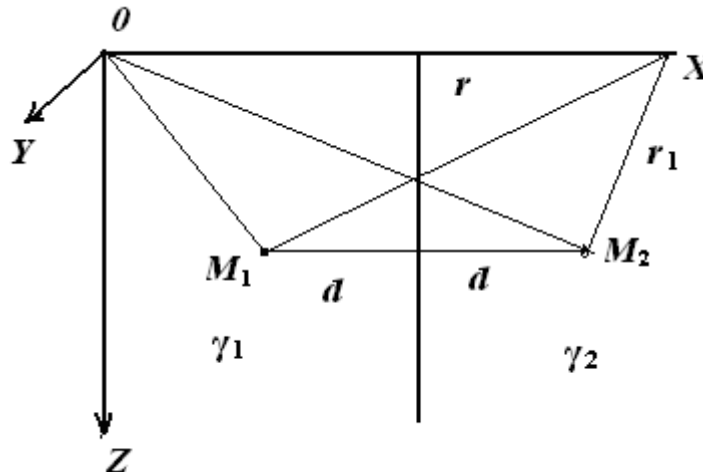


Рис. 29. Точечный источник в присутствии вертикальной границы двух сред

Потенциал точечного источника:

$$U = \frac{I}{2\pi\gamma_1 r}.$$

Потенциал электрического поля тока в первой среде:

$$U_1 = \frac{I}{2\pi\gamma_1 r} + \frac{I_1}{2\pi\gamma_1 r_1},$$

где $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, $r_1 = \sqrt{(2d - x)^2 + y^2 + z^2}$.

Потенциал во второй среде вычислим, поместив в точку с действительным зарядом фиктивный источник тока, с которого стекает ток I_2 :

$$U_2 = \frac{I_2}{2\pi\gamma_2} \frac{1}{r}.$$

Исходя из граничных условий определим неизвестные I_1 и I_2 :

$$U_1 = U_2, \gamma_1 \frac{\partial U_1}{\partial x} = \gamma_2 \frac{\partial U_2}{\partial x} \text{ при } x = d.$$

Обозначим $R = \sqrt{d^2 + y^2 + z^2}$. Тогда получим:

$$\frac{I}{2\pi\gamma_1 R} + \frac{I_1}{2\pi\gamma_1 R} = \frac{I_2}{2\pi\gamma_2 R}, \gamma_1 \frac{I}{2\pi\gamma_1} \frac{d}{R^3} - \gamma_1 \frac{I_1}{2\pi\gamma_1} \frac{d}{R^3} = \gamma_2 \frac{I_2}{2\pi\gamma_2} \frac{d}{R^3},$$

$$I - I_1 = I_2, \frac{I + I_1}{\gamma_1} = \frac{I_2}{\gamma_2}.$$

Находим значения неизвестных и подставляем в выражения для потенциала:

$$U_1 = \frac{I}{2\pi\gamma_1} \left(\frac{1}{r} + \frac{k_{12}}{r_1} \right), \quad U_2 = \frac{I}{2\pi\gamma_2} \frac{1 + k_{12}}{r},$$

где $k_{12} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2}$ называют коэффициентом отражения тока, $(1 - k_{12})$ –

коэффициентом пропускания тока. Пример расчета потенциала, выполненного с помощью пакета Mathcad, приведен на рис. 30. Излом кривой в центральной части соответствует положению контакта.

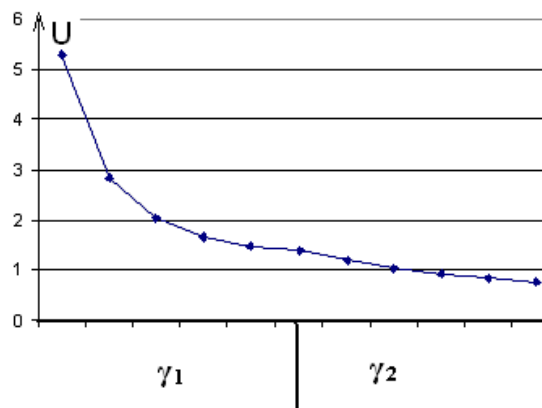


Рис. 30. График зависимости потенциала точечного источника тока в присутствии вертикального контакта

ПРОВОДЯЩИЙ ШАР В ПОЛЕ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА ТОКА

Пусть в среде с проводимостью γ_1 находятся шар радиусом a с проводимостью γ_2 и точечный источник тока (заземление), с которого в

окружающую среду стекает ток I (рис. 31). Задачу будем решать в сферической системе координат, начало которой совместим с центром шара. Полярную ось направим от начала координат к точечному источнику, расположенному вне шара. В такой системе координат решение не будет зависеть от полярного угла φ . Потенциал поля точечного источника поля обозначим U_1 , потенциал поля, вызванного наличием проводящего шара, обозначим U_2 . Потенциал суммарного поля

$$U = U_2 + U_1.$$

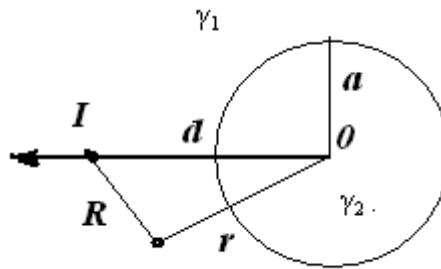


Рис. 30. Шар в поле точечного источника тока

Потенциалы U_1 и U_2 удовлетворяют уравнению Лапласа, а на границе шара выполняются условия непрерывности потенциала и разрыва нормальной составляющей напряженности поля:

$$U_1 = U_2, \quad \gamma_1 \frac{\partial U_1}{\partial r} = \gamma_2 \frac{\partial U_2}{\partial r}.$$

Расстояние между источником тока и точкой расчета

$$R = \sqrt{r^2 + d^2 - 2rd \cos \theta}.$$

Вне шара потенциал примет вид:

$$U_1 = \frac{I}{4\pi^2 R\gamma} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{B_n P_n(\cos \theta)}{r^{n+1}}, \quad a < R,$$

где $P_n(\cos \theta)$ – полиномы Лежандра. Полиномы Лежандра могут быть вычислены по рекуррентным соотношениям:

$$P_0(x) = 1, \quad P_1(x) = x, \quad (n+1)P_{n+1}(x) = (2n+1)xP_n(x) - nP_{n-1}(x).$$

Внутри шара потенциал

$$U_2 = \frac{I}{4\pi^2 R \gamma} + \sum_{n=0}^{\infty} A_n P_n(\cos \theta) r^n.$$

Разложим величину $1/R$ в ряд по полиномам Лежандра:

$$\text{при } r < d \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{d} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{r}{d}\right)^n P_n(\cos \theta),$$

$$\text{при } r > d \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{d}{r}\right)^n P_n(\cos \theta).$$

Это разложение иногда принимают за определение полиномов Лежандра.

Граничные условия примут вид ($r=a$):

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{B_n P_n(\cos \theta)}{a^{n+1}} = \sum_{n=0}^{\infty} A_n P_n(\cos \theta) a^n,$$

$$\gamma_1 \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{In}{4\pi\gamma_1 da} \left(\frac{a}{d}\right)^n - \frac{(n+1)B_n}{a^{n+2}} \right) P_n(\cos \theta) = \gamma_2 \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{In}{4\pi da \gamma_2} \left(\frac{a}{d}\right)^n + nA_n a^{n-1} \right) P_n(\cos \theta).$$

Граничные условия справедливы для любого угла θ . Следовательно, коэффициенты при полиномах Лежандра с одинаковыми индексами должны быть равны. Отсюда:

$$\frac{B_n}{a^{n+1}} = A_n a^n,$$

$$\gamma_1 \left(\frac{In}{4\pi da \gamma_1} \left(\frac{a}{d}\right)^n - \frac{(n+1)B_n}{a^{n+2}} \right) = \gamma_2 \left(\frac{In}{4\pi da \gamma_2} \left(\frac{a}{d}\right)^n + nA_n a^{n-1} \right).$$

Коэффициенты A_n и B_n рассчитываются следующим образом:

$$A_n = \frac{I}{4\pi d^{n+1} \gamma_1} \frac{(\gamma_1 - \gamma_2)n}{n\gamma_2 + (n+1)\gamma_1}, \quad B_n = \frac{I}{4\pi \gamma_1 d^{n+1}} \frac{(\gamma_1 - \gamma_2)na^{2n+1}}{n\gamma_2 + (n+1)\gamma_1}.$$

Потенциал электрического поля тока, стекающего с точечного источника вне шара равен

$$U_1 = \frac{I}{4\pi\gamma_1} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{d} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\gamma_1 - \gamma_2)n}{n\gamma_2 + (n+1)\gamma_1} \left(\frac{a}{d}\right)^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} P_n(\cos \theta) \right),$$

внутри шара он определяется выражением

$$U_2 = \frac{I}{4\pi\gamma_1} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{d} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\gamma_1 - \gamma_2)n}{n\gamma_2 + (n+1)\gamma_1} \left(\frac{a}{d} \right)^n \left(\frac{r}{a} \right)^{n+1} P_n(\cos\theta) \right).$$

ЗАДАЧИ

1. Найдите потенциал бесконечного вертикально поляризованного цилиндра с радиусом a и электропроводностью γ_1 , расположенного в однородной, изолированной, безграничной среде с электропроводностью γ_2 .

Ответ: $U_1 = \frac{\gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2} \Delta U_0 \frac{a}{r} \cos\theta$, $U_2 = -\frac{\gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2} \Delta U_0 \frac{r}{a} \cos\theta$.

2. Вычислите коэффициенты отражения и пропускания для контакта сред с проводимостью 10^8 и 10^{12} (Ом·см) $^{-1}$.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Возьмем проводник с током. Выделим элемент тока. Закон Био – Савара определяет напряженность магнитного поля (рис. 32):

$$dH = \frac{Idl}{cR^2} \sin\alpha.$$

Это уравнение в векторной форме приобретает вид:

$$d\vec{H} = \frac{I[d\vec{l} \times \vec{R}]}{cR^3}.$$

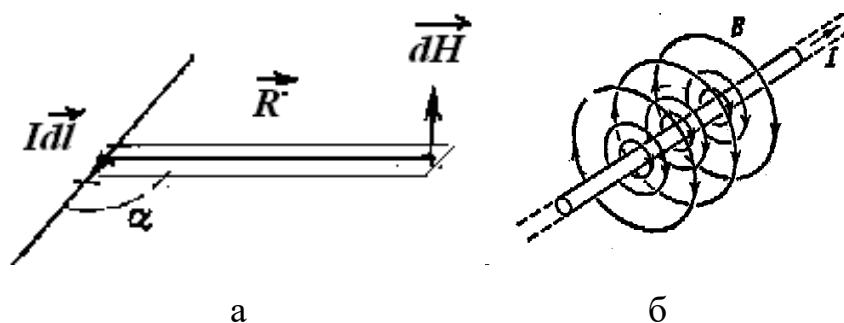


Рис. 32. К определению магнитного поля тока (а). Изолинии магнитной индукции линейного тока (б).

Отсюда магнитное поле линейного тока

$$\vec{H} = \int_l \frac{[d\vec{l} \times \vec{R}]}{cR^3}.$$

Аналогичные выражения получим для токов с плотностью $\vec{j}$, растекающихся по поверхности и в пространстве:

$$\vec{H} = \int_S \frac{[\vec{j}\vec{R}]}{cR^3}, \quad \vec{H} = \int_V \frac{[\vec{j}\vec{R}]}{cR^3}.$$

Напряженность поля в среде определится формулой:

$$\vec{H} = \int_l \frac{[d\vec{l}\vec{R}]}{cR^3} + \int_S \frac{[\vec{j}\vec{R}]}{cR^3} + \int_V \frac{[\vec{j}\vec{R}]}{cR^3},$$

где интегрирование проводится по всем проводникам с током. В матричной форме эти выражения приобретают вид:

$$[\vec{j}\vec{R}] = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ j_x & j_y & j_z \\ x-x_0 & y-y_0 & z-z_0 \end{vmatrix}.$$

Составляющие вектора поля принимают вид:

$$H_x = \int_V \frac{j_y(z-z_0) - j_z(y-y_0)}{cR^3} dV; \quad H_y = \int_V \frac{j_x(z-z_0) - j_z(x-x_0)}{cR^3} dV;$$

$$H_z = \int_V \frac{j_x(y-y_0) - j_y(x-x_0)}{cR^3} dV.$$

Закон Био – Савара в дифференциальной форме устанавливает соотношение между физическими величинами в бесконечно малой области, теоретически – в точке – области с нулевым объемом. Закон имеет вид:

$$\text{rot } \vec{H} = \frac{4\pi\vec{j}}{c}.$$

Закон констатирует, что магнитное поле создается токами. Магнитное поле является вихрями токов.

Это уравнение в проекциях на оси координат:

$$\text{rot}_x \vec{H} = \frac{4\pi j_x}{c}, \quad \text{rot}_y \vec{H} = \frac{4\pi j_y}{c}, \quad \text{rot}_z \vec{H} = \frac{4\pi j_z}{c}.$$

Рассмотрим потоки векторов левой и правой части закона Био – Савара через поверхность S :

$$\int_S \text{rot}_n \vec{H} dS = \int_S \frac{4\pi \vec{i}_n}{c} dS.$$

Применяя формулу Стокса

$$\int_S \text{rot} \vec{A}_n dS = \oint_S A_l dl$$

получим закон Био – Савара в интегральной форме:

$$\oint H_l dl = \frac{4\pi I}{c}.$$

Закон в интегральной форме устанавливает соотношение между характеристиками поля и среды в макрообъеме. Величину $\oint H_l dl$ по аналогии с электродвижущей силой называют магнитодвижущей силой. Закон Био – Савара в интегральной форме позволяет находить ток через магнитное поле и наоборот.

Найдем поле тока, протекающего с постоянной плотностью i по трубе с внешним диаметром b и внутренним диаметром a . В силу цилиндрической симметрии силовые линии магнитного поля трубы имеют форму окружности. Совместим контур радиуса R с одной из силовых линий. Закон Био – Савара для этого контура после интегрирования примет вид:

$$2\pi R H = \frac{4\pi I}{c}, \quad H = \frac{2I}{cR}, \quad H = 2\pi j \frac{a^2 - b^2}{cr}.$$

Оценим возможную величину тока, протекающего во внешнем ядре, если бы им создавалось магнитное поле Земли. Напряженность поля на экваторе составляет приблизительно 0,5 Э, радиус Земли – приблизительно 640000000 см, скорость света $3 \cdot 10^{10}$ см/сек. Отсюда величина тока

$$I = \frac{1}{3 \cdot 10^9} \times \frac{0.5 \cdot 3 \cdot 10^{10} \cdot 6.4 \cdot 10^8}{2} = 1.6 \cdot 10^9 \text{ А}.$$

Это очень большой ток, наличие которого должно вызывать выделение огромного количества тепла.

Экспериментально установлено, что на проводник длиной dl с током I , находящийся в магнитном поле B , действует сила $\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B}$. Произведение $I d\vec{l}$ называют элементом тока.

Био и Савар установили соотношение для элемента линейного тока:

$$d\vec{H} = \frac{Id\vec{l} \times \vec{R}}{cR^3},$$

откуда

$$\vec{H} = \int_L \frac{Id\vec{l} \times \vec{R}}{cR^3}.$$

Аналогично получим выражения для магнитного поля поверхностного тока с плотностью $\vec{j}$, и объемного тока с плотностью $\vec{i}$:

$$\vec{H} = \int_S \frac{\vec{j} \times \vec{R}}{cR^3} dS, \quad \vec{H} = \int_V \frac{\vec{i} \times \vec{R}}{cR^3} dV,$$

или

$$\vec{H} = \int \frac{\begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ i_x & i_y & i_z \\ x-x_0 & y-y_0 & z-z_0 \end{vmatrix}}{cR^3} dV,$$

или в проекциях

$$\vec{H}_x = \int_V \frac{(z-z_0)i_y - (y-y_0)i_z}{cR^3} dV,$$

$$\vec{H}_y = \int_V \frac{(x-x_0)i_z - (z-z_0)i_x}{cR^3} dV, \quad \vec{H}_z = \int_V \frac{(y-y_0)i_x - (x-x_0)i_y}{cR^3} dV.$$

Векторный потенциал. Запишем векторы:

$$\vec{A} = \int_V \frac{\vec{i} dV}{cR}, \quad \vec{A} = \int_S \frac{\vec{j} dl}{cR}, \quad \vec{A} = \int_L \frac{Idl}{cR}.$$

Вычислим вихрь вектора $\vec{A}$ объемного тока:

$$\begin{aligned} \text{rot } \vec{A} &= \int_V \frac{\vec{i} dV}{cR} = \int_V \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{i_x}{cR} & \frac{i_y}{cR} & \frac{i_z}{cR} \end{vmatrix} dV = \vec{i} \int_V \frac{(i_z(y-y_0) - i_y(z-z_0)) dV}{cR^3} + \\ &+ \vec{j} \int_V \frac{(i_y(z-z_0) - i_z(y-y_0)) dV}{cR^3} + \vec{k} \int_V \frac{(i_x(x-x_0) - i_y(y-y_0)) dV}{cR^3}. \end{aligned}$$

Аналогичные выражения получим для векторов $\vec{A}$ поверхностного и линейного токов. Вектор $\vec{A}$ называют **вектор-потенциалом** магнитного поля. Такое название вызвано сходством аналитического выражения содержащего $\vec{A}$ с выражениями потенциала точечного, поверхностного и объемного источников электрического и гравитационного поля:

$$U = \int_V \frac{\rho dV}{R} \text{ и } \vec{A} = \int_V \frac{\vec{i} dV}{cR} \text{ и т. д.}$$

Однако вектор-потенциал не имеет ясного физического истолкования и используется как удобная вспомогательная величина. Это позволяет напряженность магнитного поля постоянного тока представить в следующем виде:

$$\vec{H} = \text{rot } \vec{A},$$

$$H_x = \text{rot}_x \vec{A}, \quad H_y = \text{rot}_y \vec{A}, \quad H_z = \text{rot}_z \vec{A}.$$

что

вектор-потенциал является решением уравнения Пуассона-Лапласа:

$$\Delta \vec{A} = -\frac{4\pi \vec{i}}{c} \text{ в точках с токами,}$$

$$\Delta \vec{A} = 0 \quad \text{в точках без токов.}$$

В проекциях на декартовы оси координат уравнение примет вид:

$$\Delta \vec{A}_x = -\frac{4\pi \vec{i}_x}{c}, \quad \Delta \vec{A}_y = -\frac{4\pi \vec{i}_y}{c}, \quad \Delta \vec{A}_z = -\frac{4\pi \vec{i}_z}{c},$$

$$\Delta \vec{A}_x = 0, \quad \Delta \vec{A}_y = 0, \quad \Delta \vec{A}_z = 0.$$

Так же, как и для потенциала, расходимость вектор-потенциала равна 0:

$$\text{div } \vec{A} = 0.$$

Найдем вихрь вектора напряженности магнитного поля постоянного тока:

$$\text{rot } \vec{H} = \text{rot rot } \vec{A} = \text{grad div } \vec{A} - \Delta \vec{A} = \frac{4\pi \vec{i}}{c}$$

Формула $\text{rot } \vec{H} = \frac{4\pi \vec{i}}{c}$ связывает напряженность магнитного поля и

плотность тока в точке и является записью закона Био – Савара в

дифференциальной форме. Источником магнитного поля является постоянный ток. Магнитное поле тока вихревое, следовательно – непотенциальное.

Закон Био – Савара в интегральной форме связывающий ток и напряженность магнитного поля, имеет вид:

$$\oint H_l dl = \frac{4\pi I}{c}.$$

Вычислим **магнитное поле кольцевого тока**. Для решения задачи выберем цилиндрическую систему координат, радиус кольца обозначим a . Векторный потенциал имеет только одну компоненту $A_\varphi(r, z)$:

$$A_\varphi = \frac{I}{c} \int \frac{dl}{R} = \frac{I}{c} \oint \frac{\cos \varphi dl}{R} = \frac{2I}{c} \int_0^\pi \frac{a \cos \varphi d\varphi}{(a^2 + r^2 + z^2 - 2ar \cos \varphi)^{1/2}}.$$

Решение может быть представлено в виде линейной комбинации эллиптических интегралов первого и второго рода E и K :

$$A_\varphi = \frac{4I}{ck} \sqrt{\frac{a}{L}} \left[\left(1 + \frac{k^2}{2} \right) K - E \right],$$

$$\text{где } k^2 = \frac{4ar}{L^2}, \quad L = \sqrt{(a+r)^2 + z^2}, \quad K = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta}}, \quad E = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta} d\theta.$$

Магнитная индукция определится следующим образом:

$$B_\varphi = 0, \quad B_r = -\frac{\partial A_\varphi}{\partial z} = \frac{2zI}{crL} \left[-K + \frac{a^2 + r^2 + z^2}{(a-r)^2 + z^2} E \right],$$

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial(rA_\varphi)}{\partial z} = \frac{2I}{cL^2} \left[K + \frac{a^2 - r^2 - z^2}{(a-r)^2 + z^2} \right].$$

$$\text{На оси кольца } (r=0), \quad B_z = \frac{2\pi a^2 I}{c(a^2 + z^2)^{3/2}}.$$

По результатам измерений известно магнитное поле на полюсах. Последнее соотношение позволяет оценить силу кольцевого тока радиусом 1000 км, протекающего в экваториальной плоскости, который мог бы возбуждать геомагнитное поле. Величина тока оценивается в 10^{10} А. Это слишком большая величина. В качестве источника геомагнитного поля необходимо искать другое явление.

Прецессия протона в геомагнитном поле. Протон обладает моментом количества движения P и магнитным моментом M (рис. 33, а). Эти векторные величины связаны зависимостью:

$$\vec{M} = \gamma \vec{P},$$

где γ – гиромагнитное отношение протона. На протон в магнитном поле с индукцией T действует момент силы:

$$\vec{N} = \vec{M} \times \vec{T}.$$

Скорость изменения момента количества движения протона:

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{N} = \vec{M} \times \vec{T}.$$

Исключим величину P из последнего уравнения, получим:

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma \vec{M} \times \vec{T}.$$

Поскольку земное магнитное поле можно считать во время измерений постоянным, то после дифференцирования по времени получим дифференциальное уравнение второго порядка:

$$\frac{d^2 \vec{M}}{dt^2} = \gamma \frac{d\vec{M}}{dt} \times \vec{T} = \gamma^2 (\vec{M} \times \vec{T}) \times \vec{T}.$$

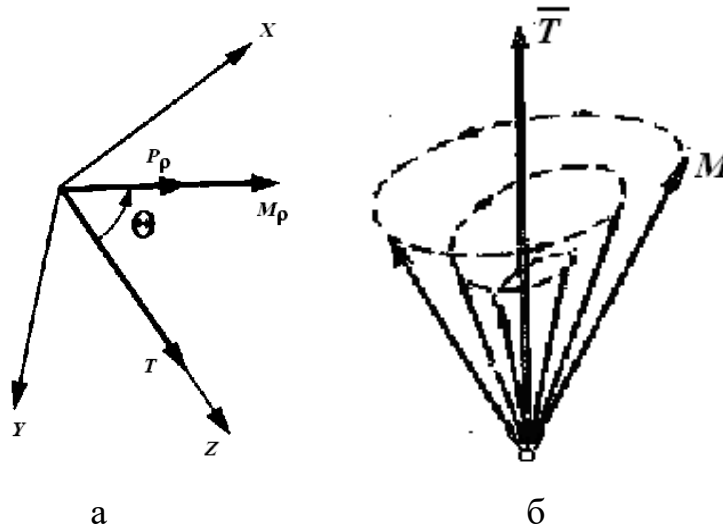


Рис. 33. К выводу уравнения прецессии протона в магнитном поле

Используем тождество $[A[BC]] = B(AC) - C(AB)$, получим

$$\frac{d^2 \vec{M}}{dt^2} = \gamma^2 \{ (\vec{M} \vec{T}) \vec{T} - T^2 \vec{M} \}.$$

Направим ось z по направлению T , тогда $T = T_z$. $T_x = T_y = 0$. Проекция векторного уравнения на оси координат:

$$\frac{d^2 M_z}{dt^2} = 0, \quad \frac{d^2 M_x}{dt^2} = -\gamma^2 T^2 M_x.$$

Решение первого уравнения $M = M \cos \Theta$ приводит к выводу о неизменности угла между M и T . Решение второго уравнения позволяет получить частоту свободной ядерной прецессии – частоту вращения магнитного момента протона вокруг вектора магнитной индукции (рис. 33, б):

$$\omega = \gamma T.$$

ЗАДАЧИ

1. На противоположных полюсах сплошного шара с электропроводностью γ находятся точечные заземления. По одному из них подводится ток I , а по другому – отводится. Определить плотность тока и потенциал внутри шара.

2. Вычислите частоту прецессии протона в магнитном поле в нашем городе, если $T = 55000$ нТл.

3. Вычислите напряженность магнитного поля над бесконечной плоскостью, по которой протекает ток с постоянной плотностью i . (Используйте формулу вычисления телесного угла.)

4. Определите магнитное поле кольцевого тока в центре кольца радиусом $a = 10$ см и током $I = 0,5$ А.

ПЕРЕМЕННОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Теорию электромагнитного поля создал выдающийся шотландский физик Джеймс Клерк Максвелл. Он теоретически доказал, что всякое изменение со временем магнитного поля приводит к возникновению переменного электрического поля, а всякое изменение со временем электрического поля порождает переменное магнитное поле. Эти порождающие друг друга переменные электрические и магнитные поля образуют единое электромагнитное поле. Источником электромагнитного поля служат ускоренно движущиеся электрические заряды. Вокруг зарядов, движущихся с постоянной скоростью (например, вокруг проводника с протекающим по нему электрическим током), создается постоянное магнитное поле. Некоторые графические схемы образования и распространения электромагнитного поля приведены на рис. 34.

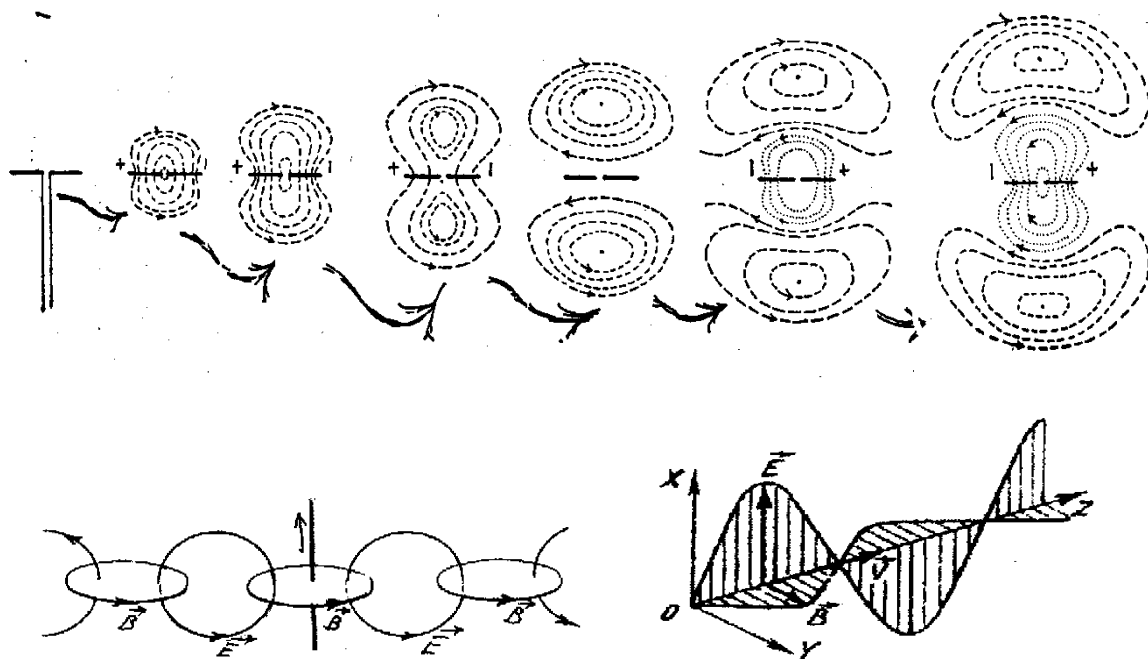


Рис. 34. Схемы образования и распространения электромагнитной волны

Под электромагнитным полем понимают вид материи, характеризующийся совокупностью взаимно связанных и взаимно обуславливающих друг друга электрического и магнитного полей. Электромагнитное поле обладает

характерными для него электрическими и магнитными свойствами, доступными наблюдению.

Электромагнитная волна – распространяющееся в пространстве электромагнитное поле (ЭМП). Впервые электромагнитные волны были получены Г. Герцем в его опытах, выполненных в 1888 – 1889 гг. (рис. 34). Сначала Герц был противником теории Максвелла. Целью опытов было опровержение гипотезы Максвелла, а результат опытов оказался блестящим подтверждением этой теории.

Двести лет назад источником электрического поля считались электрические заряды, а источником магнитного поля – магнитные заряды. Сейчас установлено, что изолированных магнитных полюсов нет, и источником магнитного поля считают молекулярные токи. Но по сложившейся традиции среднюю интенсивность магнитного поля в намагниченном веществе называют магнитной индукцией, а среднюю интенсивность электрического поля в диэлектрике – напряженностью электрического поля.

Уравнения Максвелла отражают экспериментально установленные фундаментальные соотношения между характеристиками электрического и магнитного полей. **Закон сохранения заряда** – один из фундаментальных законов природы – выполняется абсолютно точно. Полный заряд любой системы остается неизменным, если в нее не добавляются посторонние заряды извне:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{i} = 0,$$

где ρ – плотность электрических зарядов.

Максвелл предложил рассматривать плотность тока как сумму плотности тока проводимости $\vec{i}$ и плотности тока смещения $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$, который не связан с переносом заряда. Плотность тока смещения можно представлять как изменение во времени электрического поля между обкладками конденсатора (часто для краткости слово «плотность» опускают и говорят о токе). Первое уравнение Максвелла представляет собой закон Био – Савара для переменного тока в

дифференциальной форме. Оно отличается от закона Био – Савара для постоянного тока учетом тока смещения:

$$\text{rot } \vec{H} = \frac{4\pi}{c} \left(\vec{i} + \frac{\partial}{\partial t} \frac{\vec{D}}{4\pi} \right).$$

Магнитное поле создается движущимися электрическими зарядами и меняющимся во времени электрическим полем. Магнитные эффекты тока смещения и тока проводимости одинаковы. Поле полного тока является соленоидальным:

$$\text{div} \left(\vec{i} + \frac{\partial}{\partial t} \frac{\vec{D}}{4\pi} \right) = 0.$$

Данное уравнение является первым законом Кирхгофа. Вихрями магнитного поля являются токи проводимости и токи смещения. Линии полного тока нигде не начинаются и не кончаются, они замкнутые. В стационарном поле ток смещения отсутствует (равен 0).

Токи проводимости и смещения одинаковым образом возбуждают магнитное поле. Но ток проводимости – это смещение зарядов, а ток смещения не сопровождается движением частиц, ему отвечает изменение электрического поля. Ток смещения сопровождается выделением джоулева тепла, а ток смещения выделением джоулева тепла не сопровождается. В диэлектриках с поляризованными молекулами токи смещения вызывают выделение тепла, связанное с изменением поляризации. Выделение такого тепла описывается законами, отличающимися от законов Джоуля – Ленца.

Второе уравнение Максвелла представляет собой закон электромагнитной индукции Фарадея в дифференциальной форме:

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}.$$

Вихрями электрического поля являются изменения во времени магнитного поля. После некоторых преобразований из него получим:

$$\text{ЭДС} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}, \quad \left(\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q} \right),$$

где Φ – магнитный поток ($\Phi = \int \vec{B} d\vec{s}$). ЭДС, возникающая в проводнике, пропорциональна скорости изменения магнитного потока через контур этого проводника. Знак минус означает, что направление ЭДС и направление магнитного потока при его увеличении образуют левовинтовую систему. При всяком изменении потока магнитной индукции через проводящий замкнутый контур в нем возникают токи в таком направлении, что магнитное поле этих токов стремится компенсировать изменение магнитного потока. ЭДС в контуре равна работе, совершаемой электрическим полем по перемещению единичного заряда по заданному замкнутому контуру ($\text{ЭДС} = \int \vec{E} d\vec{l}$).

Электрическое поле создается не только зарядами, но и меняющимся во времени магнитным полем. Векторы электрического и магнитного поля взаимно перпендикулярны. Закон индукции Фарадея – Максвелла показывает, что силовой величиной, наряду с напряженностью электрического поля, является магнитная индукция; именно индукция заслуживает название «напряженность» магнитного поля.

Третье и четвертое уравнения Максвелла представляют собой запись теоремы Гаусса для электрического и магнитного полей:

$$\text{div } \vec{D} = 4\pi\rho.$$

Плотность источников электрического поля равна произведению плотности зарядов на 4π . Линии электрической индукции начинаются и заканчиваются на свободных зарядах.

$$\text{div } \vec{B} = 0.$$

Линии вектора магнитной индукции замкнуты, т.е. магнитное поле соленоидальное. В природе не существует магнитных зарядов. Магнитное поле чисто вихревое, оно возбуждается электрическими токами.

Для векторов электрической поляризации P и намагниченности J не существует общих и всегда справедливых законов их поведения, подобных уравнениям Максвелла.

Законы Максвелла записывают также в интегральной форме. После интегрирования уравнений Максвелла по некоторому объему V , ограниченному замкнутой поверхностью S , применим формулу Гаусса – Остроградского. Вычислим потоки и заменим их по формуле Стокса. После вынесения производных по времени за знак интеграла получим уравнения Максвелла в интегральной форме. Первое уравнение Максвелла в интегральной форме:

$$\oint_S D_n dS = \int_V q dV,$$

поток вектора электрической индукции через любую замкнутую поверхность равен сумме свободных зарядов, находящихся внутри этой поверхности. Данное уравнение является обобщением закона Кулона на объемно распределенные заряды и произвольное электрическое поле.

Аналогично получим второе уравнение Максвелла:

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t},$$

составим потоки от обеих частей через некоторую поверхность

$$\int_S \text{rot}_n \vec{E} dS = -\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \int_S B_n dS.$$

Применим к левой части уравнения формулу Стокса, получим:

$$\oint_l E_l dl = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S B_n dS.$$

В правой части стоит скорость изменения магнитного потока через поверхность, опирающуюся на контур. Это выражение обобщение закона Фарадея на любую часть пространства;

$$\oint_S B_n dS = 0,$$

число силовых линий, входящих в некоторый объем, равно числу выходящих линий.

Для четвертого уравнения интегральная форма имеет вид:

$$\oint_l H_l dl = \int_S j_n dS + \frac{\partial}{\partial t} \int_S D_n dS.$$

В правой части стоит сумма токов проводимости и смещения через поверхность S , слева – циркуляция магнитного поля. Циркуляция магнитного поля по любому замкнутому контуру равна полному току, протекающему через этот контур.

С помощью уравнений Максвелла можно найти напряженность электрического поля E и напряженность магнитного поля H , если известны плотность зарядов ρ и плотность тока i . Количество неизвестных, которые необходимо определить, шесть (по 3 компоненты для каждого вектора E и H).

Найдем отношение токов проводимости и смещения. Пусть задано гармоническое поле $E = E_0 \sin \omega t$. Ток проводимости равен $i = \gamma E = \gamma E_0 \sin \omega t$.

Ток смещения равен $\frac{\partial}{\partial t} \frac{D}{4\pi} = \frac{\varepsilon}{4\pi} \frac{\partial E}{\partial t} = \frac{\varepsilon \omega}{4\pi} E_0 \cos \omega t$. Отношение амплитуд токов, с учетом того, что синус и косинус меньше единицы: $\frac{i_{\text{ПП}}}{i_{\text{СМ}}} = \frac{2\gamma}{\varepsilon \omega}$.

Система уравнений Максвелла является полной, из нее можно определить все свойства поля. Она играет роль основополагающих аксиом для построения всей теории макроскопического переменного электромагнитного поля. Если материальные тела, находящиеся в поле, неподвижны, то в каждой точке μ , γ , ε остаются постоянными, в поле нет постоянных магнитов и ферромагнетиков, полная система дифференциальных уравнений классической электродинамики имеет вид:

Полная система уравнений Максвелла

$$\text{rot} \vec{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + 4\pi \frac{\vec{i}}{c},$$

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t},$$

$$\text{div} \vec{B} = 0,$$

$$\text{div} \vec{D} = 4\pi \rho,$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} = \vec{E} + 4\pi \vec{P},$$

Граничные условия

$$E_{t1} - E_{t2} = -\frac{\partial E_{21}}{\partial t},$$

$$D_{n1} - D_{n2} = 4\pi \sigma,$$

$$B_{n1} = B_{n2},$$

$$H_{t1} - H_{t2} = \frac{4\pi i_n}{c},$$

$$H_{t1} - H_{t2} = 0, \text{ если}$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} = \vec{B} - 4\pi\vec{J},$$

поверхностные токи

$$, \vec{I} = \gamma(\vec{E} + \vec{E}_c)$$

отсутствуют

Эту систему дополняют уравнением зависимости энергии поля от напряженности поля, которое позволяет проверить предшествующие уравнения экспериментально:

$$W = \frac{1}{8\pi} \int \vec{D}\vec{E}dV + \frac{1}{8\pi} \int \vec{B}\vec{H}dV.$$

Последнее уравнение характеризует преобразование энергии в процессах, которые описываются четырьмя уравнениями Максвелла. Величину $\vec{S} = \frac{c}{4\pi} [\vec{E}\vec{H}]$ называют вектором Умова – Пойнтинга, его истолковывают как поток электромагнитной энергии – количество энергии, протекающей в единицу времени через перпендикулярную направлению потока поверхность единичной площади. Направление вектора Умова – Пойнтинга, а следовательно, и направление потока энергии в волне, совпадает с направлением распространения волны. Скорость передачи энергии в изотропной среде совпадает со скоростью распространения волны. Справедлива интегральная теорема Пойнтинга: электромагнитная энергия вытекает через поверхность S из рассматриваемого объема V в количестве $\oint_S S_n dS$ единиц энергии в секунду. Объемная плотность энергии электромагнитного поля может быть оценена по формуле (СГС):

$$S = c (E^2 + B^2)/8\pi.$$

Плотность магнитной энергии в ЭМП равна плотности электрической энергии.

Ослабление энергии электрического поля E_0 в веществе описывается формулой

$$E = E_0 e^{-kx}, \quad k \cong 2\pi\nu\beta\mu^{1/2}/\epsilon,$$

где β – коэффициент потерь среды, μ – магнитная проницаемость, ν – частота ЭМП. Для воды при температуре 25 °С на частоте 3 МГц глубина проникновения

1.4 см, для льда – 1.2 м. Неметаллические материалы полупрозрачны для СВЧ ЭМП, которые проникают в них на значительную глубину.

В приведенных выше уравнениях не учитывается способ возбуждения поля. Токи и заряды могут создаваться химическими и механическими процессами, а не только электромагнитными силами. Силы неэлектромагнитного происхождения называют сторонними силами. С учетом сторонних сил уравнения Максвелла записывают:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + 4\pi(\vec{i} + \vec{i}_{cm}), \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \operatorname{div} \vec{B} = 0, \operatorname{div} \vec{D} = 4\pi(\rho + \rho_{cm}).$$

Полноту системы уравнений Максвелла характеризует теорема: электромагнитное поле $\vec{E}(x, y, z, 0)$, $\vec{H}(x, y, z, 0)$ в любой момент времени $t > 0$ в любой точке объема V , ограниченного замкнутой поверхностью S , однозначно определяется уравнениями Максвелла, если известны начальные значения $\vec{E}(x, y, z, 0)$, $\vec{H}(x, y, z, 0)$ во всем объеме V и либо для $\vec{E}(x, y, z, 0)$, либо для $\vec{H}(x, y, z, 0)$ известны граничные значения его тангенциальных составляющих на поверхности S в течение всего изучаемого промежутка времени $(0, t)$.

ВОЛНОВЫЕ УРАВНЕНИЯ

Применим операцию вихря к первому и второму уравнению Максвелла для однородной изотропной среды:

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \operatorname{rot} \vec{B}, \operatorname{grad}(\operatorname{div} \vec{E}) - \Delta \vec{E} = -\frac{\mu}{c} \frac{\partial}{\partial t} \operatorname{rot} \vec{H}, \Delta \vec{E} = \frac{\mu}{c} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{c} \frac{\partial \varepsilon \vec{E}}{\partial t} + 4\pi \frac{\vec{i}}{c} \right)$$

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{H} = \frac{1}{c} \operatorname{rot} \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) + \frac{4\pi}{c} \operatorname{rot} \vec{i}, -\Delta \vec{H} = \frac{\varepsilon}{c} \frac{\partial}{\partial t} \left(-\frac{1}{c} \mu \right) + \frac{4\pi\gamma}{c} \operatorname{rot} \vec{E}.$$

$$\Delta \vec{H} - \frac{4\pi\mu\gamma}{c^2} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \frac{\varepsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0$$

$$\Delta \vec{E} - \frac{\mu\varepsilon}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \frac{4\pi\gamma\mu}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0$$

Полученные уравнения называют телеграфными. В теории рассматривают частные случаи телеграфных уравнений:

1. Волновая модель поля рассматривается при распространении электромагнитных волн (ЭМВ) в изоляторе ($\gamma=0$):

$$\Delta \vec{H} - \frac{\epsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0, \quad \Delta \vec{E} - \frac{\mu\epsilon}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0.$$

2. Квазистационарная модель рассматривается для относительно мед-ленно меняющихся во времени полей (можно пренебречь второй производ-ной по времени по сравнению с первой):

$$\Delta \vec{H} - \frac{4\pi\mu\gamma}{c^2} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = 0, \quad \Delta \vec{E} - \frac{4\pi\gamma\mu}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0.$$

3. Стационарная модель – поле, не зависящее от времени. Электрическое и магнитное поля удовлетворяют уравнению Лапласа:

$$\Delta \vec{H} = 0, \quad \Delta \vec{E} = 0.$$

В приложениях чаще всего рассматривают гармонические поля, т.е. такие зависимость от времени которых описывается:

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \vec{E}(x, y, z) e^{-i\omega t},$$

$$\vec{H}(x, y, z, t) = \vec{H}(x, y, z) e^{-i\omega t}.$$

Для сокращения записи обозначим $\vec{E}(x, y, z) = \vec{E}$. Телеграфные уравнения для гармонического поля приобретают вид:

$$\Delta \vec{E} e^{-i\omega t} - \frac{\mu\epsilon\omega^2}{c^2} \vec{E} e^{-i\omega t} + \frac{4\pi\mu\gamma\omega}{c^2} \vec{E} e^{-i\omega t} = 0, \quad \Delta \vec{H} - \frac{\mu\epsilon\omega^2}{c^2} \vec{H} + \frac{4\pi\mu\gamma\omega}{c^2} \vec{H} = 0$$

После аналогичных преобразований для $\vec{H} = \vec{H}(x, y, z)$ получим уравнения Гельмгольца:

$$\Delta \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0,$$

$$\Delta \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0,$$

где $k = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon\mu + \frac{2\mu\gamma}{v} i} = \frac{\omega}{c} (n + i\beta)$ – комплексное волновое число среды – число волн, укладывающихся в отрезок 2π сантиметров. Решения уравнений Гельмгольца:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 e^{-ikz} + \vec{E}_2 e^{ikz}, \quad \vec{H} = \vec{H}_1 e^{-ikz} + \vec{H}_2 e^{ikz}.$$

При $\gamma=0$ в идеальном диэлектрике $\beta=0$, волновое число становится вещественным. Если значение γ очень велико, поле будут определять токи проводимости. Если электропроводность мала или очень велика частота ω , то поле будет обусловлено токами смещения.

Величины, из которых складывается волновое число, называют:

коэффициентом преломления –
$$n = \sqrt{\sqrt{\left(\frac{\epsilon\mu}{2}\right)^2 + \left(\frac{\mu\gamma}{v}\right)^2} + \frac{\epsilon\mu}{2}},$$

коэффициент поглощения –
$$\beta = \sqrt{\sqrt{\left(\frac{\epsilon\mu}{2}\right)^2 + \left(\frac{\mu\gamma}{v}\right)^2} - \frac{\epsilon\mu}{2}}.$$

Рассмотрим, как меняется с глубиной переменное поле в горизонтальной пластине толщиной h , ток в которой направлен по оси Ox . Ось Oz направим вниз (рис. 35). Считаем горизонтальные размеры пластины бесконечными, следовательно, E и H зависят только от координаты z . Получим волновые уравнения в виде:

$$\frac{\partial^2 E(z)}{\partial z^2} + k^2 E(z) = 0, \quad \frac{\partial^2 H(z)}{\partial z^2} + k^2 H(z) = 0.$$

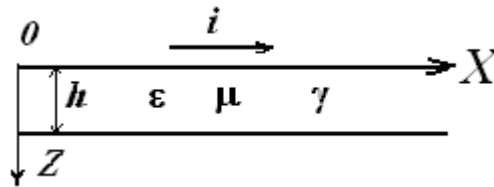


Рис. 35. Горизонтальная пластина

Решение этих уравнений может быть представлено в виде:

$$E(z) = A_1 e^{ikz} + B_1 e^{-ikz}, \quad H(z) = A_2 e^{ikz} + B_2 e^{-ikz},$$

что можно проверить прямой подстановкой. Коэффициенты A_1, A_2, B_1, B_2 найдем с помощью граничных условий $E(0) = E(h), H(0) = -H(h)$.

$$A_1 + B_1 = A_1 e^{ikh} + B_1 e^{-ikh}, \quad A_2 + B_2 = -A_2 e^{ikh} + B_2 e^{-ikh}.$$

Исключим лишние константы из решения:

$$E = A_1 \left(e^{-i(\omega t - kz)} + e^{-i(\omega t - k(h-z))} \right), \quad H = A_2 \left(e^{-i(\omega t - kz)} + e^{-i(\omega t - k(h-z))} \right).$$

Второе уравнение Максвелла $\text{rot } \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ в условиях задачи примет вид:

$$\frac{\partial E}{\partial z} = -\frac{\mu}{c} \frac{\partial H}{\partial t},$$

что позволяет исключить из решения еще одну константу

$$A_2 = \frac{ck}{\omega\mu} A_1 = \frac{n + i\beta}{\mu} A_1 = A_1 \frac{\sqrt{n^2 + \beta^2}}{\mu} e^{i\varphi}, \text{ где } \varphi = \arctg \frac{\beta}{n}.$$

В итоге после оставления вещественной части решения получим для пластины:

$$E(z, t) = A_1 \left[e^{\frac{-\omega}{c}\beta z} \cos \omega \left(t - \frac{n}{c} z \right) + e^{\frac{-\omega}{c}\beta(h-z)} \cos \left(t - \frac{n}{c} (h - z) \right) \right],$$

$$H(z, t) = A_1 \frac{\sqrt{n^2 + \beta^2}}{\mu} \left[e^{\frac{-\omega}{c}\beta z} \cos \omega \left(\omega t - \omega \frac{n}{c} z - \varphi \right) - e^{\frac{-\omega}{c}\beta(h-z)} \cos \left(\omega t - \omega \frac{n}{c} (h - z) - \varphi \right) \right].$$

Если рассматривать проводящее полупространство, то решение для него будет ($h \rightarrow \infty$):

$$E(z, t) = A_1 e^{\frac{-\omega}{c}\beta z} \cos \left(\omega t - \omega \frac{n}{c} z \right),$$

$$H(z, t) = A_1 \frac{\sqrt{n^2 + \beta^2}}{\mu} e^{\frac{-\omega}{c}\beta z} \cos \left(\omega t - \omega \frac{n}{c} z - \varphi \right).$$

Полученный результат приводит к выводу, что амплитуды электрического и магнитного полей убывают с глубиной по экспоненциальному закону. На глубине $z = \frac{c}{\omega\beta}$ они убывают в e раз. Эта глубина называется **глубиной проникновения поля, или скин-слоем**. Процессы, происходящие в микроволновой печи и при использовании сотовой связи, описываются уравнениями Максвелла. Схожий процесс происходит при разогревании продуктов в микроволновой печи.

Электромагнитным волнам присущи свойства:

- отражение, преломление, поглощение при падении на границу раздела сред (рис. 36);

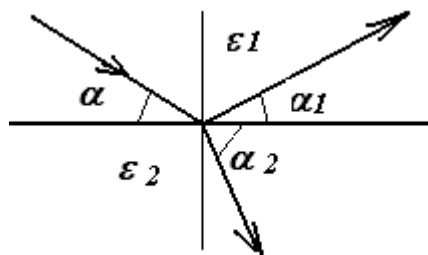


Рис. 36. Схема отражения и преломления плоской волны

- скорость распространения ЭМВ в однородной среде с диэлектрической проницаемостью ϵ и магнитной проницаемостью μ определяется по формуле $v = c / \sqrt{\epsilon\mu}$ (закон Максвелла);
- интерференция, дифракция – огибание препятствий, дисперсия – зависимость параметров среды от частоты ЭМВ;
- ЭМВ – поперечные волны, колебания E и B происходят в плоскости перпендикулярной направлению скорости волны v , векторы E и B с направлением распространения волны образуют правовинтовую систему;
- ЭМВ переносят энергию, массу, но электрический заряд волной не переносится.

Для излучения интенсивных ЭМВ необходима достаточно высокая частота электрических колебаний и незамкнутая электрическая цепь, интенсивность электромагнитных волн, пропорциональная ускорению движущихся электрических зарядов или четвертой степени частоты колебаний ν^4 .

Электромагнитные волны характеризуют длиной волны (λ) и частотой (ν), которые связаны между собой соотношением:

$$\lambda = cT = c/\nu,$$

где T – период колебаний.

Плоской волной называют волну, амплитуда которой зависит только от времени и одной из пространственных координат, направление которой совпадает с направлением распространения волны. У плоской волны в любой момент времени во всех точках любой плоскости, перпендикулярной

направлению распространения волны, векторы E и H имеют одинаковые значения.

Если на пути распространения плоских ЭМВ находится граница сред с разными свойствами, появляются отраженная и преломленная волны. Коэффициент отражения при падении плоской волны из вакуума на проводник

$$r = \frac{\left(\mu - \sqrt{\frac{\gamma\mu}{v}}\right)^2 + \frac{\gamma\mu}{v}}{\left(\mu + \sqrt{\frac{\gamma\mu}{v}}\right)^2 + \frac{\gamma\mu}{v}}.$$

При $v = 250$ ГГц для меди коэффициент отражения равен 98.5 %. Это позволяет применять металлические поверхности в качестве экранов.

Для плоских волн, когда электромагнитное поле зависит только от одной координаты, уравнения поля:

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - c \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} - c \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial z^2} = 0.$$

Решение этих уравнений:

$$E = E_1 \left(t - \frac{z}{c}\right) + E_2 \left(t + \frac{z}{c}\right), \quad H = H_1 \left(t - \frac{z}{c}\right) + H_2 \left(t + \frac{z}{c}\right).$$

Если в момент времени t_0 поле E_1 принимает некоторое значение, то через время t на удалении ct оно примет то же значение. Решения E_1 и H_1 представляет собой плоскую волну, распространяющуюся со скоростью c в положительном направлении оси Oz . Решения E_2 и H_2 представляет собой плоскую волну, распространяющуюся со скоростью c в противоположном направлении оси Oz . Отношение амплитуд E и H от времени не зависит, т.е. векторы изменяются синхронно.

ЗАДАЧИ

1. Докажите, что функция $\frac{\exp i(\omega t - kR)}{R}$ является решением волнового уравнения.

2. Вычислите коэффициент отражения от скалы при нормальном падении волны, если характеристики пород, слагающих скалу, $\varepsilon = 5$, $\mu = 1$, частота поля $\nu = 10^9$ Гц, $\gamma = 2 \cdot 10^6$ ед. СГСЭ.

3. Найдите составляющие магнитного поля плоской волны, если электрическое поле определено выражением

$$E = E \left(t - \frac{y \cos \beta + z \cos \gamma}{v} \right)$$

и направлено по оси Ox . Воспользуйтесь вторым уравнением Максвелла).

4. Вычислите волновое число среды с $\varepsilon = \mu = 1$, $\gamma = 2 \cdot 10^5$ ед. СГСЭ при частоте поля 10^5 Гц.

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

Размеры и форма тел при приложении внешних сил могут изменяться. Свойство сопротивляемости изменению формы и размеров тел и возврата к прежнему состоянию после прекращения воздействия внешних сил называют упругостью. Если после снятия нагрузки происходит полное восстановление формы и размеров тела, то его называют идеально упругим. Деформация такого тела не зависит от времени действия нагрузки и предшествующего состояния. У идеально упругих тел деформация происходит без трения, ее величина очень мала, а затраченная энергия полностью переходит в накопленную в теле упругую энергию.

Горные породы верхней части земной коры при действии кратковременной нагрузки ведут себя как хрупкие и упругие тела. Об их высокой упругости свидетельствует способность горных пород передавать сейсмические волны. О хрупкости горных пород свидетельствуют повсеместно встречающиеся разломы разного порядка. Горные породы при приложении небольшой нагрузки можно считать идеально упругими. Их деформация полностью обратима, ее величина пропорциональна приложенной нагрузке. После снятия нагрузки деформация исчезает.

Результат механического воздействия на среду принято характеризовать смещением, напряжением и деформацией. При действии механических напряжений происходит смещение частиц среды. Смещение частицы можно характеризовать вектором $U(u_0, v_0, w_0)$. Если можно подобрать скалярную функцию такую что:

$$U = \text{grad } \varphi = \vec{i} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial \varphi}{\partial z},$$

то скалярную функцию называем потенциалом φ .

Выделим в среде площадку, ориентировку которой определим вектором n , перпендикулярным к среде. Действие силы dF , направленной соосно с нормалью к площадке, на площадку dS характеризуют вектором напряжения: $\vec{p}_n = \frac{d\vec{F}}{dS}$.

Ориентировка напряжения может отличаться от n , поэтому индекс указывает на ориентировку относительно площадки (рис. 37, а). Для трех взаимно перпендикулярных площадок для той же силы $d\vec{F}$ получим:

$$\vec{p}_x = \frac{d\vec{F}}{dS_{zy}}, \quad \vec{p}_y = \frac{d\vec{F}}{dS_{xz}}, \quad \vec{p}_z = \frac{d\vec{F}}{dS_{xy}}.$$

Эти векторы полностью характеризуют напряжение в рассматриваемой точке. Поскольку каждый из трех векторов имеет три компоненты, тензор напряжений запишем:

$$p = \begin{vmatrix} p_{xx} & p_{xy} & p_{xz} \\ p_{yx} & p_{yy} & p_{yz} \\ p_{zx} & p_{zy} & p_{zz} \end{vmatrix},$$

где первый индекс указывает на нормаль к площадке, а второй – на компоненту напряжения. Например, p_{xy} – компонента напряжения по оси x на площадке с нормалью по оси y . Величины p_{xx} , p_{yy} , p_{zz} называют нормальными напряжениями, p_{xy} , p_{xz} , p_{yx} , p_{yz} , p_{zx} , p_{zy} называют касательными напряжениями (тангенциальными). В любой точке деформируемой среды можно указать три взаимно перпендикулярных направления, таких, касательные напряжения к которым отсутствуют (равны 0). Эти направления называют главными направлениями, а напряжения – главными напряжениями. Если выбрать направления осей координат совпадающие с главными направлениями, тензор напряжений принимает вид:

$$p = \begin{vmatrix} p_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & p_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & p_{zz} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} p_1 & 0 & 0 \\ 0 & p_2 & 0 \\ 0 & 0 & p_3 \end{vmatrix}.$$

В этом выражении $p_1 \geq p_2 \geq p_3$. Напряжения служат количественной оценкой воздействия внешних сил на геологическую среду.

Пусть точка A сместилась в направлении координатных осей на u_0 , v_0 , w_0 . Находящаяся вблизи точки A точка B сместится на расстояние (рис. 37, б) u_0+dx , v_0+dy , w_0+dz . Используя разложение смещения в ряд Тейлора, получим:

$$u = u_0 + \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy + \frac{\partial u}{\partial z} dz,$$

$$v = v_0 + \frac{\partial v}{\partial x} dx + \frac{\partial v}{\partial y} dy + \frac{\partial v}{\partial z} dz ,$$

$$u = u_0 + \frac{\partial w}{\partial x} dx + \frac{\partial w}{\partial y} dy + \frac{\partial w}{\partial z} dz .$$

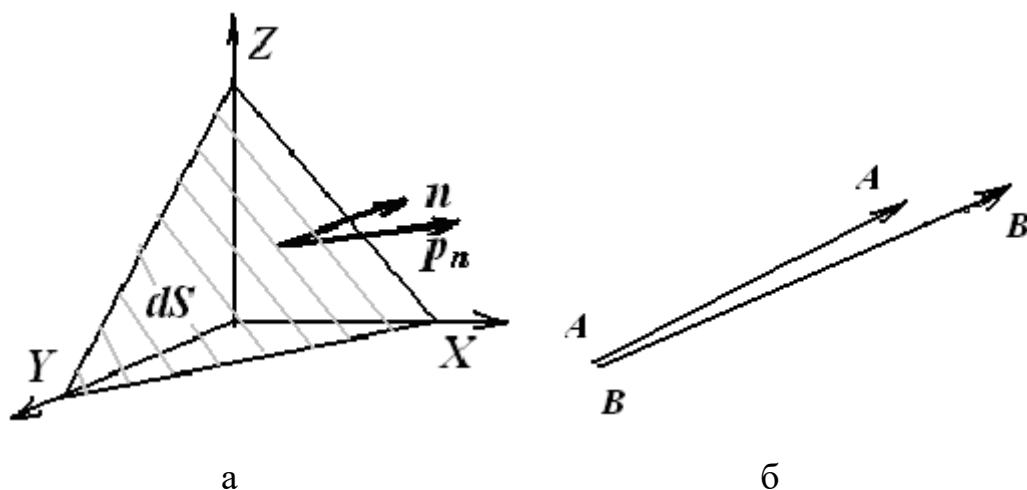


Рис. 37. К определению вектора смещения (а), тензора напряжений (б)

Безразмерные производные в этих выражениях имеют смысл относительных смещений. Они являются мерой изменения формы и размеров тел под действием напряжений. Их называют составляющими тензора деформации:

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{vmatrix} .$$

На диагонали в матрице находятся относительные растяжения, вне диагонали – относительные сдвиги. Тензоры деформации несимметричны.

Всегда в каждой точке можно выбрать три взаимно перпендикулярных направления, таких, что направленный отрезок при деформации сохраняет направление, а меняется только его величина. Такие направления и деформации называют главными. Сжатию соответствуют положительные главные деформации, растяжению отвечают отрицательные значения главных деформаций.

Смещение точек среды принято раскладывать на три составляющие: параллельный перенос, чистую деформацию и вращение. Принято разлагать тензор деформации на симметричную и несимметричную части. Вводятся обозначения:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}, \quad \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \\ \varepsilon_{xz} &= \varepsilon_{zx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right), \quad \varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right), \\ \omega_x &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right), \quad \omega_y = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right), \quad \omega_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right).\end{aligned}$$

Тензор чистой деформации можно представить:

$$\begin{vmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{vmatrix}.$$

Под действием внешних сил тело может испытывать кручение. Асимметричная часть тензора деформации

$$\begin{vmatrix} 0 & -\varpi_z & -\varpi_y \\ -\varpi_z & 0 & -\varpi_x \\ -\varpi_y & -\varpi_x & 0 \end{vmatrix}$$

Вектор кручения

$$\vec{\omega} = \text{rot } \vec{U}.$$

Его компоненты:

$$\omega_x = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right), \quad \omega_y = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right), \quad \omega_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right).$$

Точки куба, находящиеся на главных направлениях, смещаются вдоль этих направлений. Сумма величин, стоящих на диагонали, не зависит от выбора системы координат, т. е. является инвариантом. Эту сумму называют дилатацией, она равна относительному изменению объема. Иначе дилатацию можно записать:

$$\theta = \operatorname{div} \vec{U} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}.$$

Если смещение имеет только радиальную составляющую, то в сферических координатах дилатация имеет вид:

$$\theta = \frac{2u}{r} + \frac{\partial u}{\partial r}.$$

Для малого объема однородной среды обобщенный закон Гука имеет вид:

$$p_{xx} = a_{11}\varepsilon_{xx} + a_{12}\varepsilon_{yy} + a_{13}\varepsilon_{zz} + 2a_{14}\varepsilon_{yz} + 2a_{15}\varepsilon_{zx} + 2a_{16}\varepsilon_{xy},$$

$$p_{yy} = a_{21}\varepsilon_{xx} + a_{22}\varepsilon_{yy} + a_{23}\varepsilon_{zz} + 2a_{24}\varepsilon_{yz} + 2a_{25}\varepsilon_{zx} + 2a_{26}\varepsilon_{xy},$$

$$p_{zz} = a_{31}\varepsilon_{xx} + a_{32}\varepsilon_{yy} + a_{33}\varepsilon_{zz} + 2a_{34}\varepsilon_{yz} + 2a_{35}\varepsilon_{zx} + 2a_{36}\varepsilon_{xy},$$

$$p_{yz} = a_{41}\varepsilon_{xx} + a_{42}\varepsilon_{yy} + a_{43}\varepsilon_{zz} + 2a_{44}\varepsilon_{yz} + 2a_{45}\varepsilon_{zx} + 2a_{46}\varepsilon_{xy},$$

$$p_{zx} = a_{51}\varepsilon_{xx} + a_{52}\varepsilon_{yy} + a_{53}\varepsilon_{zz} + 2a_{54}\varepsilon_{yz} + 2a_{55}\varepsilon_{zx} + 2a_{56}\varepsilon_{xy},$$

$$p_{xy} = a_{61}\varepsilon_{xx} + a_{62}\varepsilon_{yy} + a_{63}\varepsilon_{zz} + 2a_{64}\varepsilon_{yz} + 2a_{65}\varepsilon_{zx} + 2a_{66}\varepsilon_{xy}.$$

Матрица коэффициентов a_{ij} антисимметричная, т.е. $a_{ij} = a_{ji}$. Коэффициенты a_{ij} называют модулями упругости. Например, для известняка $a_{11} = 3500 \text{ Н/м}^2$.

Реакция среды на механические воздействия зависит от свойств среды. Упругие свойства среды мы будем рассматривать в рамках линейного закона Гука. Наиболее простое выражение закон имеет в изотропных средах, свойства которых не зависят от направления. Удлинение в этом случае пропорционально действующему напряжению:

$$l = l_0(1 + \alpha p),$$

где α – коэффициент линейного растяжения. Величину $E = 1/\alpha$ называют модулем Юнга, численно она равна напряжению, при котором удлинение равно первоначальной длине. Модуль Юнга характеризует сопротивление упругой среды действующей силе. Удлинение сопровождается изменением поперечных размеров. Это изменение

$$d = d_0(1 - \beta p)$$

характеризуют коэффициентом поперечного сжатия β . Используют коэффициент Пуассона $\sigma = \beta/\alpha$. Величину

$$E' = \frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)} E$$

называют модулем одностороннего сжатия безграничного слоя.

При действии касательных напряжений закон Гука имеет следующий вид:

$$\frac{\Delta l}{h} = \gamma p_t$$

где γ – коэффициент сдвига.

$$G = \frac{E}{2(1+\sigma)},$$

где $G = 1/\gamma$ – модуль сдвига.

Для характеристики напряженного состояния среды используют также угол $\psi = p_t / G$.

Напряженное состояние характеризуют константами Ламэ λ и μ . (Константу μ называют модулем сдвига). Они связаны с модулем Юнга, модулем всестороннего сжатия и коэффициентом Пуассона:

$$\lambda = \frac{E\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}, \mu = \frac{E}{2(1+\sigma)}, E = \frac{\mu(3\lambda+2\mu)}{\lambda+\mu}, \sigma = \frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)}, K = \frac{E}{3(1-2\sigma)}.$$

Упругие константы не могут принимать произвольные значения. Справедливы ограничения: $\lambda > 0$, $\mu > 0$, $0 < \sigma < 0,5$, $E > 0$, $K > 0$.

УПРУГИЕ ВОЛНЫ

Рассмотрим задачу о передаче движений в упругой твердой среде. Выведем уравнение, описывающее движение частиц твердой упругой среды. Под действием внешних сил, приложенных к ограниченной части среды, например взрыва, частицы двигаются. В упругой среде частицы колеблются возле положения равновесия. Колебания передаются от одной частицы среды другой частице с некоторой скоростью. При этом надо учитывать объемные силы (массовые силы), в первую очередь силы инерции. Среду будем считать однородной и изотропной, т.е. упругие характеристики σ , E и другие постоянные величины.

Статическое равновесие в среде наступает при равенстве результирующей действия всех сил нулю и равенстве нулю результирующего момента сил:

$$f_x + \frac{\partial p_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial p_{xz}}{\partial z} = 0,$$

$$f_y + \frac{\partial p_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zy}}{\partial z} = 0,$$

$$f_z + \frac{\partial p_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zz}}{\partial z} = 0.$$

Определим деформацию сплошного шара от взаимного притяжения его частиц.

Примем радиус шара равным a . На каждую точку шара действует сила $F = -\frac{\rho g r}{a}$, направленная радиально. Уравнение равновесия примет вид:

$$\frac{d}{dr} \left(\frac{du_r}{dr} + \frac{2u_r}{r} \right) - \frac{\rho g r}{a(\lambda + 2\mu)} = 0.$$

Общее решение данного уравнения $u_r = Cr$. Частное решение возьмем в виде $u_r = C_0 r^3$. Подставляя частное решение в уравнение равновесия, определим константу:

$$C_0 = \frac{\rho g}{10a(\lambda + 2\mu)}.$$

На свободной внешней поверхности шара напряжения равны нулю. В итоге решение примет вид:

$$u_r = -\frac{1}{10} \frac{\rho g a r}{\lambda + 2\mu} \left(\frac{5\lambda + 6\mu}{3\lambda + 2\mu} - \frac{r^2}{a^2} \right).$$

Внутри сферы радиуса $r = a \sqrt{\frac{5\lambda + 6\mu}{9\lambda + 6\mu}}$ деформация представляет собой укорочение, а вне этой сферы деформация – удлинение.

В цилиндрических координатах уравнения равновесия имеют вид:

$$\frac{\partial R_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial R_\beta}{\partial \beta} + \frac{\partial R_z}{\partial z} + \frac{R_r - R_\beta}{r} + R = 0,$$

$$\frac{\partial B_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial B_\beta}{\partial \beta} + \frac{\partial B_z}{\partial z} + \frac{2B_r}{r} + B = 0,$$

$$\frac{\partial Z_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial Z_\beta}{\partial \beta} + \frac{\partial Z_z}{\partial z} + \frac{Z_r}{r} + Z = 0.$$

Уравнения равновесия в сферических координатах:

$$\frac{\partial R_r}{\partial r} + \frac{1}{r \sin \alpha} \frac{\partial R_\beta}{\partial \beta} + \frac{1}{r} \frac{\partial R_\alpha}{\partial \alpha} + \frac{2R_r - B_\beta - A_\alpha + R_\alpha \operatorname{ctg} \alpha}{r} + R = 0,$$

$$\frac{\partial B_r}{\partial r} + \frac{1}{r \sin \alpha} \frac{\partial B_\beta}{\partial \beta} + \frac{1}{r} \frac{\partial B_\alpha}{\partial \alpha} + \frac{B_\alpha (3 + 2 \operatorname{ctg} \alpha)}{r} + B = 0,$$

$$\frac{\partial A_r}{\partial r} + \frac{1}{r \sin \alpha} \frac{\partial A_\beta}{\partial \beta} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_\alpha}{\partial \alpha} + \frac{(R_r - B_\beta) \operatorname{ctg} \alpha - 3A_r}{r} + A = 0.$$

Уравнение равновесия в декартовых координатах можно переписать в виде:

$$f_x + \operatorname{div} \vec{p}_x = 0,$$

$$f_y + \operatorname{div} \vec{p}_y = 0,$$

$$f_z + \operatorname{div} \vec{p}_z = 0.$$

Если к этим уравнениям добавить силы инерции, получим даламберовские условия динамического равновесия:

$$f_x + \operatorname{div} \vec{p}_x - \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0,$$

$$f_y + \operatorname{div} \vec{p}_y - \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0,$$

$$f_z + \operatorname{div} \vec{p}_z - \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0.$$

Плотность среды связана с константами Ламэ и со скоростями распространения продольной и поперечной упругих волн в ней:

$$v_p^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho}, \quad v_s^2 = \frac{\mu}{\rho}.$$

Продольная волна – это поступательное движение частиц среды в направлении распространения колебаний. При распространении продольной волны происходит изменение элементарных объемов среды. Поперечная волна –

это малые вращения частиц среды в плоскости ортогональной направлению распространения колебаний. При этом происходит изменение формы элементарных объемов без изменения объема. Относительные изменения формы и объема горных пород при проведении сейсморазведки не превышает 0,0001.

Выполним преобразования:

$$\operatorname{div} \vec{p}_x = \operatorname{div}(\vec{i} p_{xx} + \vec{j} p_{xy} + \vec{k} p_{xz}) = \frac{\partial p_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial p_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial p_{xz}}{\partial z}.$$

Для записи закона Гука в изотропной среде достаточно только констант Ламэ:

$$p_{xx} = \lambda \theta + 2\mu \varepsilon_{xx}, \quad p_{yy} = \lambda \theta + 2\mu \varepsilon_{yy}, \quad p_{zz} = \lambda \theta + 2\mu \varepsilon_{zz},$$

$$p_{xy} = 2\mu \varepsilon_{xy}, \quad p_{yz} = 2\mu \varepsilon_{yz}, \quad p_{zx} = 2\mu \varepsilon_{zx}.$$

Динамические уравнения движения и равновесия имеют вид:

$$f_x + (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial x} + \mu \Delta u - \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0,$$

$$f_y + (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial y} + \mu \Delta v - \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0,$$

$$f_z + (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial z} + \mu \Delta w - \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0.$$

В однородной и изотропной среде возможно раздельное рассмотрение механических перемещений частиц в виде продольных и поперечных волн. В такой среде вектор смещений можно представить в виде суммы вихревой и потенциальной части. Будем считать среду изотропной, т.е. ее можно охарактеризовать двумя упругими модулями Ламэ, а векторы силы $F(f_x, f_y, f_z)$ и смещений $U(u, v, w)$ имеет две составляющие – потенциальную и вихревую:

$$F = F_1 + F_2, \quad U = U_1 + U_2.$$

Исходя из условия составления суммы векторов $\operatorname{div} \vec{U}_2 = 0, \quad \operatorname{rot} \vec{U}_1 = 0$. Уравнение движения и равновесия для суммы потенциальной и вихревой части получим:

$$(\lambda + \mu) \operatorname{grad} \operatorname{div}(\vec{U}_1 + \vec{U}_2) + \mu \Delta(\vec{U}_1 + \vec{U}_2) - \rho \frac{\partial}{\partial t}(\vec{U}_1 + \vec{U}_2) + (\vec{F}_1 + \vec{F}_2) = 0.$$

Поскольку $\Delta \vec{A} = \text{grad div } \vec{A} - \text{rot rot } \vec{A}$, то после переноса слагаемых, относящихся к разным векторам в разные части уравнения

$$\frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \Delta \vec{U}_1 - \frac{\partial^2 \vec{U}_1}{\partial t^2} + \frac{1}{\rho} \vec{F}_1 = -\frac{\mu}{\rho} \Delta \vec{U}_2 - \frac{\partial^2 \vec{U}_2}{\partial t^2} + \frac{1}{\rho} \vec{F}_2.$$

Для выполнения равенства достаточно, чтобы правая и левая части уравнения были равны 0, тогда с учетом связи констант Ламэ со скоростями распространения волн получим:

$$\Delta \vec{U}_1 - \frac{1}{v_p^2} \frac{\partial^2 \vec{U}_1}{\partial t^2} = -\frac{1}{\rho v_p^2} \vec{F}_1,$$

$$\Delta \vec{U}_2 - \frac{1}{v_s^2} \frac{\partial^2 \vec{U}_2}{\partial t^2} = -\frac{1}{\rho v_s^2} \vec{F}_2.$$

Пусть вектор смещения направлен вдоль одной из пространственных координат, а его величина зависит только от времени и той же пространственной координаты, например $\vec{U} = u(x, t) \vec{i}$. В этом случае $\theta = \frac{\partial u}{\partial x}$.

Уравнение движения

$$(\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x} \text{div } \vec{U} + \mu \Delta u + f_x = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

в отсутствии объемных сил примет вид:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{v_p^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0.$$

Общее решение этого уравнения:

$$u = u_1 \left(t - \frac{x}{v_p} \right) + u_2 \left(t + \frac{x}{v_p} \right),$$

где u_1 и u_2 – произвольные дважды дифференцируемые функции. Первое слагаемое представляет собой плоскую продольную волну, распространяющуюся в положительном направлении Ox , а второе – продольную волну, распространяющуюся в отрицательном направлении Ox .

Если вектор смещения зависит от переменной x , а смещение направлено вдоль оси Oy , т.е. $\vec{U} = u(x,t)\vec{j}$, при отсутствии объемных сил уравнение движения примет вид:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{v_s^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0.$$

Решение в этом случае представляет собой плоские поперечные волны. Для смещения, меняющегося по гармоническому закону, для плоской волны получим:

$$u = u_0 \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) + \varphi_0 \right],$$

где φ_0 – начальная фаза, ω – круговая частота, v – скорость, отвечающая типу волны (v_p или v_s), u_0 – амплитуда.

В сейсморазведке упругие колебания возбуждают взрывными источниками. Обычно на расстоянии несколько десятков метров можно считать такой источник сферическим излучателем. Радиальное давление

$$p_{rr} = \lambda \theta + 2\mu \frac{\partial u}{\partial r} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u}{\partial r} + 2 \frac{\lambda u}{r}.$$

Будем считать, что сферический излучатель возбуждает гармонические колебания. В идеальном случае смещения точек будут иметь только радиальную составляющую. Тогда на удалении $r = r_0$:

$$P_0 e^{i\omega t} = \left[(\lambda + 2\mu) \frac{\partial u}{\partial r} + 2 \frac{\lambda u}{r} \right] \Big|_{r=r_0}.$$

Скалярный потенциал:

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial r}, \quad \varphi = A \frac{e^{-i\omega(t-r/V_p)}}{r}.$$

Используя граничные условия, можно определить смещение и скалярный потенциал:

$$\varphi = -\frac{P_0 r_0}{r \rho B} e^{i\omega(t - \frac{r-r_0}{V_p})}, \quad u = \frac{P_0 r_0}{r \rho B} \left(\frac{1}{r} + \frac{i\omega}{V_p} \right) e^{i\omega(t - (r-r_0)/V_p)},$$

где $B = \frac{4V_S^2}{r_0} + \frac{4i\omega}{r_0 V_p} V_S^2 - \omega^2$.

Первое слагаемое убывает значительно медленнее, чем второе слагаемое. Поэтому на удалении от источника смещение характеризуют первым слагаемым:

$$u = u_0 \frac{e^{i\omega(t-(r-r_0)/V_p)}}{r}.$$

Распространение упругих колебаний в среде сопровождается переносом энергии. Плотность потока переносимой энергии определяется вектором Умова:

$$|\vec{P}| = \frac{1}{2} \rho V_p \omega^2 A^2,$$

где V_p – скорость продольных волн, ρ – плотность среды, ω – циклическая частота, A – амплитуда колебаний.

ЗАДАЧА

Определить смещения и напряжения в замкнутой сферической оболочке, нагруженной снаружи равномерно распределенным давлением p_e ($r = a$) и равномерно распределенным давлением изнутри p_i ($r = b$).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Альпин Л. М., Даев Д. С., Каринский А. Д. Теория полей, применяемых в разведочной геофизике. М.: Недра, 1985. 407 с.

Бицадзе А. В. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1982. 336 с.

Кауфман А. А. Введение в теорию геофизических методов. Ч. 1. Гравитационные, электрические и магнитные поля. М.: Недра, 1997. 520 с.

Кондратьев Б. П. Теория потенциала. Новые методы и задачи с решениями. М.: Мир, 2007. 512 с.

Кормильцев В. В., Ратушняк А. Н. Моделирование геофизических полей при помощи объемных векторных интегральных уравнений. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 98 с.

Кудрявцев Ю. И. Теория поля и ее применение в геофизике. Л.: Недра, 1988. 335 с.

Кутас Р. И., Цвященко В. А., Корчагин И. Н. Моделирование теплового поля континентальной литосферы. Киев: Наукова думка, 1989. 192 с.

Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. (Серия : Теоретическая физика. Т. VIII.) М.: Наука, 1982. 352 с.

Муратов Р. З. Потенциалы эллипсоида. М.: Атомиздат, 1976. 144 с.

Овчинников И. К. Теория поля. М.: Недра, 1979. 352 с.

Овчинников И. К. Электроразведка рудных объектов под верхним слоем земной коры. М.: Недра, 1975. 88 с.

Петровский И. Г. Лекции по теории интегральных уравнений. М.: Изд-во. МГУ, 1984. 136 с.

Рид М., Саймон Б. Методы современной математической физики. Т. 3. Теория рассеяния. М.: Мир, 1982. 443 с.

Саваренский Е. Ф. Сейсмические волны. М.: Недра, 1972. 296 с.

Сапожников В. М., Шевченко В. Г. Теория и методика электроразведки в градиентных средах. Л.: Недра, 1992. 135 с.

Серкерев С. А. Теория гравитационного и магнитного потенциалов. М.: Недра, 1990. 304 с.

Смирнов А. А. Введение в теорию электромагнитного поля. М.: Недра, 1975. 136 с.

Соболев С. А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1966. 444 с.

Тамм И. Е. Основы электричества. Изд-е 8. М.: Наука, 1966. 624 с.

Тимошенко С. П. Курс теории упругости. Киев: Наукова думка, 1972. 506 с.

Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1972. 736 с.

Халилеев П. А. Основные понятия электродинамики сплошных сред. Свердловск: УрО АН СССР, 1989. 230 с.

Филатов В. В. Начала теории упругости и теории упругих волн. Екатеринбург: УГГУ, 2006. 102 с.

Череменский Г. А. Прикладная геотермия. Л.: Недра, 1977. 224 с.

Череменский Г. А. Геотермия. Л.: Недра, 1972. 272 с.

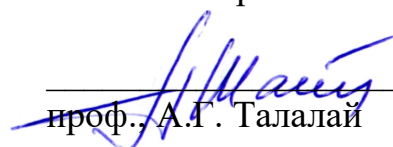
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ:

Заведующий кафедрой
геофизики

«01» сентября 2022 г.


проф. А.Г. Талалай

Редозубов А.А.,

Петряев В.Е.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО
КУРСОВОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ
ПО ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКЕ**

**для студентов специальности
21.05.03 Технология геологической разведки»,
специализации №1 «Геофизические
методы поисков и разведки месторождений
полезных ископаемых»**

СОДЕРЖАНИЕ

1. Общие положения	4
2. Структура и содержание курсового проекта	5
2.1. Общая структура курсового проекта.....	5
2.2. Содержание курсового проекта	6
2.2.1. Введение	6
2.2.2. Геологическое строение района работ	7
2.2.3. Физические и геологические предпосылки для постановки электроразведки	9
2.2.4. Методика и техника проектируемых работ.....	13
2.2.5. Заключение.....	16
3. Основные требования к оформлению курсового проекта	16
Список литературы.....	19
Приложение 1. Образец оформления титульного листа	21
Приложение 2. Темы курсового проекта.....	22

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В подготовке специалистов-геофизиков, способных успешно решать задачи, возникающие в процессе производственной деятельности, важную роль играет курсовое проектирование по дисциплинам специальности, которое позволяет максимально приблизить студента к составлению документации, требуемой на стадии проектирования геофизических работ. При курсовом проектировании по электроразведке студенты систематизируют и углубляют свои знания по дисциплине и получают навыки их применения для решения конкретных задач. Работая над курсовым проектом, студенты также совершенствуют навыки работы со специальной литературой, поиска необходимых библиографических источников, навыки работы с вычислительной техникой и т. д.

Типовым заданием для курсового проекта является составление геолого-методической части проекта электроразведочных работ для решения конкретной геологической задачи в конкретной геологической обстановке. Такой задачей могут быть поиски или разведка месторождений полезных ископаемых, геологическое картирование, инженерно-геологические изыскания и т. п. В задании студенту указывается район и ставится геологическая задача, для решения которой необходимо разработать проект электроразведочных работ заданным методом или выбрать модификацию заданного метода. В задании также указываются один-два литературных источника, в которых можно найти первоначальные сведения о геологическом строении района работ и электрических свойствах слагающих его горных пород. Другие необходимые сведения и содержащие их литературные источники студенту предлагается разыскать самостоятельно, используя справочные библиографические материалы или интернет-ресурсы.

Вместо типового курсового проекта отдельным, как правило, хорошо успевающим, студентам может быть выдано задание на выполнение курсовой работы исследовательского характера. Впоследствии такая курсовая работа при

последующем ее развитии может послужить основой выпускной квалификационной работы. Структура курсовой работы исследовательского характера определяется руководителем.

2. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

2.1. Общая структура курсового проекта

В курсовом проекте должно быть сформулировано геологическое задание, дана краткая географическая характеристика района работ, описано его геологическое строение и проанализированы физико-геологические предпосылки для постановки электроразведки. На основании этих материалов обосновывается целесообразность применения выбранного метода электроразведки для решения поставленной задачи, выбирается и обосновывается методика работ.

Пояснительная записка (текстовая часть проекта) по объему не должна превышать 25-30 страниц рукописного или 20-25 страниц машинописного текста. Пояснительная записка иллюстрируется рисунками в тексте, таблицами, расчетами и т. п. Текст курсового проекта делится на разделы (главы), которые при необходимости подразделяются на подразделы (параграфы). Разбивка на подразделы производится студентом по своему усмотрению. Все разделы курсового проекта должны быть органически связаны между собой. Изложение материала должно быть четким, ясным и по возможности кратким. Выдвигаемые положения и выводы должны подтверждаться расчетами, таблицами, графиками, ссылками на литературу. Структура курсового проекта приведена ниже. По согласованию с руководителем в эту структуру могут быть внесены изменения. Если вместо типового курсового проекта выполняется курсовая работа исследовательского характера, ее структура зависит от темы и разрабатывается совместно студентом и руководителем.

Типовой курсовой проект состоит из следующих разделов (глав):

ВВЕДЕНИЕ

1. Геологическое строение района работ
2. Физические и геологические предпосылки для постановки электроразведки
3. Методика и техника проектируемых работ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

2.2. Содержание курсового проекта

2.2.1 ВВЕДЕНИЕ

Во введении должна быть четко сформулирована геологическая задача, для решения которой проектируются электроразведочные работы. Указывается стадия геологоразведочных работ, к которой эти работы следует отнести.

Приводятся сведения о районе, характеризующие условия проведения электроразведочных работ. Указывается географическое положение и административная принадлежность района, характеризуется рельеф, климат, растительность. Приводятся сведения о населении и его занятиях, основных населенных пунктах, промышленности и путях сообщения. Приведенные сведения должны давать представление о продолжительности полевого периода, возможности найма рабочей силы на месте проведения работ, условиях базирования и снабжения партии, возможности применения транспортных средств, степени промышленного развития района (необходимого для определения уровня помех в главе «Методика и техника проектируемых работ»). Соответствующими выводами необходимо завершить данный раздел.

Текст следует иллюстрировать обзорной картой с указанием на ней участка проектируемых работ. Обзорную карту можно сделать в виде

выкопировки из географической карты достаточно крупного масштаба, например, карты соответствующей области.

Для составления общей характеристики района следует воспользоваться литературными источниками – энциклопедией, учебником географии, географическим атласом, а также интернет-ресурсами.

2.2.2. Геологическое строение района работ

Описание геологического строения следует начинать с определения положения района работ по отношению к региональным геологическим структурам и очень краткой общей геологической характеристики, которая детализируется в последующих частях раздела.

Стратиграфическая колонка в рудном районе описывается кратко: приводится литологический состав стратиграфических горизонтов, их мощности и распространение. Отмечаются несогласия в залегании стратиграфических комплексов, фациальные изменения и т.п. Следует обратить внимание на стратиграфическую приуроченность полезных ископаемых. Если есть возможность, надо привести обобщенные сведения об электрических свойствах горных пород, слагающих стратиграфические горизонты. Если же полезное ископаемое приурочено к осадочным горным породам, стратиграфии следует уделить большее внимание.

При характеристике магматизма указываются его фазы и характерные для них комплексы пород. Приводятся сведения о форме, размерах и элементах залегания магматических тел. Важным моментом является связь полезных ископаемых с магматическими комплексами, если таковая имеется.

При описании тектоники необходимо привести общую тектоническую схему района и охарактеризовать наиболее крупные структурные элементы. Затем следует перейти к описанию других пикативных структур и дизъюнктивных нарушений, рассмотреть их размеры, элементы залегания и возрастные

взаимоотношения. Если установлен тектонический контроль месторождений полезных ископаемых, следует привести соответствующие сведения.

Серьезное внимание следует уделить вопросу метаморфизма, т. к. на электрические свойства горных пород большое влияние оказывает характер и степень метаморфических изменений. Необходимо рассмотреть пространственное распространение измененных пород, связь метаморфизма с магматической и тектонической деятельностью. Следует обратить внимание на связь с метаморфизмом полезных ископаемых.

Важнейшей частью геологического очерка является характеристика месторождений полезных ископаемых, для поисков которых проектируются электроразведочные работы. Необходимо привести сведения об известных месторождениях и рудопрооявлениях, указать их пространственное расположение, стратиграфический, литологический и структурный контроль, связь с метаморфизмом, генетический тип. При этом подробно рассматриваются рудоконтролирующие структуры, состав и степень метаморфизма вмещающих пород, наличие и характер околорудных изменений, форма, размеры, глубина и элементы залегания, вещественный состав залежей полезных ископаемых. Приводятся сведения о слое рыхлых отложений и коре выветривания, о гипергенных изменениях.

Если на территории района нет известных месторождений, а имеются лишь геологические предпосылки для их обнаружения, следует воспользоваться методом аналогий и рассмотреть какое-либо месторождение соответствующего генетического типа из другого района, имеющее сходное геологическое строение.

Текст геологического очерка иллюстрируется геологическими картами и разрезами района и месторождения.

Геологическое описание района проектируемых работ составляется по литературным источникам. В некоторых случаях дополнительные материалы могут быть предоставлены руководителем.

2.2.3. Физические и геологические предпосылки для постановки электроразведки

Целью этой главы является анализ физико-геологических условий для постановки проектируемых работ при решении поставленных геологических задач, для чего необходимо проанализировать электрические свойства горных пород и полезных ископаемых. Наиболее важными из них являются удельное электрическое сопротивление и поляризуемость, а также способность геологических объектов создавать естественные электрические поля. В высокочастотных методах на распределение изучаемого поля может оказывать заметное влияние диэлектрическая проницаемость среды. Для индуктивных методов имеет значение магнитная проницаемость, если она достаточно велика (магнитная восприимчивость достигает десятых долей единицы СИ и более). Рассматривая электрические свойства горных пород, надо обращать внимание на их изменение в зонах тектонических нарушений, под воздействием различных процессов метаморфизма, гипергенных факторов и т. д. Эти изменения нередко оказываются даже более существенными, чем дифференциация различных типов пород и могут иметь определяющее значение для применения электроразведки. Описание электрических свойств горных пород следует сопровождать фактическим материалом в виде таблиц, гистограмм или вариационных кривых.

Наряду с информацией об электрических свойствах горных пород для применения электроразведки важно учитывать форму, размеры и условия залегания геологических объектов. Рассматривая эти вопросы, следует обратить внимание на связь объектов изучения со структурными элементами, типами горных пород, отличающимися по физическим свойствам (тектонические зоны, области проявления метаморфизма и т. д.), на изменение электрических свойств в околорудном ореоле, особенно в надрудной зоне. Может оказаться, что при применении электроразведки целесообразнее ориентироваться не на непосредственное выявление залежи полезного

ископаемого, а на обнаружение и оконтуривание рудоконтролирующих элементов или геоэлектрических ореолов.

При анализе физико-геологических предпосылок необходимо рассмотреть возможные искажения изучаемых электромагнитных полей различными геоэлектрическими помехами. К ним относится неравномерная мощность и изменчивое удельное сопротивление рыхлых отложений, неоднородность вмещающих пород по сопротивлению и поляризуемости и т. д. Электропроводный слой рыхлых отложений, даже если его параметры выдержаны, оказывает экранирующее влияние на электрическое поле, приводящее к уменьшению интенсивности аномалий от объектов исследования. Этому вопросу следует уделить самое серьезное внимание и ввести соответствующие поправки в расчеты.

На основе анализа геологического строения объекта и его физических свойств формируется физико-геологическая модель (ФГМ). При ее построении форма геологических тел, отличающихся по электрическим свойствам, должна быть как можно более простой, допускающей решение прямой задачи имеющимися средствами, и в то же время возможно лучше отражающей реальную обстановку.

Рассмотрим построение физико-геологической модели на примере колчеданного месторождения. Участок работ сложен породами эффузивного комплекса, имеющими удельное электрическое сопротивление порядка 2000 Ом·м и поляризуемость около 2 %. Оруденение приурочено к мощным, до 300 м и более крутопадающим зонам гидротермально измененных пород хлорит-серицит-кварцевого состава. Метасоматиты имеют несколько пониженное по сравнению с эффузивами удельное электрическое сопротивление (500-1000 Ом·м), поляризуемость же их повышена за счет рассеянной вкрапленности рудных минералов. Вблизи оруденения содержание рудных вкрапленников достигает 7-8 %, что приводит к повышению поляризуемости рудовмещающих метасоматитов до 15-20 %. Рудные залежи, сложенные массивным колчеданом, имеют грубо изометричную форму с

поперечником 100-200 м. Глубина до верхней кромки залежей составляет обычно 100-200 м, но может колебаться в зависимости от уровня эрозионного среза. Удельное сопротивление массивных руд 0,05-0,5 Ом·м, коэффициент поверхностной вызванной поляризации $\lambda=0,6$ м. Коренные породы перекрыты слоем рыхлых отложений мощностью 30-50 м с удельным электрическим сопротивлением в среднем 50 Ом·м. Схематический геологический разрез описанного объекта приведен на рис. 1, а.

Если поставлена геологическая задача непосредственного выявления рудной залежи, в данных условиях можно применить метод переходных процессов, которым такое тело может быть выявлено при глубине до его центра до 400 м. Так как форма залежи в первом приближении изометрична, ее можно аппроксимировать шаром, а в качестве физико-геологической модели принять шар в однородном полупространстве, перекрытом слоем рыхлых отложений.

При решении задачи выявления и оконтуривания минерализованных метасоматитов, вмещающих залежи массивных руд, можно применить метод вызванной поляризации, т. к. метасоматиты обладают повышенной поляризуемостью по сравнению с вмещающими эффузивами из-за рассеянной вкрапленности рудных минералов. Физико-геологическая модель будет представлять собой наклонный пласт, перекрытый горизонтальным слоем рыхлых отложений низкого сопротивления (рис. 1, б).

Чтобы оценить вид и интенсивность аномалий, которые могут быть получены над объектом поисков, выполняется решение прямой задачи для построенной физико-геологической модели. Расчеты показывают, что над пластом рудовмещающих хлорит-серицит-кварцевых пород интенсивность аномалии η_k достигает 3 % (см. рис. 1, б). Таким образом, поставленная задача выявления потенциально рудоносных зон метасоматитов может быть успешно решена методом вызванной поляризации. При решении прямой задачи полезно рассчитать и сравнить аномалии при изменении параметров модели в возможных для данных геологических условий пределах.

Если в районе проектируемых работ развиты геологические образования, которые не представляют интереса, но могут создавать аномалии, подобные аномалиям от объектов поисков, нужно для них также построить физико-геологическую модель и, решив для этой модели прямую задачу, следует сопоставить аномалии от геоэлектрических помех с аномалией от объекта поисков.

Следует оценить степень влияния геоэлектрических помех и возможность разделения аномалий, вызванных геоэлектрическими помехами и объектами поисков. При анализе возможности применения электроразведки для решения поставленных задач следует также использовать сведения о результатах ранее проведенных работ, если таковые имеются.

В конце главы надо сделать выводы о том, насколько эффективен проектируемый метод для решения поставленных геологических задач и каков будет характер аномалий.

При составлении главы следует пользоваться литературными источниками или другими материалами, доступными автору. Если необходимые сведения о районе проектируемых работ отсутствуют, можно воспользоваться материалами по другому району с аналогичным геологическим строением и геоэлектрической обстановкой. В крайнем случае, для характеристики электрических свойств пород можно воспользоваться обобщенными данными из справочника геофизика [11].

2.2.4. Методика и техника проектируемых работ

В данной главе на основе данных о геологической обстановке и физико-геологических условиях применения электроразведки, рассмотренных в предыдущих разделах, обосновывается выбор проектируемого метода электроразведки. Для этого нужно использовать результаты решения прямой задачи, а также имеющиеся данные о ранее проведенных в районе геофизических исследованиях. При этом следует дать оценку предельной

глубины, на которой может быть обнаружен выбранным методом объект поисков. Такая оценка может быть сделана путем решения прямой задачи для объектов, залегающих на различной глубине или по имеющимся в литературе формулам.

Необходимо обосновать сеть наблюдений и определить соответствующий ему масштаб съемки. Если масштаб съемки задан, сеть наблюдений выбирается соответствующей этому масштабу. Связь между масштабом съемки и сетью наблюдений определяется инструкцией по электроразведке [2]. При выборе сети руководствуются обычными требованиями, чтобы аномалия выделялась не менее, чем на двух профилях, а на профиле в пределах аномалии располагалось не менее двух-трех точек. Для определения шага наблюдений по профилю следует воспользоваться результирующим графиком изучаемого параметра, полученным в результате решения прямой задачи, в который были внесены все поправки: за угол наклона пласта и за экранирующее влияние проводящего слоя рыхлых отложений. Затем оценивается пороговое значение аномалии, т. е. минимальная интенсивность аномалии, при которой она может быть уверенно выделена, и определяется ширина аномалии на этом уровне. В качестве порогового уровня обычно принимается удвоенное фоновое значение. Расстояние между профилями можно определить, исходя из ожидаемой длины объекта по простиранию (длина аномалии обычно несколько больше длины объекта). Определяя сеть наблюдений, исходя из размеров объекта, необходимо соблюдать соответствие расстояния между профилями и шага наблюдений одному из общепринятых масштабов. Для этого в случае необходимости найденное расстояние между профилями или между точками на профиле изменяется в меньшую сторону.

Размер установки (разнос питающих электродов, размер петли) выбирается таким, чтобы аномалия от объекта поисков имела максимально возможную интенсивность, но в то же время он не должен быть непомерно большим, чтобы не осложнять проведение полевых работ. При зондировании максимальный разнос электродов AB берется таким, чтобы в нижней своей

части кривая выходила на значение удельного сопротивления опорного горизонта. Разнос приемных электродов согласовывается с разносом питающих электродов и шагом наблюдений. При электропрофилировании разнос между приемными электродами обычно соответствует шагу наблюдений. В индуктивных методах размер установки выбирается таким, чтобы он обеспечивал обнаружение объекта на максимально возможной глубине. Из этих же соображений выбирается рабочая частота. При частотных зондированиях диапазон частот должен обеспечивать изучение разреза в нужном интервале глубин, а размер установки выбирается в зависимости от глубины до опорного горизонта.

Если проектируется кондуктивный метод, то при расчете методики работ следует воспользоваться задачей «Выбор генераторной установки» [7]. Для выбора источника тока необходимо рассчитать силу тока в питающей линии, обеспечивающую уверенные измерения при ожидаемом уровне помех. Исходя из полученных результатов, принимают решение о наиболее целесообразном типе источника тока. Выбирается измерительная аппаратура, обеспечивающая надежные измерения в условиях участка проектируемых работ. При выборе аппаратуры, как правило, следует ориентироваться на ее серийные типы. Необходимо учитывать вес и габариты аппаратуры, способ ее транспортировки, соотнося их с условиями района работ. Обосновывается выбор типов проводов для питающих и приемных линий, конструкция токовых и приемных заземлений, генераторных и измерительных контуров. Указывается методика контроля качества работ и проектная точность измерений, а также порядок камеральной обработки измерений, методика интерпретации и форма представления результатов работ. Описывается и изображается графически схема отработки площади. При этом следует рассчитать рабочий участок питающей линии и, например, если проектируется метод вызванной поляризации в модификации срединного градиента (ВП-СГ), определить максимально допустимое расстояние от питающей линии до боковых профилей.

При составлении этой главы следует пользоваться инструкцией по электроразведке [2], справочником геофизика [12], а также монографиями и статьями, посвященными проектируемыми методами.

2.2.5. Заключение

В заключении отмечается, что удалось сделать при выполнении курсового проекта, какие знания применил студент и какие навыки развил при решении конкретных геологических задач методами электроразведки.

3. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Текст пояснительной записки к курсовому проекту должен быть написан или напечатан на компьютере на листах стандартного (А4) формата. Разделы (главы) нумеруются арабскими цифрами с точкой. Название раздела пишется прописными буквами и располагается на листе симметрично по центру страницы. Переносы слов в заголовках разделов не допускаются. Подразделы (параграфы) должны иметь порядковую нумерацию в пределах каждого раздела. Номер подраздела состоит из номера раздела и номера подраздела, разделенных точкой. Заголовок подраздела пишется строчными буквами за исключением первой прописной. Он начинается с абзаца, а если занимает несколько строк, то вторая и последующая строки начинаются, как обычные строки текста. От текста заголовки подразделов отделяются интервалами.

Текст должен быть написан на одной стороне листа разборчивым почерком. Высота строчных букв должна быть не менее 2,5 мм. Расстояние между основаниями строк 6-8 мм. Для машинописного текста должен использоваться текстовый редактор Microsoft Word, шрифт Times New Roman, кегль 14,

междустрочный интервал полуторный. На листе оставляют поля: слева 25 мм, справа 10 мм, сверху и снизу по 15 мм.

Номер страницы ставится снизу или сверху листа в середине строки. Нумерация начинается с титульного листа (номер на титульном листе не ставится), листы с рисунками, таблицами и т.д. включаются в общую нумерацию.

Начинается пояснительная записка титульным листом, который оформляется на обложке курсового проекта. Образец оформления титульного листа приведен в приложении. После титульного листа на отдельном листе помещается содержание и дальше следует текст. Слово «Содержание» пишется прописными буквами в середине строки. В содержание включаются разделы, подразделы, список литературы, текстовые и графические приложения с указанием страниц.

Формулы пишутся в отдельных строках. Для набора математических формул в машинописном варианте рекомендуется использовать Microsoft Equation. Справа в той же строке в круглых скобках указывается номер формулы. Нумерация формул может быть сквозной или по разделам. В последнем случае номер должен состоять из двух чисел, разделенных точкой – номера раздела и порядкового номера формулы в этом разделе. В следующей строке после слова «где» дается пояснение входящих в формулу символов (столбцом по одному символу в строке). Ссылки на формулы делаются в тексте в круглых скобках (указывается номер формулы).

Рисунки, включенные в пояснительную записку, должны выполняться на отдельных листах тушью или с помощью программных компьютерных средств. Номер рисунка и название рисунка располагается под ним. Под рисунком помещаются также условные обозначения. Нумерация рисунков аналогична нумерации формул. Располагают рисунок на следующем листе после первого упоминания о нем. При ссылке на рисунок его номер указывается в круглых скобках. При повторных ссылках на рисунок перед номером ставится сокращенное слово «смотри», например, (см. рис. 3).

Таблицы должны состоять из вертикальных граф и горизонтальных строк. Диагональное деление головки таблицы не допускается. Заголовки граф указываются в единственном числе и начинаются с прописных букв. Подзаголовки, если они составляют одно предложение с заголовком, начинаются со строчных букв. Если подзаголовки имеют самостоятельное значение, они начинаются с прописных букв. Над таблицей помещается ее название, которое пишется строчными буквами, за исключением первой прописной, и располагается в строке симметрично. Над заголовком справа пишется слово «Таблица» и указывается ее номер. Нумерация таблиц производится так же, как рисунков. Ссылки на таблицы в тексте помещаются в круглых скобках, при этом слово «таблица» пишется без сокращения.

В конце пояснительной записки помещается список литературы, использованной при составлении курсового проекта. Заголовок его пишется прописными буквами и располагается в строке симметрично. В качестве примеров могут служить описания литературных источников, приведенных в списке литературы к учебному пособию.

Ссылка на соответствующий источник делается путем указания его порядкового номера в списке, помещенного в квадратные скобки, например, [2]. В списке литературы источники могут располагаться либо в алфавитном порядке, либо в порядке их упоминания в тексте.

Если в пояснительной записке имеются приложения, каждое из них начинается с нового листа. В правом верхнем углу первого листа пишется прописными буквами слово «ПРИЛОЖЕНИЕ» и указывается его номер арабскими цифрами (знак «№» не ставится). Ссылки на приложения даются в тексте в круглых скобках, например, (приложение 1). Помещаются приложения после списка литературы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобровников Л. З., Орлов Л. И., Попов В. А. Полевая электроразведочная аппаратура: Справочник. – М.: Недра, 1986. – 223 с.
2. Инструкция по электроразведке. – Л.: Недра, 1984. – 352 с.
3. Матвеев Б. К. Электроразведка: Учеб. Для вузов. 2-е изд., перераб и доп. – М.: Недра, 1990. – 368 с.
4. Редозубов А. А. Электроразведка. Часть 1. Электроразведка постоянным током. Поляризационные методы электроразведки: Учебн. пособие. 2-е изд., стереотипное. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2007. – 328 с.
5. Редозубов А. А. Электроразведка. Часть 2. Электроразведка переменным током: Учебн. пособие. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2008. – 188 с.
6. Редозубов А. А. Методические указания по курсовому проектированию по электроразведке для студентов специальности 25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых». – Свердловск, 1991.
7. Редозубов А. А. Часть 2 Решение прямых задач электроразведки постоянным током. – Свердловск, 1991.
8. Серков В. А. Автоматизированная система моделирования электроразведки постоянным током: Методическое руководство для студентов 25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых». – Свердловск: Изд-во Свердл. горн. ин-та, 1991. – 22 с.
9. Сысков С. С., Петряев В. Е., Шумаков М. С., Косарева Г. А. Интерпретация результатов метода вызванной поляризации: Учебное пособие к практическим занятиям по дисциплине «Электроразведка» для студентов профилизации «Геофизические методы поисков и разведки МПИ (РФ) направления 553200 – «Геология и разведка полезных ископаемых». – Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 1996. – 36 с.
10. Сысков С. С., Петряев В. Е., Еловикова Н. Н. Решение прямой и обратной задачи для наклонного поляризующегося пласта: Учебное пособие к курсовому проектированию по дисциплине «Электроразведка» для студентов

профилизации «Геофизические методы поисков и разведки МПИ (РФ) направления 553200 – «Геология и разведка полезных ископаемых». – Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 1999. – 25 с.

11. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (Петрофизика): Справочник геофизика/ Под ред. Б. Б. Дортман. – М.: Недра, 1984. – 455 с.

12. Электроразведка: Справочник геофизика. В двух книгах/Под ред. В. К. Хмелевского и В. М. Бондаренко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1989. – 438 и 378 с.

13. Якубовский Ю. В., Ренард И. В. Электроразведка: Учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1991. – 359 с.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»
Факультет геологии и геофизики
КАФЕДРА ГЕОФИЗИКИ

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

по дисциплине Электроразведка на тему:

Руководитель _____ доцент Петряев В.Е.
(должность, ФИО)

Выполнил студент _____
(группа, ФИО)

Екатеринбург- 2022 г.

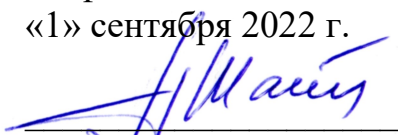
Темы курсовых проектов по дисциплине «Электроразведка»

№№ п/п	Тема работы	Литературные источники для выполнения работы
1.	Геолого-методическая часть проекта работ методом вызванной поляризации с целью поисков медноколчеданного оруденения в районе Султановского месторождения (Челябинская область).	1. Столпнер М. Н. К методике поисков медноколчеданных месторождений в Зауралье // Геофизические методы при крупномасштабном прогнозировании сульфидных месторождений. Л.: Недра, 1970. 169 с. (с. 24-30). 2. Н.А. Сивов. Султановское колчеданное месторождение на Среднем Урале. В кн. Материалы по геологии и полезным ископаемым Урала. Вып.7. Свердловск, 1958. С. 160 -171.
2.	Геолого-методическая часть проекта работ методом вызванной поляризации с целью поисков колчеданного оруденения в районе Озерного месторождения (Южный Урал)	1. Шаповалов О. М. Применение метода вызванной поляризации на поисковом участке в Челябинской области // Применение метода вызванной поляризации при поисках рудных месторождений. М.: Недра, 1964. 146 с. (с. 26-42). 2. Медноколчеданные месторождения Урала: Геологическое строение / В. А. Прокин, Ф. П. Буслаев, М. И. Исмагилов и др. Свердловск: УрО АН СССР, 1988. 241 с. (с. 58-64).
3.	Геолого-методическая часть проекта работ методом вызванной поляризации с целью поисков медистых песчаников на северном фланге месторождения Джартас-Пектас (Джезказганское рудное поле)	Журбицкий В. И., Котляров А. М., Маричев К. И. Месторождения медистых песчаников в Джезказганском районе // Геофизические поиски рудных месторождений / Под ред. В. А. Кличникова. Алма-Ата: Изд. КазВИРГ, 1970. 810 с. (с. 415-430).
4.	Геолого-методическая часть проекта работ методом вызванной поляризации с целью поисков полиметаллических месторождений в районе Карболихинского рудного поля на Рудном Алтае	Белаш В. А., Панасевич А. М. Применение метода вызванной поляризации на Рудном Алтае // Применение метода вызванной поляризации при поисках рудных месторождений. М.: Недра, 1964. 146 с. (с. 59-65).
5.	Геолого-методическая часть проекта работ методом вызванной поляризации с целью поисков полиметаллического оруденения в Центральном Каратау	Канев А. Т., Матвеев В. С., Шилов Л. И. и др. Свинцово-месторождения Каратау // Геофизические поиски рудных месторождений. М.: Недра, 1970. 810 с. (с. 430-440).
6.	Геолого-методическая часть проекта работ методом вызванной поляризации с целью детальных поисков колчеданного оруденения на Аралчинской площади (Мугоджары)	Бачин А. П. и др. Медноколчеданные месторождения в Мугоджарах // Геофизические поиски рудных месторождений / Под ред. В. А. Кличникова. Алма-Ата: Изд. КазВИРГ, 1970. 810 с. (с. 415-430)
7.	Геолого-методическая часть проекта работ методом вызванной поляризации с целью поисков медно-порфировых месторождений в Алмалыкском районе (Узбекистан)	1. Геофизические поиски рудных месторождений / Под ред. В. А. Кличникова. Алма-Ата: Изд. КазВИРГ, 1970. 810 с. (с. 406-415). 2. Геофизические методы при крупномасштабном прогнозировании сульфидных месторождений. М.: Недра, 1970. С. 76-83.
8.	Геолого-методическая часть проекта работ методом вызванной поляризации с целью поисков колчеданного оруденения в районе Юбилейного месторождения (Башкирия)	Медноколчеданные месторождения Урала: Геологическое строение / В. А. Прокин, Ф. П. Буслаев, М. И. Исмагилов и др. Свердловск: УрО АН СССР, 1988. 241 с. (с. 85-94).

9.	Геолого-методическая часть проекта работ методом переходных процессов с целью поисков колчеданного оруденения в районе Гайского месторождения (Южный Урал)	1. Медноколчеданные месторождения Урала: Геологическое строение/ Прокин В. А., Буслаев Ф. П., Исмагилов М. И. и др. Свердловск: УрО АН СССР, 1988. С. 120-131. 2. Медноколчеданные месторождения Урала: Геологические условия размещения / Прокин В. А., Нечеухин В. М., Сопко П. Ф. и др. Свердловск: УрО АН СССР, 1985. С. 163-167.
10.	Геолого-методическая часть проекта работ методом переходных процессов с целью поисков медноколчеданного оруденения на Шемурской площади (Северный Урал)	Прокин В. А., Буслаев Ф. П., Исмагилов М. И. и др. Медноколчеданные месторождения Урала: Геологическое строение. – Свердловск: УрО АН СССР, 1988. С. 64-73.
11.	Геолого-методическая часть проекта работ методом переходных процессов с целью поисков медноколчеданного оруденения в районе Султановского месторождения (Челябинская область)	1. Столпнер М. Н. К методике поисков медноколчеданных месторождений в Зауралье / Геофизические методы при крупномасштабном прогнозировании сульфидных месторождений. – Л.: Недра, 1970. С. 24-30. 2. Н. А. Сивов. Султановское колчеданное месторождение на Среднем Урале. В кн. Материалы по геологии и полезным ископаемым Урала. Вып. 7. Свердловск, 1958. С. 160 -171.
12.	Геолого-методическая часть проекта работ методом переходных процессов с целью поисков колчеданного оруденения в районе Джусинского месторождения (Южный Урал)	1. Прокин В. А., Буслаев Ф. П., Исмагилов М. И. и др. Медноколчеданные месторождения Урала: Геологическое строение. – Свердловск: УрО АН СССР, 1988. С. 207-214. 2. Якубовский Ю. В. Индуктивные методы электроразведки. Госгеолтехиздат. - М., 1963. С. 175 – 179.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»



УТВЕРЖДАЮ:
Заведующий кафедрой
геофизики
«1» сентября 2022 г.

проф. А.Г. Талалай

Редозубов А.А.,

Петряев В.Е.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ ПО ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКЕ

**для студентов специальности
21.05.03 Технология геологической разведки,
специализации №1 «Геофизические
методы поисков и разведки месторождений
полезных ископаемых»**

Екатеринбург, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

1. Общие положения	2
2. Постановка задачи.....	2
3.Порядок выполнения контрольной работы.....	6
4. Требования к оформлению.....	7
5. Список литературы.....	7
5. Приложение 1. Варианты индивидуальных заданий	8
6.Приложение 2. Титульный лист.....	9

1. Общие положения

Работа представляет собой самостоятельное расчетно-графическое задание, целью которого является изучение нормального электрического поля одного и двух точечных источников тока. Эти поля широко используются в электроразведке. Знание их необходимо при анализе результатов измерений потенциала или градиента потенциала и при выделении аномалий. Кроме того, вызываемые различными объектами аномалии часто можно представить, как комбинацию полей точечных источников, и на основе знания поля точечного источника можно без сложных расчетов получить представление об этих аномалиях.

При выполнении работы расчет графиков потенциала и напряженности поля предлагается выполнить для одного источника, а поле двух источников получить графическим способом с использованием теоремы суперпозиции. При расчете поля одного источника лучше пользоваться средствами Excel. Расчет и построение графиков для двух источников следует выполнить средствами Excel, чтобы освоить применение теоремы суперпозиции. При этом сохраняются все промежуточные построения. Средствами пакета Paint показать положение и знак источников тока. Расчеты сопроводить табличным материалом.

2. Постановка задачи

В однородном изотропном полупространстве с удельным сопротивлением ρ на глубине H расположен точечный источник A , с которого стекает

ток силой I . Начало координат располагается в точке A , оси X и Y ориентированы горизонтально, ось Z - вертикально вверх. Профиль располагается на поверхности земли и ориентирован параллельно оси X . Точка M , в которой определяется поле, перемещается по профилю в интервале $X_{нач} < X < X_{кон}$. Пример, поясняющий задание к контрольной работе приведен на Рис. 1.

**К расчету поля
точечного источника тока**

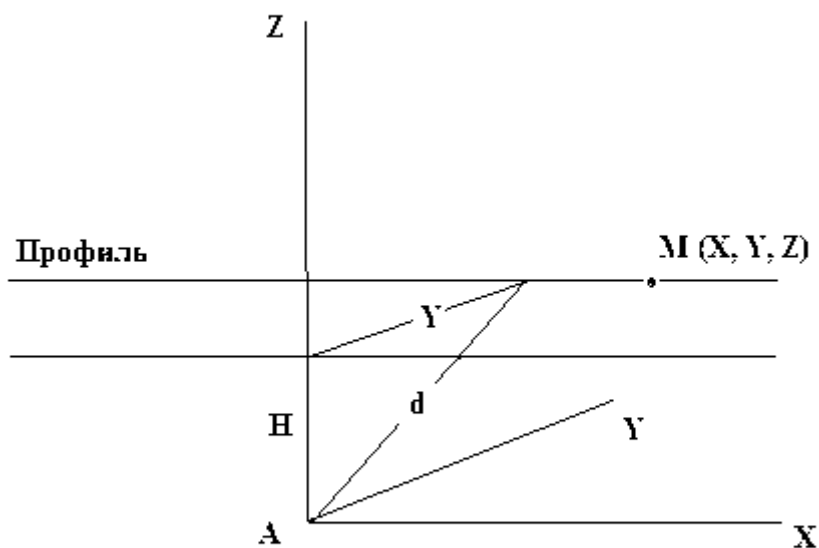


Рис. 1

Электрическое поле в точке M определяется уравнениями:

$$U = \rho I / (2\pi\sqrt{x^2 + y^2 + H^2}) \quad (1)$$

$$E_x = \rho I x / (2\pi(\sqrt{x^2 + y^2 + H^2})^3) \quad (2)$$

$$E_y = \rho I y / (2\pi(\sqrt{x^2 + y^2 + H^2})^3) \quad (3)$$

В приведенных формулах U – потенциал, E_x и E_y – компоненты напряженности поля по осям x и y соответственно.

Анализируя эти формулы нетрудно убедиться, что потенциал и составляющая поля E_y имеют экстремумы при $X_{extr} = 0$, а составляющая E_x при $X_{extr} = \sqrt{y^2 + H^2}$.

Результаты расчета поля точечного источника следует оформить в виде таблицы, пример которой приведен ниже.

Таблица 1

Результаты расчета поля точечного источникаУсловия расчета: $I =$; $\rho =$; $H =$; $y_1 =$; $y_2 =$.

x	y ₁			y ₂		
	U	E _x	E _y	U	E _x	E _y

Начальное и конечное значение x выбирают таким образом, чтобы длина половины профиля была не меньше удвоенного указанного в задании значения L (расстояния между источниками тока при расчете поля 2-х источников). Например: расстояние между источниками тока 1500 м. Значит длина профиля должна составлять не менее 6000 м. Такая длина профиля будет необходима при построении поля 2-х источников тока. Шаг выбирают таким, чтобы получить достаточную детальность графиков и в то же время не загромождать график.

Необходимо рассчитать координату экстремума аналитически, а затем подставив ее значение в формулу найти значение поля в этой точке. На графиках указать положение и знак источников тока, положение координаты X_{extr} и значение поля в этой точке.

Для нахождения поля двух источников следует применить теорему суперпозиции и воспользоваться результатами расчета поля одного источника. Если поле создается источниками А и В, то в любой точке выполняются уравнения:

$$U^{AB} = U^A + U^B \quad (4)$$

$$\vec{E}^{AB} = \vec{E}^A + \vec{E}^B \quad (5)$$

Векторное уравнение (5) переходит в обыкновенное, если вместо полной напряженности поля взять ее любую пространственную компоненту:

$$E_s^{AB} = E_s^A + E_s^B \quad (6)$$

Зная поле одного источника можно найти поле двух источников путем аналитического расчета или графически. Образец построения графика

напряженности поля двух точечных источников разного знака графическим способом приведен на рис 2.

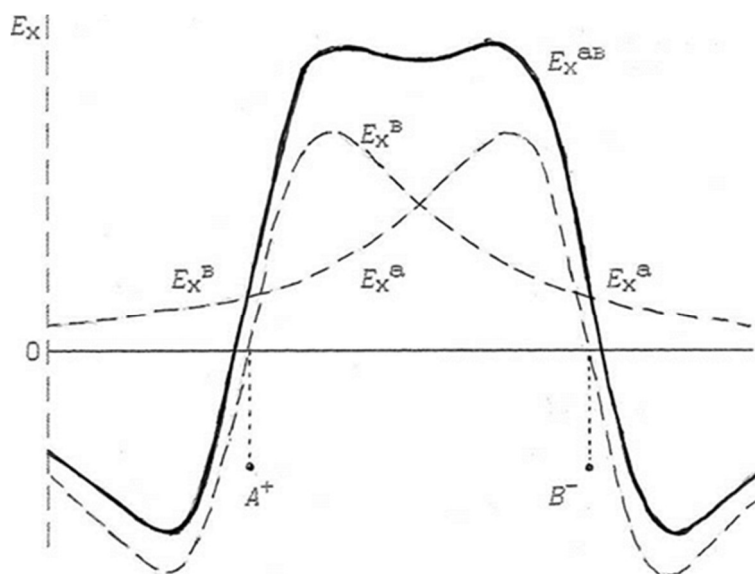


Рис. 2

В приведенном примере источники тока имеют разные знаки. Поэтому поле источника В имеет знак, противоположный по отношению к полю источника А при одинаковой форме и амплитуде графиков. Если источник В имеет ту же полярность, что и источник А, графики для обоих источников совершенно одинаковы, но смещены один относительно другого на расстояние $L = AB$.

Совершенно аналогично строятся графики потенциала для поля двух точечных источников одинакового или разного знака.

В качестве исходных данных студенту выдаются следующие характеристики - удельное электрическое сопротивление среды, глубина погружения источника тока А, расстояние между источниками одинакового или разного знака, характеристики удаления профиля от проекции источников по оси Y (Y_1 и Y_2). Все исходные данные заданы в системе СИ (Приложение 1).

3. Порядок выполнения контрольной работы

При выполнении контрольного задания студенту необходимо выполнить следующее.

1. Выполнить расчет поля точечного источника (U , E_x и E_y) при заданных значениях ρ , I , H по двум профилям, ориентированным параллельно оси X при заданных значениях Y . Результаты расчета представить в виде таблицы (значения U и E должны быть выражены в милливольтх).

2. Построить графики U , E_x и E_y по обоим профилям. Для каждого профиля все графики должны быть построены относительно общей оси расстояний X .

3. Пользуясь теоремой суперпозиции, построить графическим способом по обоим профилям графики U и E_x для поля двух точечных источников разного и одинакового знака при заданном расстоянии L между источниками. Мощности обоих источников принять одинаковыми.

4. Составить объяснительную записку, в которой описать порядок выполнения расчетов и построения графиков для одного и двух источников тока и дать подробный анализ полученных результатов. При анализе результатов надо описать форму всех графиков, указать положение экстремумов, точек перехода через нуль и других характерных особенностей.

4. Требования к оформлению контрольной работы

Текст должен быть написан на листах стандартного формата А4, шрифт Times New Roman, кегль 14. Графические материалы выполнены средствами Excel и доведены с помощью графического редактора Paint. Рисунки и таблицы должны быть аккуратно оформлены (в качестве образца можно использовать рисунки и таблицу, имеющиеся в задании). Текст, таблицы и графические материалы должны иметь титульный лист (см. Приложение 2).

5. Список литературы

1. Редозубов А. А. Электроразведка. Часть 1. Электроразведка постоянным током. Поляризационные методы электроразведки: Учебн. пособие. 2-е изд., стереотипное. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2007. – 328 с.
2. Матвеев Б. К. Электроразведка: Учеб. Для вузов. 2-е изд., перераб и доп. – М.: Недра, 1990. – 368 с.

Приложение 1

Варианты для выполнения контрольной работы

№ варианта	Ток I (А)	ρ (Ом м)	H (м)	Y_1 (м)	Y_2 (м)	L (м)
1	2	1500	500	0	2000	2000
2	1	4000	600	400	3200	3000
3	2	2000	450	200	2500	2000
4	2	1500	350	100	2000	1500
5	0,5	250	100	50	500	450
6	1	1500	500	50	2000	2000
7	2	2000	600	0	2500	2500
8	1,6	3500	450	400	3000	2800
9	0,3	400	100	100	600	600
10	3	2000	400	50	1700	1600
11	0,5	100	50	100	400	500
12	0,5	500	0	100	500	500
13	3	3000	500	350	2500	2800
14	1,5	600	300	100	1400	1400
15	1	500	200	0	1000	800
16	4	3000	600	200	3000	2800
17	2	500	400	0	1500	1500
18	3,2	1500	450	50	1800	1800
19	0,4	600	125	50	750	750
20	2,5	2500	500	300	2700	2500
21	1,5	2000	250	200	1500	1400

Министерство высшего образования
и науки Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»
Факультет геологии и геофизики
Кафедра геофизики

Б1.Б.2.03 «Электроразведка»

КОНТРОЛЬНАЯ (РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ) РАБОТА

Выполнил: студент Иванов И.И.,
группа РФ-18

Руководитель: доц. Петряев В.Е.

Екатеринбург 2022 г.



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Уральский государственный горный университет»**

А. А. Редозубов, Г. А. Косарева

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА

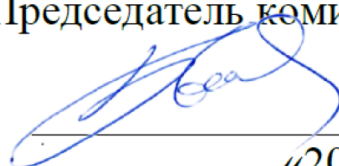
Часть 1

*Методическое руководство
по выполнению индивидуальных заданий
по курсу «Электроразведка»*

**для студентов специальности 21.05.03 Технологии геологической
разведки специализации Геофизические методы поисков и
разведки месторождений полезных ископаемых (РФ)**

**Екатеринбург
2020**

ОДОБРЕНО
методической комиссией
факультета геологии и геофизики
Председатель комиссии



В. И. Бондарев
«20» марта 2020 г.

А. А. Редозубов, Г. А. Косарева

Методическое руководство
по выполнению индивидуальных заданий
по курсу «Электроразведка»
для студентов специальности 21.05.03 Технологии геологической
разведки специализации Геофизические методы поисков и разведки
месторождений полезных ископаемых (РФ)

Часть 1

Редозубов А.А., Косарева Г.А. Методическое руководство по выполнению индивидуальных заданий по курсу «Электроразведка» для студентов специальности 21.05.03 Технологии геологической разведки специализации Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых (РФ). Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2020. 27 с.

Методическое руководство содержит необходимые указания по выполнению индивидуальных домашних заданий, соответствующих программе дисциплины «Электроразведка» для студентов специальности 21.05.03 Технологии геологической разведки специализации Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых (РФ).

Рецензент: В. Е. Петряев, канд.геол.-мин.наук, доцент кафедры геофизики.

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Уральского государственного университета.

© Редозубов А.А., Косарева Г.А.,
2020 © Уральский государственный
горный университет, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Задание 1. Преломление электрического поля на границе раздела.	3
2. Задание 2. Расчет коэффициента установки.	4
3. Задание 3. Приближенное построение графиков ρ_k электропрофилирования.	7
4. Задание 4. Определение типов многослойных кривых ВЭЗ. Определение суммарной продольной проводимости S и удельных сопротивлений верхнего и нижнего слоев.	17
5. Задание 5. Выбор источника тока и расчет питающих заземлений.	19
6. Литература.	26

Задание 1. Преломление электрического поля на границе раздела.

Закон преломления поля на контакте двух сред, различающихся по удельному сопротивлению, вытекает из граничных условий и имеет вид:

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (1.1)$$

где ρ_1 и ρ_2 – удельные сопротивления пород по разные стороны контакта;

α_1 и α_2 – углы, образованные векторами плотности тока (или напряженности поля) с нормалью к контакту в бесконечно близких точках в среде ρ_1 и ρ_2 соответственно.

Так как изолинии потенциала ортогональны токовым и силовым линиям, для них закон преломления имеет такой же вид, если в формуле (1.1) в качестве углов α_1 и α_2 принимать углы, образованные изолинией потенциала с границей раздела (рис.1.1).

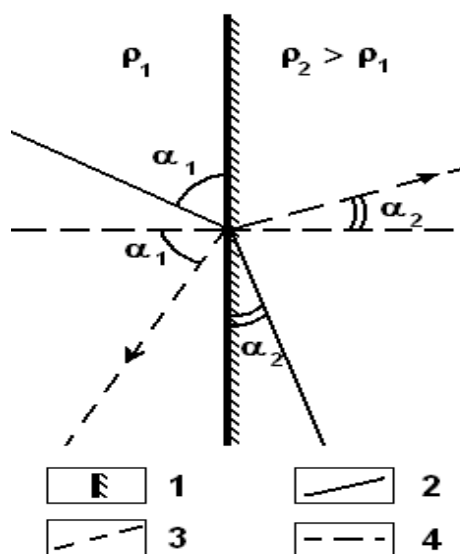


Рис.1.1 Преломление электрического поля на границе двух сред:

1 – граница раздела; 2 – изолинии потенциала; 3 – токовые (силовые) линии; 4 – нормаль к границе раздела.

3. Построить силовые (токовые) линии, проходящие через точки излома изолиний (по обе стороны контакта).

Литература по теме задания: /4/, сс.12-13; /5/, сс.10-11.

Задание

1. По фрагментам двух изолиний потенциала определить положение контакта двух пород разного сопротивления.

2. Определить соотношение удельных сопротивлений пород по разные стороны контакта: найти значения необходимых величин, написать формулу в общем виде, подставить в неё числовые значения и вычислить отношение сопротивлений (большого к меньшему).

Задание 2. Расчет коэффициента установки.

В методах сопротивлений эффективное (кажущееся) сопротивление среды определяется, как произведение нормированной по току в питающей линии разности потенциалов между приемными заземлениями $\Delta U/I$ на коэффициент установки K . Коэффициент K зависит от типа установки и её размеров. В однородной среде кажущееся сопротивление $\rho_k = K \frac{\Delta U}{I}$ равно истинному удельному сопротивлению ρ и от типа и размеров установки не зависит. В неоднородной среде ρ_k зависит от параметров установки и её положения относительно слагающих геоэлектрический разрез геологических тел.

В зависимости от взаимного расположения приемных заземлений M и N может измеряться разность потенциалов ΔU , потенциал U или напряженность поля E . Потенциал измеряется в тех случаях, когда приемное заземление N отнесено на большое расстояние, принимаемое за бесконечное. Напряженность поля может быть измерена, если расстояние между заземлениями M и N равно 1 метру (или другой единице длины при использовании иной системы измерений). Практически можно перейти от ΔU к E и при любом размере линии, если он достаточно мал по сравнению с расстоянием до питающих заземлений: $E = \Delta U/MN$. Таким образом, в зависимости от измеряемой в приемной линии величины, кажущееся сопротивление может быть вычислено по одной из следующих формул:

$$\begin{aligned}\rho_k &= K \frac{\Delta U}{I} \\ \rho_k &= K \frac{U}{I} \\ \rho_k &= K \frac{E}{I}\end{aligned}\tag{2.1}$$

Коэффициенты установок в этих случаях, естественно, будут разными.

Для вычисления коэффициента установки во всех случаях используется один и тот же принцип. Надо написать выражение для измеряемой в приемной

Не останавливаясь на простейших установках, рассмотренных в /4/, когда все заземления расположены на одной прямой линии, рассмотрим расчет коэффициента установки для некоторых более сложных случаев.

Так как и питающее заземление, и приемная линия находятся не на поверхности земли, для учета границы раздела «земля-воздух» в точке, являющейся зеркальным отражением действительного источника A , поместим фиктивный источник A' такой же мощности (см. рис.2.1). Теперь поле можно рассчитывать, как в безграничной среде при двух источниках A и A' .

$$\Delta U = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{AM} + \frac{1}{A'M} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{A'N} \right) = \frac{\rho I}{4\pi} \left[\frac{1}{\sqrt{L^2 + (H - Z + \ell)^2}} + \frac{1}{\sqrt{L^2 + (H + Z - \ell)^2}} - \frac{1}{\sqrt{L^2 + (H - Z - \ell)^2}} - \frac{1}{\sqrt{L^2 + (H + Z + \ell)^2}} \right] \quad (2.2)$$
$$\rho = \frac{4\pi}{\frac{1}{\sqrt{L^2 + (H - Z + \ell)^2}} + \frac{1}{\sqrt{L^2 + (H + Z - \ell)^2}} - \frac{1}{\sqrt{L^2 + (H - Z - \ell)^2}} - \frac{1}{\sqrt{L^2 + (H - Z + \ell)^2}}} \times$$

$$\times \frac{\Delta U}{I} = K \frac{\Delta U}{I}.$$

Если требуется найти выражение коэффициента установки для вычисления ρ_k через напряженность поля E , надо написать уравнение потенциала U в центре линии MN (точка O)

$$U = \frac{\rho I}{4\pi} \left[\frac{1}{\sqrt{L^2 + (H - Z)^2}} + \frac{1}{\sqrt{L^2 + (H + Z)^2}} \right]. \quad (2.4)$$

Продифференцировав выражение U по Z , найдем E_z :

$$E_z = -\frac{\partial U}{\partial Z} = \frac{\rho I}{4\pi} \left\{ -\frac{H - Z}{[L^2 + (H - Z)^2]^{3/2}} + \frac{H + Z}{[L^2 + (H + Z)^2]^{3/2}} \right\}. \quad (2.5)$$

Решив (2.5) относительно ρ , получим:

$$\rho = \frac{4\pi}{\frac{H + Z}{[L^2 + (H + Z)^2]^{3/2}} - \frac{H - Z}{[L^2 + (H - Z)^2]^{3/2}}} \cdot \frac{E}{I} = K \frac{E}{I} \quad (2.6)$$

не трудно видеть, что в этом случае коэффициент установки имеет размерность не «м», а «м²».

Чтобы получить выражение коэффициента установки для случая измерения потенциала, надо решить относительно ρ уравнение (2.4).

Если питающее заземление или приемная линия располагаются на поверхности земли, учет границы раздела «земля-воздух» производится путем удвоения потенциала, т.е. в выражении для U « 4π » заменяется на « 2π ».

б) Установка с двумя питающими заземлениями одного знака разной мощности (рис.2.2)

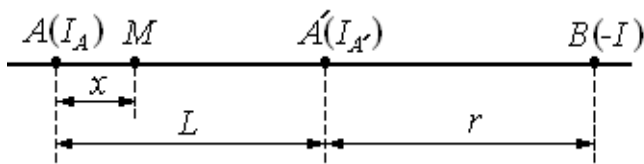


Рис. 2.2. Установка с двумя питающими заземлениями одного знака

Потенциал в точке M создается токами, стекающими с двух положительных источников A и A' и отрицательного заземления B . Сумма токов источников A и

A' равна току на заземлении B . Выражение для потенциала удобно записать, выразив токи, стекающие с заземлений A и A' через ток на заземлении B . В этом случае потенциал

$$U = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{I_A/I}{AM} + \frac{I_{A'}/I}{A'M} - \frac{1}{BM} \right) = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{I_A/I}{x} + \frac{I_{A'}/I}{L-x} - \frac{1}{r+L-x} \right). \quad (2.7)$$

Решив уравнение относительно ρ , получим:

$$\rho = \frac{2\pi}{\frac{I_A/I}{x} + \frac{I_{A'}/I}{L-x} - \frac{1}{r+L-x}} \cdot \frac{U}{I} = K \frac{U}{I}. \quad (2.8)$$

Если кажущееся сопротивление вычисляется через разность потенциалов между приемными заземлениями M и N , надо написать выражение для потенциалов в точках M и N , взять их разность и, решив полученное уравнение относительно ρ , найти выражение для коэффициента установки, как это было сделано в предыдущем примере.

Если кажущееся сопротивление вычисляется через напряженность поля, надо продифференцировать выражение (2.7) по x и решить полученное уравнение относительно ρ . Отбросив в полученном решении отношение E/I , найдем выражение для коэффициента установки.

Задание

1. Вывести формулу коэффициента заданной установки в общем виде.

2. Подставить в формулу заданные числовые значения параметров установки и вычислить величину коэффициента установки. Указать размерность.

Литература по теме задания: /4/, сс.32-35; /5/, сс.32-35; /7/, сс.137-141; /2/, с.32; /3/, с.106.

Задание 3. Приближенное построение графиков ρ_k электропрофилирования.

Графики кажущегося сопротивления при профилировании через одиночные контакты и пласты имеют простую форму и их интерпретация обычно не вызывает затруднений. Если расстояние между такими элементами геоэлектрического разреза превышает размер установки, каждый из них

проявляется на графике, как отдельная аномалия, которая легко интерпретируется. Если же в пределах установки могут располагаться два или более элемента разреза, аномалии от них накладываются одна на другую и график ρ_k может стать достаточно сложным для интерпретации. В последнем случае можно использовать способ подбора. Но решение прямой задачи для нескольких близко расположенных границ раздела громоздко и реально осуществимо только с применением компьютера при наличии соответствующих программ. Поскольку интерпретация результатов электропрофилирования, как правило, качественная и сводится к определению положения контактов и оценке соотношения удельных сопротивлений, при решении прямой задачи можно ограничиться получением формы графиков, без точного количественного определения ρ_k . Для этого удобно воспользоваться способом приближенного построения графиков ρ_k , основанном на связи кажущегося сопротивления и плотности тока:

$$\rho_k = \rho_{MN} \frac{j_{MN}}{j_{0MN}}, \quad (3.1)$$

где ρ_{MN} – удельное сопротивление среды между приемными заземлениями;

j_{MN} – плотность тока между приемными заземлениями;

j_{0MN} – плотность тока между приемными заземлениями в однородной среде.

Принцип приближенного построения графиков ρ_k и его применение на примере одиночных пластов подробно рассмотрены в /4/, сс.104-117 и /5/, сс.77-87. Для иллюстрации его использования в более сложных случаях рассмотрим пример, когда на небольшом расстоянии один от другого располагаются два пласта, имеющие повышенное и пониженное сопротивление. Пусть плохо проводящий пласт имеет среднюю, т.е. несколько большую размера приемной линии мощность, а хорошо проводящий пласт маломощный, имеющий мощность, меньшую разноса MN (рис.3.1).

Графики ρ_k комбинированного и симметричного профилирования отдельно над каждым пластом, аналогичные приведенным на рис.3.17,а и 3.22,а

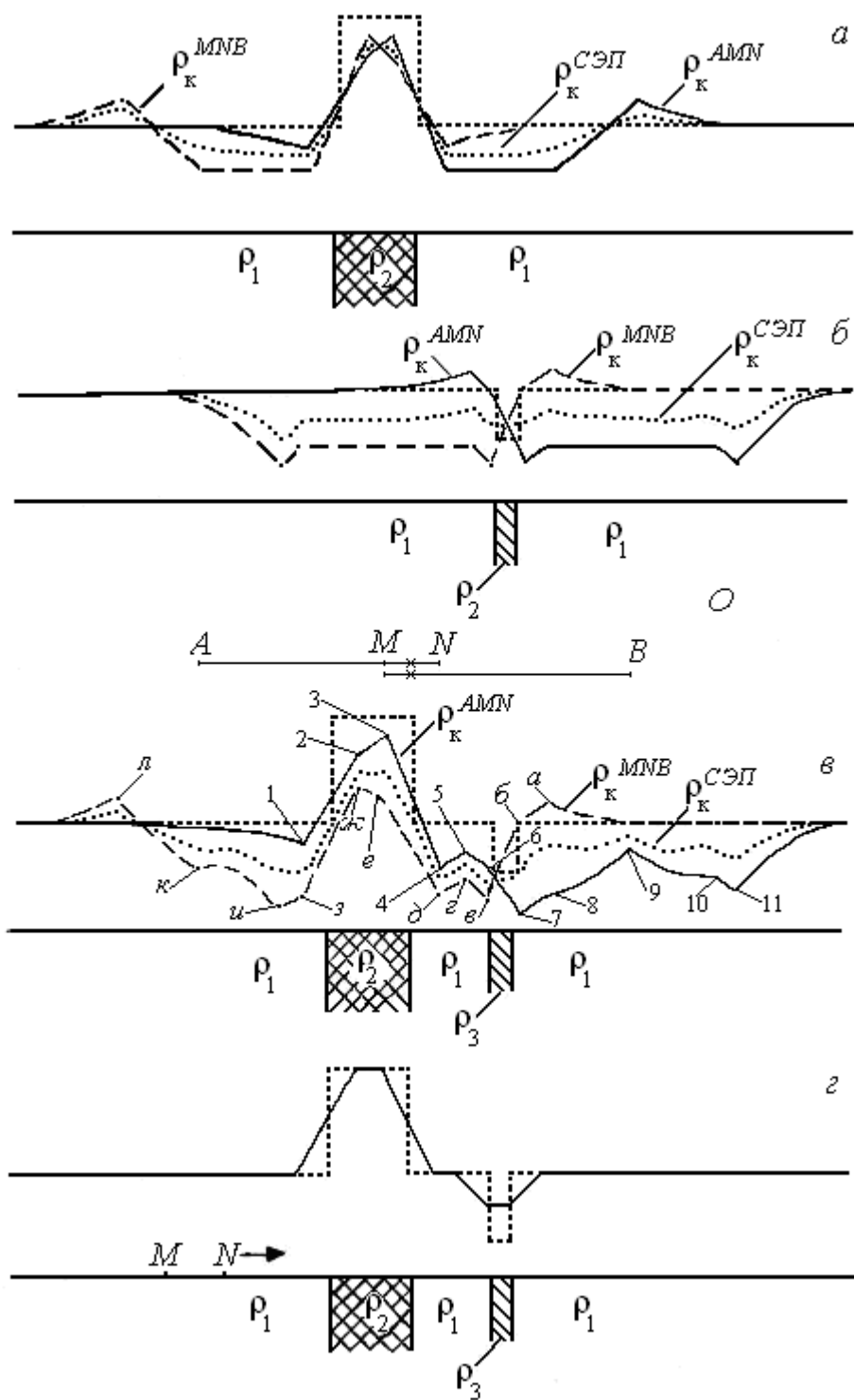


Рис. 3.1. Графики ρ_k электропрофилирования над вертикальным пластом: *а* – графики ρ_k комбинированного и симметричного профилирования над плохо проводящим пластом средней мощности; *б* – то же над хорошо проводящим пластом малой мощности; *в* – то же над сближенными плохо и хорошо проводящими пластами; *г* – график ρ_k срединного градиента над двумя пластами. Мелкими штрихами показаны графики истинных удельных сопротивлений

в /4/ и рис.2.15,а и 2.19,а в /5/, показаны на рис.3.1,а и 3.1,б. Графики ρ_k для случая, когда оба пласта расположены рядом, изображены на рис.3.1,в. Рассмотрим их построение. Пусть установка AMN передвигается слева направо. Пока расстояние до пластов достаточно велико, они не оказывают влияние на растекание тока в пределах установки и $j_{MN} = j_{0MN}$. Поэтому, в соответствии с (3.1), $\rho_k = \rho_{MN} = \rho_1$. По мере приближения к плохо проводящему пласту плотность тока на участке расположения приемной линии уменьшается, так как пласт препятствует растеканию тока. При этом j_{MN} становится меньше j_{0MN} и ρ_k меньше ρ_1 . Понижение ρ_k происходит до тех пор, пока передний приемный электрод N не встанет на контакт (точка 1).

При переходе приемной линии через левый контакт пласта ρ_{MN} быстро возрастает от ρ_1 до ρ_2 . При этом в силу граничного условия скачкообразного изменения j_{MN} не происходит (установка ориентирована вкrest контакта, поэтому величина j_{MN} определяется компонентой плотности тока, нормальной к контакту). Следовательно, поведение ρ_k на этом участке в основном определяется изменением ρ_{MN} . Когда контакт располагается между приемными электродами, кажущееся сопротивление растет, пока заземление M не встанет на контакт (точка 2).

Когда приемная линия перемещается внутри пласта, ρ_{MN} остается постоянным. Но по мере приближения к правому контакту пласта, т.е. к более проводящей среде за пластом, происходит некоторое увеличение j_{MN} и кажущееся сопротивление продолжает расти, достигая максимальной величины, когда электрод N находится на контакте (точка 3). Так как плотность тока внутри пласта меньше j_0 , ρ_k не достигает удельного сопротивления пласта ρ_2 .

При переходе приемной линии через правый контакт плохо проводящего пласта ρ_{MN} уменьшается от ρ_2 до ρ_1 . Кажущееся сопротивление при этом уменьшается, пока электрод M не встает на контакт (точка 4). Так как плотность тока за пластом меньше j_0 вследствие экранирующего действия пласта, ρ_k в этой точке меньше ρ_1 .

Если бы не было проводящего пласта, после перехода линии MN через пласт наблюдалась бы площадка равных сопротивлений, пока питающее заземление и приемная линия разделены пластом (см.рис.3.1,а). В рассматриваемом случае вследствие натекания тока в проводящий пласт j_{MN} растет и соответственно увеличивается ρ_k пока электрод N не встанет на левый контакт проводящего пласта (точка 5). Если бы не было экранирующего действия пласта высокого сопротивления ρ_k в этой точке было бы больше ρ_1 (см.рис.3.1б). В нашем случае кажущееся сопротивление имеет меньшую величину.

После перехода электрода N через левый контакт проводящего пласта по мере движения установки проходит уменьшение ρ_{MN} , так как между приемными заземлениями включается более проводящая среда. Но наименьшее значение ρ_{MN} , когда весь пласт располагается между приемными заземлениями (точка 6), остается больше, чем ρ_3 , так как пласт занимает только часть интервала MN . Поэтому кажущееся сопротивление в точке 6 имеет достаточно большую величину. Так как $MN/2$ больше мощности пласта, эта точка располагается левее пласта.

При дальнейшем перемещении установки, пока пласт располагается внутри приемной линии, ρ_{MN} не меняется. Но при этом между приемными заземлениями вместо участка вмещающей среды перед пластом, имеющего высокое сопротивление и высокую плотность тока, включается участок среды за пластом с тем же сопротивлением ρ_1 , но низкой плотностью тока из-за экранирующего действия пласта. Поэтому j_{MN} уменьшается и происходит быстрое уменьшение ρ_k до тех пор, пока электрод M не встанет на левый контакт проводящего пласта (точка 7).

По мере перемещения электрода M через проводящий пласт ρ_{MN} возрастает, достигая величины ρ_1 , когда электрод M стоит на правом контакте пласта. При этом происходит некоторый рост ρ_k (точка 8). Но из-за экранирующего действия пластов значение ρ_k в этом случае значительно ниже

уровня площадки равных сопротивлений для одиночного пласта (сравните с рис.3.1б).

При дальнейшем движении установки питающее заземление перемещается через плохо проводящий пласт и экранирующее действие пласта уменьшается. При этом увеличивается j_{MN} и кажущееся сопротивление растет, достигая максимальной величины, когда заземление A встает на правый контакт плохо проводящего пласта (точка 9). Происходит «обратное экранирование», пласт как бы отражает поле, увеличивая его интенсивность в правой части профиля. Но из-за экранирующего действия проводящего пласта ρ_k остается меньшим ρ_1 (сравните с рис. 3.1а).

По мере удаления электрода A от плохо проводящего пласта влияние последнего уменьшается и ρ_k постепенно понижается, выходя на нормальный уровень площадки равных сопротивлений для проводящего пласта. Площадка заканчивается, когда питающее заземление встает на левый контакт проводящего пласта (точка 10).

При переходе питающего заземления через проводящий пласт j_{MN} и, соответственно, ρ_k уменьшается, так как пласт как бы «отсасывает» ток от правой части профиля, где расположена линия MN . Минимальное значение ρ_k наблюдается, когда электрод A стоит на правом контакте проводящего пласта (точка 11). После этого, по мере удаления установки от пластов постепенно восстанавливается нормальное растекание тока и ρ_k выходит на уровень сопротивления вмещающей среды ρ_1 .

Теперь рассмотрим график ρ_k для встречной трехэлектродной установки такого же размера. Будем перемещать установку MNB справа налево (удобнее рассматривать поведение ρ_k , когда приемная линия располагается впереди по ходу движения установки). При приближении к проводящему пласту происходит натекание тока в пласт и j_{MN} увеличивается по сравнению с j_{OMN} . Это приводит к увеличению ρ_k , которое становится больше ρ_1 и достигает наибольшей величины, когда электрод M становится на контакт (точка a).

При перемещении заземления M по пласту часть интервала MN заполняется проводящей средой с удельным сопротивлением ρ_3 . Это приводит к уменьшению ρ_{MN} и кажущегося сопротивления, пока электрод M не встанет на левый контакт и весь пласт не окажется в пределах приемной линии (точка $б$).

Пока пласт находится внутри приемной линии, ρ_{MN} не меняется, но по мере перемещения установки вместо участка вмещающей среды справа от пласта с относительно высоким удельным сопротивлением и высокой плотностью тока включается участок слева от пласта с тем же удельным сопротивлением и низкой плотностью тока. Поэтому ρ_k понижается, достигая наименьшего значения, когда электрод N находится на правом контакте проводящего пласта (точка $в$).

По мере перемещения электрода N от правого контакта пласта к левому происходит увеличение ρ_{MN} и, соответственно, ρ_k до тех пор, пока заземление N не окажется на левом контакте пласта (точка $г$).

При дальнейшем перемещении установки в случае одиночного пласта наблюдалась бы площадка равных сопротивлений (см.рис.3.1,б). но так как в нашем случае есть еще плохо проводящий пласт, при приближении к нему плотность тока j_{MN} уменьшается и кажущееся сопротивление понижается, пока электрод M не достигнет правого контакта этого пласта (точка $д$).

При входе приемной линии в плохо проводящий пласт происходит увеличение ρ_{MN} от ρ_1 до ρ_2 и возрастание кажущегося сопротивления, пока приемная линия полностью не выйдет в пласт (точка $е$). При приближении к левому контакту пласта происходит увеличение плотности тока за счет натекания тока в более проводящую среду слева от пласта. При этом ρ_k растет, пока электрод M не встанет на левый контакт пласта (точка $ж$). когда приемная линия установки MNB располагается внутри плохо проводящего пласта, между ней и питающим заземлением находится проводящий пласт, служащий экраном. Поэтому над пластом ρ_k^{MNB} меньше, чем ρ_k^{AMN} .

При выходе приемной линии из плохо проводящего пласта ρ_{MN} уменьшается и, соответственно, понижается ρ_k , пока электрод N не достигает левого контакта пласта (точка $з$). в этом положении между приемной линией и питающим заземлением располагаются оба пласта. Поэтому ρ_k в точке $з$ значительно ниже уровня площадки равных сопротивлений для одиночного плохо проводящего пласта (сравните с рис.3.1,а).

При дальнейшем перемещении установки в нашем случае питающий электрод переходит через хорошо проводящий пласт. При этом наблюдается понижение ρ_k (экранный эффект). Наименьшего значения ρ_k достигает, когда питающий электрод B располагается на левом контакте проводящего пласта (точка $и$).

Далее, по мере удаления питающего заземления от проводящего пласта ρ_k растет и выходит на уровень площадки равных сопротивлений для одиночного плохо проводящего пласта. Площадка равных сопротивлений заканчивается, когда электрод B встает на правый контакт плохо проводящего пласта (точка $к$).

При переходе питающего заземления через плохо проводящий пласт j_{MN} , а с ней и ρ_k растут. После перехода электрода B через середину пласта ρ_k становится больше сопротивления вмещающей среды, достигая наибольшего значения, когда питающее заземление находится на левом контакте плохо проводящего пласта (точка $л$). При дальнейшем движении установки постепенно восстанавливается нормальное растекание тока и ρ_k выходит на уровень удельного сопротивления вмещающей среды.

Кажущееся сопротивление для симметричной установки находится, как среднее арифметическое из ρ_k , измеренных встречными трехэлектродными установками /4/, сс. 92-93, /5/, с.66.

$$\rho_k^{сЭП} = \frac{\rho_k^{AMN} + \rho_k^{MNB}}{2}. \quad (3.2)$$

Сравнивая графики ρ_k для одиночных пластов и двух сближенных таких же пластов можно видеть, как аномалии искажаются влиянием соседних объектов. В методе комбинированного профилирования графики ρ_k для

установок AMN и MNB над одиночным пластом высокого сопротивления (см.рис.3.1, *а*) и над таким же пластом в присутствии проводящего пласта (см.рис.3.1, *в*) по форме одинаковы. Но в случае двух пластов в приведенном примере пропадает обратное пересечение графиков. Это уменьшает надежность интерпретации, так как такой же характер (одновременное повышение ρ_k для обеих установок) имеет аномалия над приповерхностной плохо проводящей неоднородностью.

Над проводящим пластом в случае двух объектов прямое пересечение графиков сохраняется, но смещается в сторону пласта высокого сопротивления. Значение ρ_k^{AMN} между пластами сильно понижены по сравнению со случаем одного пласта (сравните с рис.3.1, *б*). В целом графики ρ_k в этой части профиля больше похожи на аномалию от контакта (см.рис.3.1, *в*).

Аномалия над плохо проводящим пластом в симметричном профилировании мало отличается от аномалии над одиночным пластом. В случае двух пластов только немного уменьшается ее интенсивность (см.рис.3.1, *в*). Над маломощным проводящим пластом аномалия в обоих случаях имеет весьма малую интенсивность (менее 20%). В реальных условиях аномалии такой интенсивности чаще всего выделить не удастся. Заметим, что в комбинированном профилировании над таким одиночным пластом аномалия очень отчетливая (см.рис.3.1, *б*).

Наименьшее искажение аномалий от соседних объектов наблюдается в методе срединного градиента. В этом случае, если разнос питающих электродов AB достаточно большой, в средней части установки поле можно полагать однородным. Если установка ориентирована вкрест простирания вертикальных границ раздела, при переходе через них изменения плотности тока не происходит и во всех точках профиля $j_{MN} = j_{OMN}$. Поэтому, согласно (3.1), $\rho_k = \rho_{MN}$, т.е кажущееся сопротивление равно удельному сопротивлению той среды, в которой располагается приемная линия. Если разные участки среды между приемными электродами различаются по удельному сопротивлению, величина ρ_{MN} находится, как среднее взвешенное значение. Например, пусть участок

длиной d имеет удельное сопротивление ρ_1 , а оставшаяся часть интервала MN - сопротивление ρ_2 . Тогда

$$\rho_{MN} = \frac{\rho_1 d + \rho_2 (MN - d)}{MN}. \quad (3.3)$$

График ρ_k срединного градиента для рассматриваемого геоэлектрического разреза приведен на рис.3.1,г. Как видно из рисунка, в методе срединного градиента аномалии имеют несколько большую интенсивность, чем в симметричном профилировании.

Рассмотренный способ приближенного построения графиков ρ_k можно применить и когда крутопадающие границы раздела перекрыты слоем рыхлых отложений. В этом случае характер графиков сохраняется, только они становятся более сглаженными, а интенсивность аномалий уменьшается.

Задание

1. Построить графики ρ_k для встречных трехэлектродных установок (комбинированного профилирования) над заданным геоэлектрическим разрезом с вертикальными границами раздела. Следите, чтобы положение характерных точек графиков соответствовало размерам вашей установки.

2. По графикам ρ_k для встречных трехэлектродных установок построить график ρ_k симметричного профилирования.

3. Построить график ρ_k срединного градиента.

4. Подробно опишите ход рассуждений, которыми Вы пользовались при построении графиков ρ_k . Опишите характерные признаки аномалий над имеющимися в вашем разрезе объектами. Укажите, как по графикам ρ_k определяется положение границ раздела.

Рекомендация по выполнению задания

Прежде чем приступить к построению графиков ρ_k на листе миллиметровки начертите геоэлектрический разрез. Над разрезом покажите график истинных удельных сопротивлений. На полоске бумаги нарисуйте в

масштабе вашу трехэлектродную установку, отметьте точку записи – центр приемной линии (рис.3.2) Перемещая схему установки вдоль разреза, анализируйте поведение ρ_k , точно отмечайте положение характерных точек графика, которые наблюдаются, когда какой-либо электрод располагается на границе раздела.

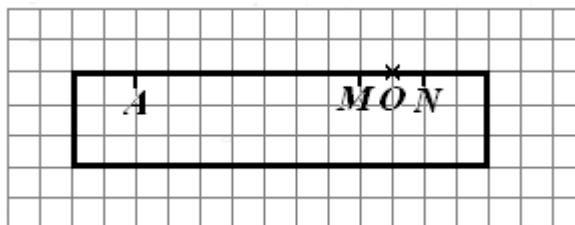


Рис.3.2. Шаблон для построения графика

Литература по теме задания: /4/, сс.92-93, сс.104-117; /5/, сс.66, сс.77-87.

Задание 4. Определение типов многослойных кривых ВЭЗ. Определение суммарной продольной проводимости S и удельных сопротивлений верхнего и нижнего слоев.

Кривые зондирования различаются по числу слоев в разрезах, которым они соответствуют. Различают двухслойные, трехслойные и многослойные (с числом слоев более трех) кривые. В случае необходимости количество слоев в многослойных разрезах конкретизируют и, соответственно, выделяют кривые четырехслойные, пятислойные и т.д.

Более детальная классификация производится по соотношению удельных сопротивлений слоев. Двухслойные кривые по этому признаку могут быть двух типов: кривые с восходящей ветвью ($\rho_2 > \rho_1$) и кривые с нисходящей ветвью ($\rho_2 < \rho_1$).

Трехслойные кривые могут быть четырех типов. Кривые с хорошо проводящим промежуточным слоем ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$) называются кривыми типа H . Эти кривые имеют минимум в средней части. Кривыми типа K называют кривые с максимумом, соответствующие разрезу с плохо проводящим

промежуточным слоем ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$). Кривые типа Q характеризуются постепенным уменьшением ρ_k по мере увеличения размера установки $AB/2$. От двухслойных кривых с нисходящей ветвью они отличаются наличием в средней части коленообразного уступа (не всегда четко выраженного). Такие кривые соответствуют разрезам, в которых каждый нижележащий слой имеет удельное сопротивление, меньшее, чем у вышележащего слоя ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$). В кривых типа A , напротив, ρ_k с увеличением $AB/2$ возрастает. Такие кривые соответствуют разрезам, в которых каждый нижележащий слой имеет более высокое удельное сопротивление ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$).

При определении типа многослойных кривых их рассматривают, как совокупность трехслойных кривых. Сначала выделяется участок кривой, соответствующий трем верхним слоям разреза и определяется его тип. Затем отбрасывается первый слой, добавляется участок кривой, соответствующий четвертому слою и определяется тип получившейся трехслойной кривой и т.д. если записать по порядку символы всех трехслойных кривых, получится название многослойной кривой. Число символов в шифре многослойной кривой на два меньше числа слоев в разрезе. Пример определения типа пятислойной кривой приведен на рис.4.1.

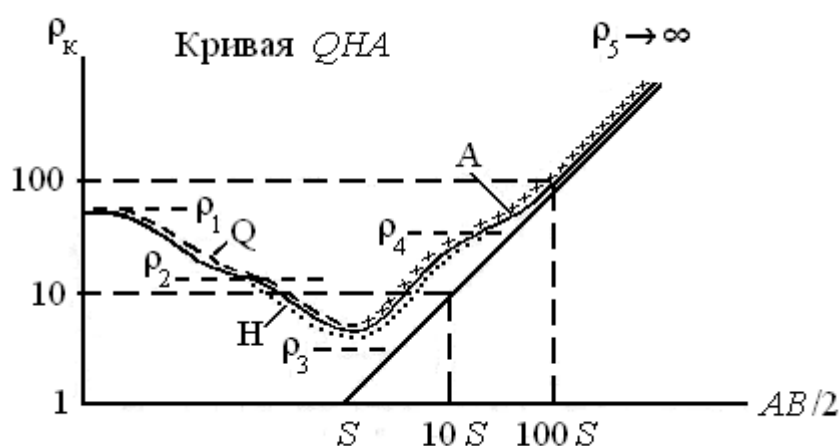


Рис. 4.1. Пример определения типа многослойной кривой

Удельное сопротивление верхнего слоя ρ_1 определяется по асимптоте к начальной части кривой. Аналогично определяется удельное сопротивление

самого нижнего слоя. Если это сопротивление много больше удельного сопротивления вышележащего слоя (в 50-100 раз и более), кривая выходит на асимптоту, наклонную к осям координат под углом 45° . В этом случае удельное сопротивление нижнего слоя полагают бесконечным. Удельное сопротивление промежуточных слоев определить нельзя, можно только дать их грубую оценку.

В случае бесконечного сопротивления нижнего слоя точка пересечения асимптоты с конечной частью кривой с осью $AB/2$ (при $\rho_k=1$) имеет координату $AB/2=S$, равную суммарной проводимости разреза (см.рис.4.1). Значение S можно определить по любой точке асимптоты. Например, при $\rho_k=10$ Ом·м $AB/2=10S$, при $\rho_k=100$ Ом·м $AB/2=100S$ (см.рис.4.1). Иными словами, взяв любую точку асимптоты, можно найти $S= AB/2 \rho_k$.

Задание

1. Определить тип каждой из заданных многослойных кривых.
2. Определить удельное сопротивление верхнего (ρ_1) и нижнего (ρ_N) слоев. Следует указывать конкретное значение N для вашего случая.
3. Для кривых, соответствующих разрезам с бесконечным удельным сопротивлением нижнего слоя, определить продольную проводимость S .

Литература по теме задания: /3/,с.с.280-286; /4/,с.с.125-126, 133-146; /6/,с.с.120-124; /7/,с.с.155-157.

Задание 5. Выбор источника тока и расчет питающих заземлений.

Целью работы является получение навыков оценки необходимых в заданных условиях параметров источника тока, выбора подходящего генератора или батарейного источника и расчета питающих заземлений.

В качестве исходных данных в задании указываются тип и размеры электроразведочной установки, ожидаемая величина кажущегося сопротивления, уровень помех U_n в мВ/км, характер почвы и её удельное

сопротивление ρ_n , предполагаемая глубина забивки электродов ℓ и их диаметр. Применительно к этим условиям предполагается определить минимальное значение силы тока I_{AB} в питающей линии, обеспечивающее уверенное измерение разности потенциалов ΔU на приемных электродах и выбрать тип источника тока. Затем следует определить максимально допустимое сопротивление питающей линии R_{AB} , выбрать подходящий тип провода, рассчитать сопротивление одного электрода. Если сопротивление линии с одним электродом на каждом заземлении превышает допустимое, надо определить, сколько электродов следует устанавливать на каждом заземлении. При этом указать, на каком расстоянии в заземлении будут располагаться электроды и при расчете сопротивления заземления учесть коэффициент использования заземлений η . При расчете сопротивления одного электрода следует учитывать коэффициент качества контакта электрода с почвой c .

1. Оценка необходимой силы тока и выбор его источника. Оценка допустимого сопротивления питающей линии.

В реальных условиях измеряемая на приемных электродах разность потенциалов складывается из полезного сигнала и сигнала-помехи. Чтобы обеспечивалась требуемая инструкцией по электроразведке точность измерений не хуже 5%, полезный сигнал ΔU должен превышать помеху U_n по крайней мере в 20 раз. Из этих сопротивлений и оценивается минимально необходимая сила тока в питающей линии:

$$\Delta U = \frac{I_{AB} \rho_k}{K} \geq 20 U_n, \quad (5.1)$$

$$I_{AB} \geq \frac{20 K U_n}{\rho_k}, \quad (5.2)$$

где K - коэффициент установки.

Под U_n подразумевается разность потенциалов, вызванная помехами, на интервале, равном разнесу приемных электродов MN . Если помеха задана на интервале другой длины, надо пересчитать её на свой размер MN . Например,

пусть помеха составляет 10 мВ/км, а разнос MN 50 м, т.е. 0,05 км. Очевидно, в этом случае на приемных электродах будет наблюдаться

$$U_{\Pi}=10 \cdot 0,05=0,5 \text{ мВ.}$$

Предположим, что измерения выполняются симметричной установкой с размерами $AB=500$ м, $MN=50$ м. Ожидаемое кажущееся сопротивление порядка 400 Ом·м. Для этой установки $K=3886$ м. Необходимая сила тока

$$I_{AB} \geq \frac{20 \cdot 3886 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}}{400} = 0,097 \text{ А} = 97 \text{ мА.}$$

В данном примере необходимая сила тока имеет небольшую величину и в качестве источника тока можно использовать аппаратуру, имеющую маломощный генератор или батарею гальванических элементов. Рассмотрим оба варианта.

Вариант 1. Допустим, мы выбрали аппаратуру ЭРА-В-ЗНАК. Генератор этой аппаратуры имеет максимальную мощность $P=40$ ВА (эта аппаратура переменного тока, поэтому мощность измеряется не в Вт, а в ВА). Максимальное напряжение генератора 500 В. Но надо проверить, какое напряжение возможно получить при нашей силе тока:

$$U_{\text{макс}} = \frac{P_{\text{макс}}}{I} = \frac{40}{0,097} = 412 \text{ В.}$$

Таким образом, следует ориентироваться на напряжение генератора не более 412 В. Максимально допустимое сопротивление питающей линии

$$R_{AB\text{макс}} = \frac{U}{I} = \frac{412}{0,097} = 4247 \text{ Ом.}$$

Вариант 2. Мы решили выполнять работу на постоянном токе и использовать батарейный источник питания. Входящий в комплект аппаратуры ЭРА-П источник тока может дать максимальный ток 20 мА. Следовательно, он не подходит и придется работать с посторонним источником тока. Специальные электроразведочные батареи ГРМЦ в настоящее время не выпускаются. Поэтому придется монтировать батарею из находящихся в производстве гальванических элементов. Имеющие широкое распространение элементы 3336 (это квадратные фонарные элементы, которые правильнее было

бы назвать батареями, так как они состоят из 3 элементов) имеют рабочее напряжение 3,7В и позволяют получить ток силой до 350мА, что нас устраивает. Соберем батарею из 20 последовательно включенных элементов. Напряжение такой батареи будет 74 В. Сопротивление питающей линии в этом случае

$$R_{AB \text{ iàen}} = \frac{U}{I} = \frac{74}{0,097} = 763 \text{ Ом.}$$

Батарея будет иметь массу без упаковочного ящика 3 кг (вес одного элемента 150 г). Емкость выбранных нами элементов 0,5А·час. При нашем токе около 0,1А емкости батареи хватит на 5 часов непрерывной работы. Так как измерения на постоянном токе выполняются при кратковременных включениях тока в питающей линии, емкости батареи хватит для работы в течение нескольких недель. Если на некоторых участках сопротивление питающей линии будет уменьшаться и ток будет значительно увеличиваться, для экономии батарей следует уменьшить напряжение. Для этого целесообразно сделать у батареи секционированные выводы.

2. Расчет заземлений

Пусть заземления делаются в щебенистой песчано-глинистой почве с удельным сопротивлением $\rho_{\text{п}} = 90 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Из-за щебенки качество контакта электрода с почвой не очень хорошее и коэффициент качества контакта c примем равным 4. Electroды предполагается забивать на глубину $\ell = 25 \text{ см}$. Диаметр электродов 2 см (радиус $a = 1 \text{ см}$). Тогда сопротивление одного электрода

$$R_{\text{э}} = 0,367 \cdot c \cdot \frac{\rho_{\text{п}}}{\ell} \lg \frac{2\ell}{a} = 0,367 \cdot 4 \cdot \frac{90}{0,25} \lg \frac{0,5}{0,01} = 898 \text{ Ом.}$$

Питающая линия состоит из двух заземлений и соединительного провода. В нашем случае, когда длина питающей линии невелика и сила тока тоже небольшая целесообразно взять легкий провод. Несмотря на его достаточно большое сопротивление, при малой длине и малой силе тока потеря

напряжения в проводе будет небольшой. Возьмем провод ГПСМПО с сопротивлением 50 Ом/км. При длине питающей линии $AB=500$ м сопротивление провода $R_{пр}=25$ Ом. Если каждое питающее заземление сделать из одного электрода, сопротивление питающей линии

$$R_{AB} = 2R_{э} + R_{пр} = 2 \cdot 898 + 25 = 1821 \text{ Ом.}$$

В рассмотренном выше *первом варианте* допустимое сопротивление питающей линии было 4247 Ом. Следовательно, при работе с аппаратурой ЭРА-В-ЗНАК достаточно каждое питающее заземление делать из одного электрода.

Во *втором варианте*, при работе с батарейным источником тока, сопротивление питающей линии по нашим расчетам должно быть не больше 763 Ом. В этом случае для уменьшения сопротивления линии заземления будем устраивать из нескольких электродов каждое. Рассчитаем допустимое сопротивление одного заземления:

$$R_{\text{з.з.}} \leq \frac{R_{AB} - R_{пр}}{2} = \frac{763 - 25}{2} = 369 \text{ Ом}$$

Когда в заземлении несколько электродов, они оказывают взаимное влияние и их эффективное сопротивление увеличивается тем больше, чем меньше расстояние d между электродами. Эффективное сопротивление каждого электрода в системе заземления

$$R_{э \text{ эф.}} = \frac{R_{э}}{\eta}, \quad (5.3)$$

где $\eta = \frac{d}{d + \ell}$ -коэффициент использования заземления.

Будем располагать электроды на расстоянии 4ℓ один от другого, т.е. в нашем случае на расстоянии 1 м. Тогда коэффициент использования заземления

$$\eta = \frac{1}{1 + 0,25} = 0,8$$

Эффективное сопротивление одного электрода в системе заземления

$$R_{э \text{ эф.}} = \frac{R_{э}}{\eta} = \frac{898}{0,8} = 1122 \text{ Ом.}$$

Тогда количество электродов в одном заземлении

$$n = \frac{R_{\text{эф.}}}{R_{\text{аз.}}} = \frac{1122}{369} = 3,04. \quad (5.4)$$

Округлив это число, можно принять количество электродов в каждом заземлении равным 3.

Дополнение 1

Примерное значение коэффициента качества контакта электрода со средой для различных типов почв:

Болотистая почва $c=1,5$

Почва песчано-глинистая или песчаная влажная $c=2$

Почва песчано-глинистая сухая $c=3$

Почва песчаная сухая $c=4$

Почва песчано-глинистая со щебенкой $c=4$

Почва щебенистая $c=5$

Дополнение 2

Формула для коэффициента дипольной экваториальной установки достаточно громоздка. Поэтому часто при расчете коэффициента установки пользуются выражением для напряженности поля идеального диполя, а затем вводят “поправку за недипольность”.

Если расстояние между центрами диполей в экваториальной установке r ,

$$E = E_{\theta} = \frac{I\rho \cdot AB}{2\pi r^3}. \quad (5.5)$$

При конечном размере приемного диполя, если полагать поле на интервале MN однородным,

$$\Delta U = \frac{I\rho \cdot AB}{2\pi r^3} \cdot MN. \quad (5.6)$$

Решив это уравнение относительно ρ , найдем коэффициент установки:

$$\rho = \frac{\Delta U}{I} \cdot \frac{2\pi r^3}{AB \cdot MN}, \quad (5.7)$$

$$K = \frac{2\pi r^3}{AB \cdot MN}. \quad (5.8)$$

Чтобы учесть конечный размер диполей (“недипольность”) надо умножить это выражение для K на поправочный множитель. Номограмма для определения поправки за недипольность приведена в Инструкции по электроразведке /2/.

Если $AB < 0,5r$ и $MN < 0,2r$, поправочный множитель отличается от единицы не более, чем на 10-11 процентов. При определении необходимой силы тока наши расчеты носят оценочный характер. Поэтому поправку за недипольность можно не вводить.

Задание

1. Оценить необходимую в заданных условиях силу тока в питающей линии.
2. Выбрать подходящий источник тока. Оценить максимально допустимое сопротивление питающей линии.
3. Выполнить расчет заземлений. Определить необходимое количество электродов на питающих заземлениях.
4. Выбрать подходящий тип провода.

Литература по теме задания: /1/; /4/, сс.49-58, 68; /6/, сс. 80-82, 84-89, 93-94; /7/, сс.103-105, 133-135; /8/.

Литература

1. Бобровников Л.З., Орлов Л.И., Попов В.А. Полевая электроразведочная аппаратура: Справочник. - М.: Недра, 1986. – 223 с.
2. Инструкция по электроразведке: Наземная электроразведка, скважинная электроразведка, шахтно-рудничная электроразведка, аэроэлектроразведка, морская электроразведка / М-во геологии СССР. – Л.: Недра, 1984. – 352 с.
3. Матвеев Б.К. Электроразведка: Учеб. для вузов. – 2-е изд. Перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 352 с.
4. Редозубов А.А. Электроразведка. Часть 1. Электроразведка постоянным током. Поляризацияльные методы электроразведки: Учебное пособие. - Екатеринбург: УГГГА, 2004. – 327 с.
5. Редозубов А.А. Конспект лекций по электроразведке. Часть 1. Нормальные электрические поля. Электроразведка крутослоистых сред. - Екатеринбург: УГГГА, 1994. – 100 с.
6. Электроразведка: Справочник геофизика. В двух книгах/Под ред. В.К.Хмелевского и В.М.Бондаренко. Книга первая. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1989. 438 с.
7. Якубовский Ю.В., Ренард И.В. Электроразведка: Учебн. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1991. – 359 с.
8. Электроразведочная аппаратура – стенд в лаборатории электроразведки.

Авенир Александрович Редозубов
Косарева Гульшат Ахметовна

Методическое руководство
по выполнению индивидуальных заданий
по курсу «Электроразведка»
для студентов специальности 21.05.03 Технологии геологической разведки
специализации Геофизические методы поисков и разведки месторождений
полезных ископаемых (РФ)
Часть I

Корректурa кафедры геофизики

Подписано в печать
Бумага писчая. Формат бумаги 60x84 1/16. Печать на ризографе.
Печ.л.____ Уч.-изд.л.____ Тираж _____ экз. Заказ №

издательство УГГУ
620144, г.Екатеринбург, ул.Куйбышева, 30.
Уральский государственный горный университет



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Уральский государственный горный университет»

А. А. Редозубов, Г. А. Косарева

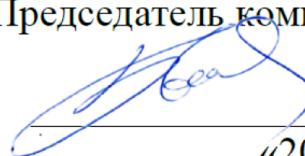
ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА

Часть 2

Методическое руководство
по выполнению индивидуальных заданий
по курсу «Электроразведка»
для студентов специальности 21.05.03 Технологии
геологической разведки
специализации Геофизические методы поисков и
разведки месторождений полезных ископаемых (РФ)

Екатеринбург
2020

ОДОБРЕНО
методической комиссией
факультета геологии и геофизики
Председатель комиссии



В. И. Бондарев
«20» марта 2020 г.

А. А. Редозубов, Г. А. Косарева

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА

Часть 2

Методическое руководство
по выполнению индивидуальных заданий
по курсу «Электроразведка»
для студентов специальности 21.05.03 Технологии геологической
разведки
специализации Геофизические методы поисков и разведки
месторождений полезных ископаемых (РФ)

Рецензент: *В. Е. Петряев*, канд. геол.-мин. наук, доцент
кафедры геофизики УГГУ

Методическое руководство рассмотрено на заседании кафедры и рекомендовано к изданию в УГГУ.

Редозубов А. А., Косарева Г. А.

Р33 ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА. Часть 2: методическое руководство по выполнению индивидуальных заданий курса «Электроразведка» для студентов специальности 21.05.03 Технологии геологической разведки специализации Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых (РФ). *А. А. Редозубов, Косарева Г. А.* Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2020. – 13 с.

Методическое руководство содержит необходимые указания по выполнению индивидуальных домашних заданий, соответствующих программе дисциплины «Электроразведка» для студентов специальности 21.05.03 Технологии геологической разведки специализации Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых (РФ).

Задание 1. Оценка интенсивности аномалий естественного поля фильтрационной природы

Для двух трехслойных разрезов I и II с плохо проводящим основанием заданы мощности h_1 и h_2 и удельные сопротивления ρ_1 и ρ_2 двух верхних слоев. По промежуточному слою происходит фильтрация подземных вод. Длина участка фильтрации L . Разность потенциалов между его началом и концом в обоих случаях одинакова. В каком случае аномалия естественного поля будет больше? Объясните, почему (сделайте необходимые расчеты).

Воспользовавшись формулой (6.2) в [2], оцените напряженность поля на поверхности земли, полагая длину участка фильтрации равной 1000 м, а разность потенциалов между его началом и концом (внутри слоя) равной 500 мВ. Оцените разность потенциалов, измеряемую в приемной линии MN длиной 50 м. Оцените разность потенциалов между началом и концом участка фильтрации на поверхности земли и сравните её с разностью потенциалов в фильтрующем слое.

Таблица 1

Варианты задания 1

Номер варианта	Разрез I				Разрез II			
	h_1	h_2	ρ_1	Ошибка! Ошибка связи. ₂	h_1	h_2	ρ_1	Ошибка! Ошибка связи. ₂
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	10	15	120	45	10	10	10	30
2	15	10	30	5	15	15	5	30
3	20	10	5	20	10	25	50	5
4	10	10	50	5	20	15	10	15
5	12	12	3	12	12	12	12	3
6	6	10	30	5	8	8	4	16
7	8	8	40	10	8	10	12	10
8	5	10	40	5	10	10	5	20
9	25	10	15	20	25	10	100	10
10	20	5	15	15	20	5	15	5

Продолжение табл.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
11	9	20	18	10	9	20	4,5	10
12	20	20	40	10	20	15	10	10
13	20	10	10	10	20	10	60	10
14	14	5	7	6	14	5	70	6
15	10	10	100	5	10	10	10	5
16	20	10	10	20	20	10	80	20
17	20	20	100	5	20	20	10	5
18	5	30	25	5	15	30	7,5	30
19	20	12	10	12	20	12	120	12
20	15	15	5	15	15	15	75	15
21	15	20	75	10	15	20	15	10
22	14	5	10	20	14	15	10	5
23	12	12	60	10	12	12	5	10
24	18	10	6	10	18	10	90	10
25	7	14	35	7	7	14	35	35
26	20	5	10	10	20	5	100	10
27	20	20	160	10	20	20	10	10
28	10	10	80	10	10	10	5	10
29	18	4,5	9	9	18	4,5	45	9
30	16	16	80	8	16	16	8	8
31	26	5	13	5	26	5	52	5
32	30	7	15	7	30	7	90	7
33	25	10	5	5	25	10	50	5
34	5	10	25	5	5	10	15	15
35	17	5	8,5	5	17	5	34	5
36	11	9	44	6	11	9	5,5	6
37	21	6	10,5	6	21	6	42	6
38	6	8	24	12	6	8	9	12
39	15	10	45	5	15	10	10	5
40	20	8	15	8	20	8	200	8
41	7	10	21	5	7	10	21	15
42	28	30	14	6	28	30	3,5	6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
43	28	16	7	16	28	16	112	16
44	9	17	90	8,5	9	17	9	8,5
45	17	15	68	5	17	15	8,5	5

Необходимую для выполнения задания информацию смотрите в [2] с. 225 - 228, или [1] с. 41 - 42, или [3] с. 45 - 46.

Задание 2. Расчет и сопоставление интенсивности аномалий η_k над изометричными объектами при поверхностной и объемной поляризации

Рассчитать графики над объектами, имеющими форму шара, в случае поверхностной и объемной поляризации. В обоих случаях объекты имеют одинаковые размеры и залегают на одинаковой глубине. Для расчета $\eta_{ка}$ можно использовать формулы (6.35) и (6.41) в [2]. В случае поверхностной поляризации удельное сопротивление объекта можно принять равным нулю, так как для массивных руд оно измеряется долями Ом·метра. Чтобы рассчитать аномалию от объемно-поляризующегося объекта, предварительно определите его поляризуемость по формуле (6.38) в [2]. Расчеты выполните для профиля, проходящего над центром объекта. Длину профиля выберите такой, чтобы на графике были экстремумы противоположного знака по обе стороны объекта. Рассчитывать следует аномальные значения $\eta_{ка}$, а затем прибавить к ним поляризуемость вмещающей среды $\eta_1=2\%$. Сравните интенсивности аномалий для случаев поверхностной и объемной поляризации и объясните полученное их соотношение. Кроме графиков η_k постройте график $\rho_k(E)$. Для вычислений можно воспользоваться формулой (5.17) в [2] или формулой (6.32), положив в последней $\lambda=0$.

При выполнении расчетов во всех случаях необходимо учесть границу раздела «земля – воздух» (некоторые формулы в литературе приведены для безграничной среды). Опишите вид всех графиков.

Таблица 2

Варианты задания 2

Номер вар.	a , м	h , м	ρ_1 , Ом·м	ρ_2 , Ом·м	v , %	λ , м	Номер вар.	a , м	h , м	ρ_1 , Ом·м	ρ_2 , Ом·м	v , %	λ , м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	100	160	200	60	12	0,3	24	100	160	400	200	12	0,3
2	50	75	100	25	15	0,25	25	90	135	300	90	10	0,2
3	75	150	150	60	10	0,2	26	70	105	200	80	9	0,25
4	100	170	300	100	7	0,15	27	60	120	250	75	10	0,2
5	80	120	250	50	20	0,4	28	80	120	150	60	14	0,3
6	70	110	120	30	16	0,35	29	50	100	100	35	12	0,25
7	90	145	200	65	9	0,1	30	75	150	200	60	13	0,2
8	60	90	140	56	8	0,2	31	90	155	300	75	17	0,3
9	55	90	180	65	6	0,25	32	80	135	250	75	16	0,25
10	110	180	200	60	11	0,15	33	70	120	400	100	15	0,2
11	100	175	100	20	13	0,3	34	60	90	120	40	11	0,15
12	80	145	160	48	12	0,25	35	50	100	100	35	14	0,25
13	75	150	300	75	18	0,35	36	100	150	400	160	12	0,2
14	100	150	400	80	16	0,25	37	80	130	350	140	10	0,2
15	70	120	350	175	20	0,2	38	90	155	300	90	12	0,25
16	80	130	500	250	10	0,1	39	70	120	200	80	13	0,3
17	60	90	250	75	12	0,25	40	60	95	150	60	15	0,25
18	90	180	400	120	14	0,3	41	50	75	100	35	14	0,2
19	100	165	200	80	12	0,2	42	80	145	180	60	13	0,25
20	50	80	250	50	10	0,15	43	75	135	300	120	18	0,3
21	60	100	300	120	9	0,2	44	90	145	250	100	16	0,2
22	70	140	200	80	12	0,25	45	100	165	300	120	15	0,15
23	80	135	100	35	20	0,35	46	50	90	200	80	14	0,2

Примечание. a - радиус объекта; h - глубина центра объекта; ρ_1 - удельное сопротивление вмещающей среды; ρ_2 - удельное сопротивление объекта; v - содержание рудной вкрапленности в объекте; λ - коэффициент поверхностной поляризации объекта.

Необходимую для выполнения задания информацию смотрите в [2], с. 245 - 251; с. 182; с. 185 - 186.

Задание 3. Расчет кажущегося сопротивления на поверхности анизотропной среды

Заданы продольное ρ_t и поперечное ρ_n удельные сопротивления анизотропной среды и угол падения слоистости α . Требуется определить продольное ρ_{kt} и поперечное ρ_{kn} кажущиеся сопротивления и кажущийся коэффициент анизотропии λ_k . Сравните полученные результаты со значениями этих параметров при вертикальном падении слоистости ($\alpha = 90^\circ$). Сравните отношения ρ_{kt}/ρ_{kn} с отношением ρ_t/ρ_n . Объясните причину различия этих отношений.

Рассчитайте значения кажущегося сопротивления при ориентировке установки под углом 30° и 60° к простиранию слоистости. Постройте полярную диаграмму ρ_k . Рассчитайте отношение осей изолинии потенциала точечного источника. Как соотносятся форма полярной диаграммы ρ_k и форма изолинии потенциала точечного источника?

Таблица 3

Варианты задания 3

Номер вар.	ρ_t Ом·м	ρ_n Ом·м	α град.	Номер вар.	ρ_t Ом·м	ρ_n Ом·м	α град.
1	2	3	4	5	6	7	8
1	100	200	65	24	500	2500	35
2	300	500	50	25	75	750	30
3	200	800	70	26	120	500	65
4	50	300	45	27	220	880	70
5	150	1500	30	28	200	1000	60
6	500	2000	60	29	180	900	50
7	250	1250	50	30	250	2500	45
8	700	2100	75	31	50	250	35
9	80	400	40	32	65	400	75
10	120	600	55	33	80	600	40
11	75	450	45	34	90	400	50
12	30	300	25	35	170	850	55

1	2	3	4	5	6	7	8
13	60	540	35	36	220	660	70
14	100	500	40	37	500	1500	65
15	200	1200	50	38	350	1000	60
16	90	720	45	39	40	200	45
17	400	2000	60	40	60	360	50
18	350	3500	70	41	200	1800	30
19	600	3000	65	42	250	1500	40
20	100	300	60	43	800	2400	70
21	160	800	55	44	70	500	45
22	240	2400	40	45	110	900	30
23	400	2500	35				

Необходимую для выполнения задания информацию смотрите в [2], с. 292 - 293 и с. 288 - 289 или в [1], с. 177- 178.

Задание 4. Оценка влияния анизотропии на результаты ВЭЗ

Предлагается три типа задания. В первом и третьем типах по результатам интерпретации кривых ВЭЗ и данным об анизотропии горных пород необходимо определить истинные мощности слоев. Во втором типе задания предлагается определить значения коэффициентов анизотропии слоев по результатам интерпретации кривых ВЭЗ и данным бурения.

1-й тип

По заданным мощностям h_1 и h_2 двух верхних слоев трехслойного разреза, определенным при интерпретации ВЭЗ ($h_{ВЭЗ}$), и коэффициентам анизотропии λ_1 и λ_2 определить истинные мощности этих слоев. Построить колонки по данным интерпретации ВЭЗ и по исправленным за влияние анизотропии значениям мощности.

2-й тип

По заданным мощностям двух верхних слоев трехслойного разреза, определенным при интерпретации ВЭЗ ($h_{ВЭЗ}$) и истинным мощностям слоев ($h_{ист.}$), полученным по данным бурения, определить коэффициенты анизотропии слоев. Построить колонки для истинных мощностей слоев и мощностей, определенных по ВЭЗ.

3-й тип

По заданным мощностям двух верхних слоев трехслойного разреза с крутым падением сланцеватости, определенным при интерпретации ВЭЗ ($h_{ВЭЗ}$) и кажущемуся коэффициенту анизотропии λ_k определить истинные мощности слоев. Коэффициенты анизотропии всех слоев и углы падения полагать одинаковыми. Построить колонки для истинных мощностей слоев и мощностей, определенных по ВЭЗ.

Таблица 4

Варианты 1-го типа задания 4

Номер вар.	h_1 ВЭЗ	h_2 ВЭЗ	λ_1	λ_2	Номер вар.	h_1 ВЭЗ	h_2 ВЭЗ	λ_1	λ_2
1	25	110	1,3	1,7	25	130	400	1,6	2,3
4	60	300	1,25	1,9	28	90	450	1,3	1,7
7	100	500	1,5	2,0	31	120	500	1,4	1,8
10	150	600	1,4	1,6	34	60	250	1,5	2,5
13	50	250	1,5	2,5	37	100	700	1,8	1,4
16	120	350	1,8	1,3	40	140	800	1,45	1,7
19	80	200	1,3	2,2	43	80	300	1,6	2,4
22	70	150	2,0	1,5	46	150	500	1,8	1,4

Таблица 5

Варианты 2-го типа задания 4

Номер вар.	h_1 ВЭЗ	$h_{1ист}$	h_2 ВЭЗ	$h_{2ист}$	Номер вар.	h_1 ВЭЗ	$h_{1ист}$	h_2 ВЭЗ	$h_{2ист}$
2	25	15	120	80	26	140	100	800	600
5	100	50	500	300	29	120	90	600	400
8	80	60	200	100	32	100	50	500	400

Окончание табл. 5

Номер вар.	h_1 ВЭЗ	$h_{1\text{ист}}$	h_2 ВЭЗ	$h_{2\text{ист}}$	Номер вар.	h_1 ВЭЗ	$h_{1\text{ист}}$	h_2 ВЭЗ	$h_{2\text{ист}}$
11	120	80	400	200	35	80	60	400	200
14	150	100	600	450	38	60	50	300	200
17	60	40	250	100	41	150	120	600	300
20	50	40	300	200	44	120	60	500	400
23	70	50	150	100	47	60	120	700	350

Таблица 6

Варианты 3-го типа задания 4

Номер варианта	h_1 ВЭЗ	h_2 ВЭЗ	λ_k	Номер варианта	h_1 ВЭЗ	h_2 ВЭЗ	λ_k
3	15	30	1,5	27	30	60	2,0
6	20	50	1,8	30	25	150	2,5
9	16	20	2,0	33	17	85	1,7
12	10	20	1,25	36	20	40	2,0
15	12	25	1,5	39	16	32	1,6
18	14	60	2,0	42	18	54	1,8
21	18	90	1,8	45	10	30	2,0
24	13	65	1,3	48	14	70	1,4

Необходимую для выполнения задания информацию смотрите в [2], с. 294 - 296 или в [3], с. 173 - 174 (1-й и 2-й типы).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Матвеев, Б. К.* Электроразведка: учебн. для вузов. – 2-е изд., перераб.и доп. *Б. К. Матвеев.* –М.: Недра, 1990. - 368 с.
2. *Редозубов, А. А.* Электроразведка. Часть 1. Электроразведка постоянным током. Поляризационные методы электроразведки: учебное пособие. *А. А. Редозубов.* – Екатеринбург: УГГГА, 2004. - 327 с.
3. *Якубовский, Ю. В., Ренард И. В.* Электроразведка: учебн. для вузов. – 3-е изд., прераб. и доп. *Ю. В Якубовский., И. В. Ренард*– М.: Недра, 1991. - 359 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Задание 1. Оценка интенсивности аномалий естественного поля фильтрационной природы.....	3
Задание 2. Расчет и сопоставление интенсивности аномалий η_k над изо- метричными объектами при поверхностной и объемной поляризации.....	5
Задание 3. Расчет кажущегося сопротивления на поверхности анизотропной среды.	7
Задание 4. Оценка влияния анизотропии на результаты ВЭЗ.	9
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	12

Авенир Александрович Редозубов
Гульшат Ахметовна Косарева

Методическое руководство
по выполнению индивидуальных заданий
по курсу «Электроразведка»
для студентов специальности 21.05.03 Технологии геологической
разведки специализации Геофизические методы поисков и разведки
месторождений полезных ископаемых (РФ)
часть 2

Корректурa кафедры геофизики

Подписано в печать
Бумага писчая. Формат бумаги 60x84 1/16. Печать на ризографе.
Печ.л. ____ Уч.-изд.л. ____ Тираж ____ экз. Заказ №

издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30.
Уральский государственный горный университет



Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования
«Уральский государственный горный
университет»

А. А. Редозубов, Г. А. Косарева

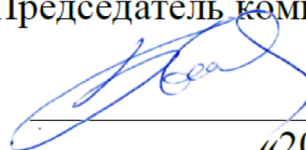
ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА

Часть 3

*Методическое руководство
по выполнению индивидуальных заданий
по курсу «Электроразведка»
для студентов специальности
21.05.03 Технологии геологической разведки
специализации Геофизические методы поисков и разведки
месторождений полезных ископаемых (РФ)*

**Екатеринбург
2020**

ОДОБРЕНО
методической комиссией
факультета геологии и геофизики
Председатель комиссии



В. И. Бондарев
«20» марта 2020 г.

А. А. Редозубов, Г. А. Косарева

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА

Часть 3

*Методическое руководство
по выполнению индивидуальных заданий
по курсу «Электроразведка» для студентов
специальности 21.05.03 Технологии геологической разведки
специализации Геофизические методы поисков и разведки
месторождений полезных ископаемых (РФ)*

Рецензент: *В. Е. Петряев*, канд. геол.-мин. наук, доцент
кафедры геофизики УГГУ

Методическое руководство рассмотрено на заседании кафедры и рекомендовано к изданию в УГГУ.

Редозубов А. А., Косарева Г. А.

Р33 ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА. Часть 3: *Редозубов А. А., Косарева Г. А.*
Методическое руководство по выполнению индивидуальных заданий по курсу «Электроразведка» для студентов специальности 21.05.03 Технологии геологической разведки специализации Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых (РФ).

Методическое руководство содержит необходимые указания по выполнению индивидуальных домашних заданий, соответствующих программе дисциплины «Электроразведка» для студентов специальности 21.05.03 Технологии геологической разведки специализации Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых (РФ). Исходные данные к заданиям включены в руководство.

Задание 1. Оценка поглощения энергии и длины волны электромагнитного поля в квазипроводниках

Условия распространения переменного электромагнитного поля в среде определяются комплексной величиной, называемой волновым числом. Волновое число зависит от физических свойств среды и частоты поля. Оно определяется выражением

$$k = \omega \sqrt{\mu \dot{\epsilon}} = \omega \sqrt{\mu \left(\epsilon + i \frac{\gamma}{\omega} \right)} = a + ib, \quad (1.1)$$

где $\omega = 2\pi f$ - угловая частота;

μ - абсолютная магнитная проницаемость среды;

γ - удельная электропроводность среды;

$\dot{\epsilon} = \epsilon + i \frac{\gamma}{\omega}$ - комплексная диэлектрическая проницаемость.

Вещественная a и мнимая b части волнового числа имеют определенный физический смысл. Вещественная часть волнового числа определяет длину волны и скорость распространения поля в среде, от мнимой части зависит поглощение энергии поля средой и, следовательно, скорость затухания поля при удалении от источника.

Поглощение энергии электромагнитного поля средой происходит вследствие тепловых потерь вихревых токов, индуцированных магнитной составляющей поля. Мнимая часть волнового числа представляет собой коэффициент поглощения, которое происходит по закону e^{-br} (r – расстояние, e – основание натурального логарифма). Из-за поглощения энергии средой при удалении от источника поле затухает в e^{br} раз быстрее, чем это происходит только из-за геометрического фактора рассеивания энергии (как происходит в поле постоянного тока). Единицей измерения коэффициента поглощения является непер деленный на метр (Нп/м).

В зависимости от коэффициента поглощения находится глубина

проникновения поля в землю. Для её характеристики введен параметр $\delta = \frac{1}{b}$, называемый глубиной проникновения или толщиной скин-слоя. Он равен мощности слоя, в котором за счёт поглощения энергии поле ослабляется в e раз.

Комплексная диэлектрическая проницаемость $\hat{\epsilon}$ характеризует способность среды пропускать как токи проводимости, так и токи смещения. Вещественная часть комплексной диэлектрической проницаемости ϵ определяет способность среды пропускать токи смещения, мнимая часть γ/ω – токи проводимости. От соотношения этих частей зависит соотношение между токами смещения и токами проводимости. Если $\epsilon \gg \gamma/\omega$, мнимой частью комплексной диэлектрической проницаемости можно пренебречь, полагая $\hat{\epsilon} \approx \epsilon$. Это означает пренебрежение токами проводимости, которые в данном случае очень малы и, следовательно, в среде практически существуют только токи смещения. Такие среды называются *квазидиэлектриками*. Так как при протекании тока смещения тепловых потерь нет, в квазидиэлектриках коэффициент поглощения можно полагать равным нулю. Типичным квазидиэлектриком является воздух.

Если $\epsilon \ll \gamma/\omega$, можно пренебречь вещественной частью $\hat{\epsilon}$, полагая таким образом, что в среде существует только токи проводимости. Такие среды называются *квазипроводниками*. Так как мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости зависит от частоты поля, одна и та же среда, в зависимости от частоты, может быть или квазипроводником, или квазидиэлектриком, или занимать промежуточное положение между этими крайними случаями. В звуковом диапазоне частот практически все горные породы являются квазипроводниками.

Задание

1. Пользуясь общим выражением волнового числа формула (1.1), найти выражения вещественной и мнимой частей волнового числа для квазипроводника.

2. Для заданных значений электромагнитных параметров среды и частоты найти коэффициенты поглощения.

3. Определить, во сколько раз на заданном расстоянии r из-за поглощения энергии средой поле затухает быстрее по сравнению со случаем, когда затухание происходит только за счёт геометрического рассеяния энергии.

4. Определить глубину проникновения поля (толщину скин-слоя).

5. Рассчитать длину волны и скорость распространения поля. Сравнить их со случаем, когда поле распространяется в вакууме (воздухе).

6. Сделать вывод, как зависят рассчитанные величины от удельного сопротивления среды и частоты поля.

Литература по теме задания: [1], с. 8 – 12; [3], с. 52 – 56.

Таблица 1

Исходные данные к заданию

Номер вар.	ρ , Ом·м	f , Гц	r , м	Номер вар.	ρ , Ом·м	f , Гц	r , м	Номер вар.	ρ , Ом·м	f , Гц	r , м
1	100	156 4,8	100	8	2000 20	625 2,4	100	15	40	625 4,8	100
2	10	78 0,1	100	9	200 5	78	75	16	30	625 4,8	100
3	500 10	312	50	10	250 5	0,1	100	17	500 10	625	100
4	1000 10	625	150	11	5	156 0,3	50	18	750	321 9,8	150
5	20	156 9,8	50	12	250	625 0,6	100	19	1000 10	156	100
6	150	312 1,2	50	13	300 12	78	100	20	100	312 0,3	200
7	50	156 1,2	25	14	2500 20	312	200	21	20	78 1,2	100

Номер вар.	ρ , Ом·м	f , Гц	r , м	Номер вар.	ρ , Ом·м	f , Гц	r , м	Номер вар.	ρ , Ом·м	f , Гц	r , м
22	1500 15	156	150	31	250 4	19,5	100	40	3	78 0,6	50
23	1500 7	312	100	32	45	312 0,6	70	41	4	125 0,6	75
24	10	39 0,3	150	33	25	625 2,4	100	42	12	312 0,3	100
25	5	78 0,15	100	34	200 4	156	150	43	900 9	156	100
26	800 8	125	200	35	750 3	312	100	44	1200 12	625	100
27	1200 5	125	200	36	4	78 0,3	100	45	60	1250 4,8	100
28	30	156 9,8	100	37	7	125 0,1	50	46	25	312 4,8	50
29	10	312 0,3	100	38	800 4	156	100	47	1000 6	78	100
30	1500 10	1250	100	39	75 3	125	50	48	1200 3	125	100

Примечание. Принять магнитную проницаемость среды $\mu=\mu_0$.

Задание 2. Построение и интерпретация кривой магнитотеллурического зондирования

В магнитотеллурическом зондировании (МТЗ) изучается естественное переменное электромагнитное поле. Магнитную компоненту образуют вариации магнитного поля Земли. Электрическую компоненту образуют индуцированные магнитными вариациями вихревые токи. В качестве фундаментальной модели, на которой основывается интерпретация результатов

МТЗ, принимается модель Тихонова – Каньяра. В этой модели магнитотеллурическое поле аппроксимируется плоской волной, распространяющейся вертикально сверху вниз, а геоэлектрический разрез полагается горизонтально-слоистым.

Глубина проникновения поля в землю зависит от его частоты. Поэтому, выполняя измерения при разных частотах, можно получить информацию об электрических свойствах горных пород на различной глубине, аналогично тому, как это делается при электрическом зондировании на постоянном токе. Только в отличие от зондирования на постоянном токе, где глубина исследования зависит от размера установки, в МТЗ параметром, контролирующим глубину исследования, является частота (период) вариаций. Практически, чтобы получить результаты измерений при разных периодах вариаций, производят непрерывную регистрацию поля в течение некоторого времени, обычно несколько часов.

Так как интенсивность магнитотеллурического поля непрерывно меняется, чтобы исключить влияние колебаний уровня поля измеряют обе компоненты – электрическую и магнитную, а затем вычисляют их отношение, называемое *импедансом*:

$$\dot{Z} = \frac{\dot{E}}{\dot{H}}, \quad (2.1)$$

где $\dot{E}$ – напряженность электрического поля;

$\dot{H}$ – напряженность магнитного поля.

По измеренному значению импеданса рассчитывают кажущееся сопротивление, которое в МТЗ обозначают символом ρ_T . Импеданс, как и напряженности компонент поля, комплексная величина. Для вычисления кажущегося сопротивления можно использовать модуль импеданса или его фазу. *Фаза импеданса* – это разность фаз напряженностей электрического и магнитного полей.

Измерение напряженности электрического поля производят с помощью двух взаимно перпендикулярных заземленных приемных линий. Для измерения напряженности магнитного поля используют два магнитометра, измеряющих горизонтальную составляющую. Ориентировка магнитометров должна совпадать с ориентировкой приемных линий. Такая методика позволяет определить величину и направление напряженности в любой момент времени.

Вычисления кажущегося сопротивления по амплитудным значениям E и H производится по формуле

$$\rho_T = 0,2T|\dot{Z}|^2. \quad (2.2)$$

Для вычисления импеданса по этой формуле напряженность электрического поля E выражают в мВ/км, напряженность магнитного поля – в нанотеслах. Так как кроме горизонтальной слоистости обычно существует и неоднородность среды в горизонтальном направлении, модуль импеданса зависит от ориентировки поля в момент измерения. Поэтому при вычислении ρ_T обычно используют эффективный импеданс $|\dot{Z}_{\text{эф.}}|$, имеющий смысл среднего геометрического значения модуля импеданса для различных ориентировок поля.

По вычисленным значениям ρ_T строят кривую зондирования в логарифмическом масштабе. По оси абсцисс откладывают $\sqrt{T}$, по оси ординат – ρ_T . Построение кривой МТЗ, как зависимости ρ_T от $\sqrt{T}$, а не от T , вызвано тем, что глубина исследования пропорционально $\sqrt{T}$ (см. [1, с. 29]). Кривые МТЗ качественно имеют вид, подобный кривым ВЭЗ, и образуют те же типы. Их интерпретация в принципе также аналогична интерпретации кривых ВЭЗ. Отличием от кривых зондирования на постоянном токе является наличие интерференционного экстремума в начальной части кривых (если измерения выполнены начиная с достаточно малых периодов). Если опорный горизонт имеет очень большое сопротивление, кривые МТЗ также входят на прямолинейную асимптоту. Только асимптота кривых МТЗ в этом случае образует с осью $\sqrt{T}$ угол $63^\circ 25'$, а не 45° , как у кривых ВЭЗ.

В случае высокого сопротивления опорного горизонта по асимптоте кривой зондирования можно определить суммарную продольную проводимость S надпорной толщи. Для этого асимптота продолжается до оси $\sqrt{T}$ и при $\rho_T = 1$ Ом·м определяется координата точки пересечения асимптоты с осью $\sqrt{T_s^{(1)}}$ (рис. 2.1). Продольная проводимость разреза

$$S = 356 \sqrt{T_s^{(1)}}. \quad (2.3)$$

Величину $\sqrt{T_s}$ можно определить и при любом другом значении ρ_T . Например, если она определена при $\rho_T = 10$ Ом·м ($\sqrt{T_s^{(10)}}$), продольная проводимость надпорной толщи

$$S = 114 \sqrt{T_s^{(10)}}. \quad (2.4)$$

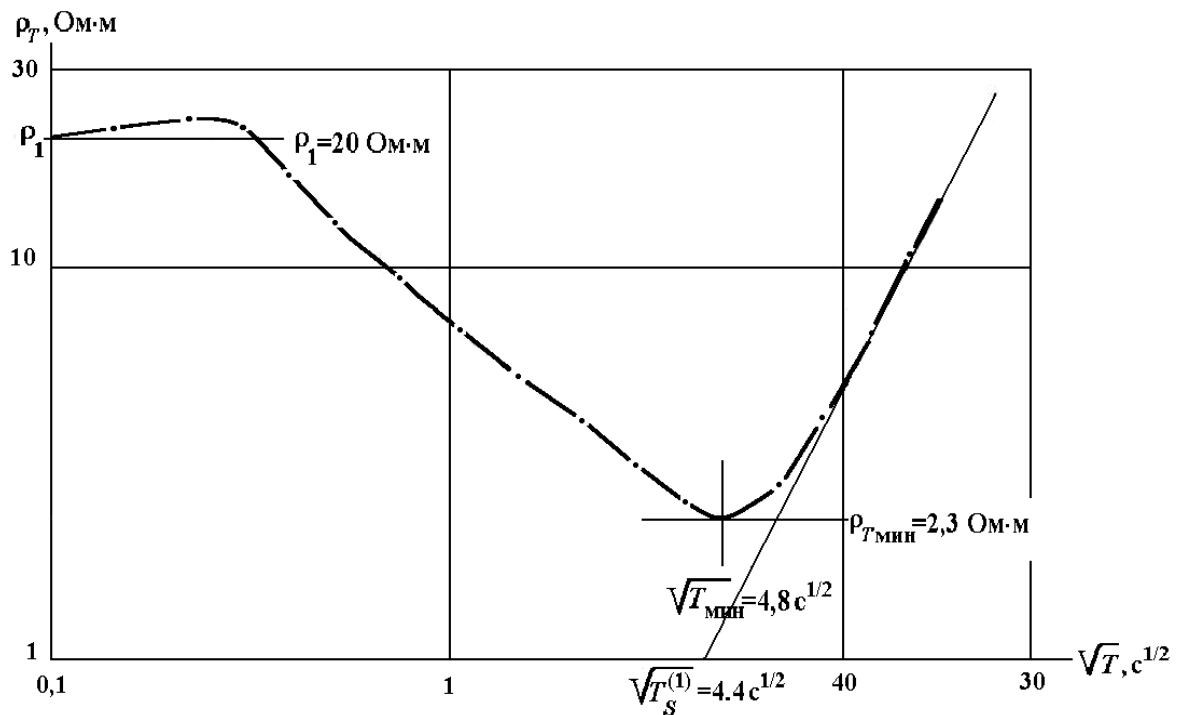


Рис. 2.1. Пример кривой МТЗ для разреза с бесконечно большим сопротивлением нижнего слоя

Когда кривая МТЗ имеет четко выраженный минимум и его координаты определяются достаточно точно, приближенное значение S можно найти по формуле

$$S \approx 520 \sqrt{T_{\min} / \rho_{T\min}}, \quad (2.5)$$

где $T_{\min}$ и $\rho_{T\min}$ – значения T и ρ_T в точке минимума.

Этот способ дает удовлетворительные результаты, если относительное влияние вышележащих слоев на область минимума кривой небольшое и координаты точки минимума определяются главным образом параметрами проводящего слоя. Такие условия существуют, когда мощность проводящего слоя значительно превышает мощность вышележащей толщи, и в этой толще нет слоев с высоким удельным сопротивлением. При получении значительной разницы между значениями S , полученными двумя способами, предпочтение следует отдавать способу определения S по асимптоте, как более точному.

Если есть данные о среднем продольном удельном сопротивлении надпорной толщи $\rho_{t\text{ ср}}$, можно от продольной проводимости перейти к глубине до опорного горизонта:

$$H = \rho_{t\text{ ср}} \cdot S. \quad (2.6)$$

Когда мощность хорошо проводящего слоя достаточно велика, за приближенное значение $\rho_{t\text{ ср}}$ можно принять величину ρ_T в точке минимума. Конечно, точность определения глубины до опорного горизонта в этом случае будет ниже. Погрешность определения H будет тем больше, чем меньше относительная мощность проводящего слоя. Большая разница значений S , полученных двумя способами, как уже указывалось, свидетельствует о сильном влиянии на кривую в области минимума вышележащих пород. Очевидно, в этом случае использовать значение ρ_T в точке минимума для оценки глубины до опорного горизонта не следует.

Рассмотрим интерпретацию кривой МТЗ, приведенной на рис. 2.1. Кривая четырехслойная типа QH. Начальная асимптота кривой $\rho_T = 20$ Ом·м определяет удельное сопротивление первого слоя. Конечная асимптота наклонена под углом $63,5^\circ$, что указывает на весьма большое, практически бесконечное удельное сопротивление нижнего слоя (опорного горизонта). Асимптота к конечной ветви кривой пересекает ось периодов при $\rho_T = 1$ Ом·м в

точке с координатой $\sqrt{T_s^{(1)}} = 4,4c^{1/2}$. Следовательно, продольная проводимость надпорной толщи

$$S = 356 \sqrt{T_s^{(1)}} = 356 \cdot 4,4 = 1566 \text{ См.}$$

Кривая имеет четкий минимум с координатами $\sqrt{T_{\text{мин}}} = 4,8c^{1/2}$ и $\rho_{T\text{мин}} = 2,3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Продольная проводимость, определенная по координатам точки минимума кривой МТЗ

$$S = 520 \sqrt{T_{\text{мин}} / \rho_{T\text{мин}}} = 520 \frac{4,8}{\sqrt{2,3}} = 1646 \text{ См.}$$

Таким образом, в рассматриваемом случае разница в определении S двумя способами составляет 5,1 %.

Приняв значение ρ_T в точке минимума за среднее продольное удельное сопротивление надпорной толщи, оценим глубину залегания опорного горизонта:

$$H = \rho_{T\text{ср}} \cdot S \approx \rho_{T\text{мин}} \cdot S = 2,3 \cdot 1566 = 3660 \text{ м.}$$

Задание

1. По заданным значениям $|Z_{\text{эф}}|$ рассчитать значения кажущегося сопротивления ρ_T .

2. Построить кривую МТЗ в логарифмическом масштабе со стандартным модулем (62,5 мм). Определить тип кривой МТЗ. Определить удельное сопротивление верхнего и нижнего слоев разреза. Объяснить причину появления небольшого экстремума при малых значениях периода.

3. Провести асимптоту к конечной ветви кривой МТЗ и определить координату её пересечения с осью периодов при $\rho_T = 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ или $\rho_T = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Найти продольную проводимость надпорной толщи. Проводить асимптоту необходимо возможно точнее, так как от этого зависит точность определения S . Лучше всего угол $63^\circ 25'$ строить по его тангенсу, который равен 2.

4. Определить S по $\rho_{T_{\min}}$ и $T_{\min}$ и сравнить со значением, полученным по асимптоте. Оценить относительное расхождение результатов, полученных этими двумя способами.

5. Оценить примерную глубину до опорного горизонта, приняв за $\rho_{\text{ср}}$ значение ρ_T в точке минимума.

Литература по теме задания: [1], с. 36, с. 42 - 43.

Задание 3. Приближенное построение аномалии от проводящего объекта в индуктивных методах

В низкочастотных индуктивных методах измеряется э. д. с, наведенная в приемном контуре (петле значительных размеров или небольшой многовитковой рамке) переменным магнитным полем. Магнитное поле создается током, пропускаемым по другому контуру, – генераторному. Поле, создаваемое током в генераторном контуре, называется *первичным* (H_1). Если в объеме, в котором возбуждено первичное поле, находится проводящий объект, в нем возбуждается вихревой ток, создающий вторичное поле (H_2). Отклонения от первичного поля представляют собой аномалии, по которым можно установить наличие объектов. Такие аномалии называются *вихревыми*. Они имеют наибольшее значение в рудной электроразведке. Кроме вихревых, существуют и другие типы аномалий (см. [2, с. 5 - 7]). Результаты низкочастотных методов представляют в виде отношения H_2/H_1 , представляющего собой не что иное, как относительную интенсивность аномалии. Обычно эту величину измеряют в процентах.

Рассмотрим механизм формирования вихревой аномалии на примере наклонного проводящего пласта в однородном первичном магнитном поле H_1 . Пусть верхняя кромка пласта располагается на глубине h_1 . Длина пласта по падению d равна $3,6h_1$, угол наклона 34° . Тогда нижняя кромка пласта

располагается на глубине $h_2=3h_1$. Первичное поле H_1 ориентируем вертикально, в рассматриваемый момент времени снизу вверх (рис. 3.1). Практически близкое к однородному вертикальное первичное поле создается в средней части генераторной петли, лежащей на поверхности земли.

В проводящем пласте первичное поле возбуждает вихревой ток. Так как мощность пласта мала, вихревой ток растекается в плоскости пласта. В первом приближении вихревые токи в пласте можно аппроксимировать двумя линейными токами, текущими вдоль кромок пласта. Направление токов

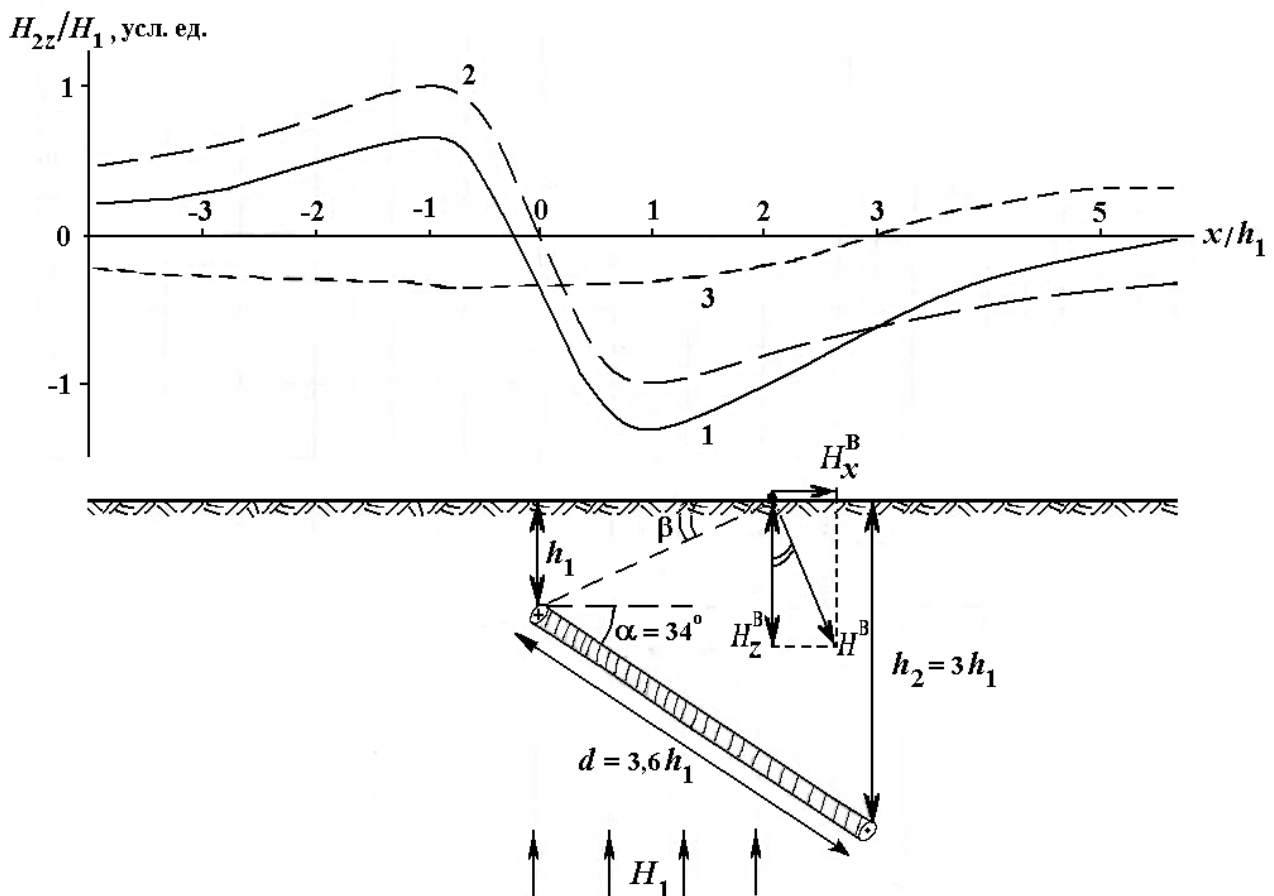


Рис. 3.1. Пример приближенного построения графика над H_{2z} над наклонным пластом:

1 – график H_{2z} от пласта; 2 – график H_z^B от верхнего линейного тока;

3 – то же от нижнего линейного тока

определяется по правилу левого винта. В нашем случае вдоль верхней кромки пласта ток течет от нас, вдоль нижней кромки – к нам. Полагая, что по простиранию длина пласта достаточно велика, можно пренебречь влиянием токов, текущих вдоль боковых кромок и рассматривать аномалию от пласта,

как сумму полей от линейных токов, совмещенных с верхней и нижней кромками.

По закону Био - Савара магнитное поле длинного линейного тока описывается уравнением $H=I/r$, где I – сила тока, r – расстояние от тока до точки наблюдений. Полагая $I=1$, в нашем случае напряженность магнитного поля тока, текущего по верхней кромке пласта, $H^B = 1/\sqrt{x^2 + h_1^2}$. По правилу правого винта поле ориентировано по направлению движения часовой стрелки, т. е. справа от верхней кромки пласта сверху вниз, слева – снизу вверх. Вертикальная компонента поля верхнего тока

$$H_z^B = H^B \cos\beta = H^B \frac{x}{\sqrt{x^2 + h_1^2}} = \frac{x}{x^2 + h_1^2}, \quad (3.1)$$

где β – угол между направлением из точки наблюдений на верхнюю кромку пласта и горизонталью (см. рис. 3.1). График H_z^B переходит через нуль над верхней кромкой пласта и имеет экстремумы, отстоящие от точки перехода через нуль на расстояние, равное h_1 . Таким же образом можно построить график напряженности магнитного поля тока, текущего по нижней кромке пласта. При этом надо учесть, что глубина до этого тока h_2 в нашем примере в 3 раза больше. Соответственно, в это же число раз уменьшается и напряженность поля. Изменяется и направление поля, так как ток вдоль нижней кромки пласта имеет противоположное направление (см. рис. 3.1).

Просуммировав напряженности магнитного поля верхнего и нижнего токов, получим график напряженности вторичного поля от пласта. Для наклонного пласта аномалия H_{2z} знакопеременная, с переходом через нуль, смещенным относительно верхней кромки в сторону восстания пласта. Над пластом аномалия отрицательная, со стороны восстания пласта – положительная, имеющая меньшую интенсивность (см. рис. 3.1).

Таким же образом можно найти вид аномалии горизонтальной составляющей поля H_{2x} , а также для случая горизонтальной или наклонной ориентировки первичного поля.

В методе переходных процессов, в котором изучается неустановившееся поле, возбужденное импульсом постоянного тока в генераторной петле, аномалия имеет точно такой же вид, но имеет противоположный знак (см. [2, с. 76 -77]). Поэтому для построения графиков э. д. с. $\mathcal{E}$, индуцированной в приемной рамке, можно воспользоваться рассмотренным приемом, изменив только направление линейных токов в кромках пласта.

Задание

1. Аппроксимировать вихревые токи, возбужденные в проводящем пласте с заданными параметрами, двумя линейными токами, протекающими вдоль верхней и нижней кромок пласта. Определить направление токов при заданном направлении первичного поля.

2. Рассчитать вертикальные и горизонтальные составляющие напряженности магнитного поля линейных токов. Построить графики H_z и H_x линейных токов.

3. Построить графики для вертикальной и горизонтальной составляющих аномалии от пласта, выполнив графическим способом сложение полей от линейных токов. При построении графиков H_2/H_1 принять первичное поле $H_1=1$. Под графиками показать модель, для которой выполняется расчет, указав направление линейных токов.

4. Построить графики э. д. с., индуцированной в приемной рамке в методе переходных процессов. Для этого надо только изменить направление линейных токов и, соответственно, изменить знак аномалии.

5. Описать вид графиков для низкочастотного и неустановившегося поля, отметив их характерные особенности.

Литература по теме задания: [2, с. 5 – 7, с. 9 – 14, с. 45, с. 48, с. 76 - 77].

Таблица 3

Исходные данные к заданию

Номер вар.	h_1 , м	d , м	α°	Ориентир. H_1	Номер вар.	h_1 , м	d , м	α°	Ориентир. H_1
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	20	80	20	Вертик.	6	100	500	40	Горизонт.
2	20	80	20	Горизонт.	7	20	80	30	Вертик.
3	50	200	30	Вертик.	8	20	80	30	Горизонт.
4	50	200	30	Горизонт.	9	50	200	40	Вертик.
5	100	500	40	Вертик.	10	50	200	40	Горизонт.
11	100	500	50	Вертик.	30	30	150	20	Горизонт.
12	100	500	50	Горизонт.	31	100	600	40	Вертик.
13	30	150	30	Вертик.	32	100	600	40	Горизонт.
14	30	150	30	Горизонт.	33	40	200	20	Вертик.
15	50	250	20	Вертик.	34	40	200	20	Горизонт.
16	50	250	20	Горизонт.	35	50	300	60	Вертик.
17	100	800	20	Вертик.	36	50	300	60	Горизонт.
18	100	800	20	Горизонт.	37	40	300	40	Вертик.
19	20	150	60	Вертик.	38	40	300	40	Горизонт.
20	20	150	60	Горизонт.	39	60	250	45	Вертик.
21	50	200	45	Вертик.	40	60	250	45	Горизонт.
22	50	200	45	Горизонт.	41	75	300	30	Вертик.
23	100	500	30	Вертик.	42	75	300	30	Горизонт.
24	100	500	30	Горизонт.	43	40	250	45	Вертик.
25	30	200	45	Вертик.	44	40	250	45	Горизонт.
26	30	200	45	Горизонт.	45	75	250	25	Вертик.
27	40	250	30	Вертик.	46	75	250	25	Горизонт.
28	40	250	30	Горизонт.	47	60	300	25	Вертик.
29	30	150	20	Вертик.	48	60	300	25	Горизонт.

Задание 4. Определение условий применения дистанционного индукционного зондирования

Изменение глубины исследования в дистанционных индукционных зондированиях достигается путем изменения расстояния между источником поля и точкой измерения, так же, как при зондированиях на постоянном токе. Измерения при всех размерах установки выполняются на одной частоте. Преимуществом индукционных зондирований является возможность изучения разреза под экранами. Кроме того, так как измерение поля выполняется индуктивным способом, отпадает необходимость устройства заземлений. Последнее важно при сложных условиях заземления (мерзлота, лед, асфальтовые и бетонные покрытия, каменные осыпи). Способ возбуждения может быть любым, но обычно используется тоже индуктивный способ.

Максимальный размер установки должен быть таким, чтобы обеспечивалась необходимая глубина исследования. Обычно он должен быть в 4–6 раз больше глубины до опорного горизонта. Частота поля должна быть такой, чтобы при самом большом разnose соблюдались условия ближней зоны, так как за её пределами дистанционное зондирование невозможно. В качестве условия ближней зоны в дистанционном зондировании принимают соотношение

$$r \leq 0,1\lambda \approx 316\sqrt{\rho_{\text{ср}}/f}, \quad (4.1)$$

где $\rho_{\text{ср}}$ – среднее удельное сопротивление надпорной толщи.

Воспользовавшись этим соотношением можно определить максимальную допустимую частоту при заданном размере установки или максимальный размер установки, допустимый при заданной частоте.

Задание

1. Определить необходимый максимальный размер установки для проведения дистанционных индукционных зондирований в заданных геоэлек-

трических условиях.

2. а) определить максимальную частоту, при которой возможны дистанционные зондирования при этих условиях; б) определить максимальную глубину, до которой возможно изучение разреза при заданной частоте.

Литература по теме задания: [1], с. 75 - 77; [3], с. 283 - 284.

Таблица 4

Исходные данные к заданию

Номер вар.	H , м	ρ , Ом·м	f , Гц	Номер вар.	H , м	ρ , Ом·м	f , Гц	Номер вар.	H , м	ρ , Ом·м	f , Гц
1 а б	25	40	-	2 а б	30	25	- 78	3 а б	25	10	- 125
4 а б	50	75	- 625	5 а б	45	50	- 375	6 а б	20	80	- 125
7 а б	100	250	- 1125	8 а б	80	120	- 625	9 а б	40	25	- 225
10 а б	60	90	- 1250	11 а б	20	50	- 125	12 а б	15	75	- 375
13 а б	75	50	- 375	14 а б	30	45	- 78	15 а б	35	50	-
16 а б	25	35	- 78	17 а б	30	65	- 125	18 а б	50	120	- 1125
19 а б	30	450	- 375	20 а б	40	1500	- 1125	21 а б	35	90	- 78
22 а б	30	85	-	23 а б	45	110	- 2500	24 а б	15	50	- 312
25 а б	20	800	- 640	26 а б	70	55	- 640	27 а б	65	180	- 1280
28 а б	15	65	- 312	29 а б	25	120	- 78	30 а б	55	85	- 1280
31 а б	20	65	- 156	32 а б	55	70	- 640	33 а б	80	650	- 2500
34 а б	60	160	- 1280	35 а б	20	25	- 78	36 а б	30	15	- 640
37 а б	15	10	- 78	38 а б	25	20	- 640	39 а б	40	65	- 1280
40 а б	40	180	- 78	41 а б	50	60	- 640	42 а б	70	120	- 1280
43 а б	65	120	- 2500	44 а б	35	30	- 640	45 а б	45	40	- 312
46 а б	35	40	- 1125	47 а б	50	800	- 312	48 а б	15	15	- 78

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Редозубов, А. А.* Конспект лекций по электроразведке переменным током. Часть 1. Общие сведения о переменных электромагнитных полях. Магнитотеллурические методы и электромагнитные зондирования: учебное пособие. *А. А. Редозубов.* Екатеринбург: Издательство Уральской государственной горно-геологической академии, 1997. - 94 с.

2. *Редозубов, А. А.* Конспект лекций по электроразведке переменным током. Часть 2. Индуктивные методы электроразведки: учебное пособие. *А. А. Редозубов.* Екатеринбург: Издательство Уральской государственной горно-геологической академии, 1999. - 106 с.

3. *Якубовский, Ю. В., Ренард, И. В.* Электроразведка: учебник для вузов. 3-е изд., прераб. и доп. *Ю. В. Якубовский, И. В. Ренард.* М.: Недра, 1991. - 359 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Задание 1. Оценка поглощения энергии и длины волны электромагнитного поля в квазипроводниках	3
Задание 2. Построение и интерпретация кривой магнитотеллурического зондирования	6
Задание 3. Приближенное построение аномалии от проводящего объекта в индуктивных методах	12
Задание 4. Определение условий применения дистанционного индукционного зондирования	17
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	19

Авенир Александрович Редозубов
Гульшат Ахметовна Косарева

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА

Часть 2

Методическое руководство
по выполнению индивидуальных заданий
по курсу «Электроразведка»
для студентов специальности 21.05.03 Технологии геологической разведки
специализации Геофизические методы поисков и разведки месторождений
полезных ископаемых (РФ)

Редактор В. В. Баклаева

Подписано в печать
Бумага писчая. Формат бумаги 60x84 1/16.
Гарнитура Times New Roman Печать на ризографе.
Печ. л. Уч.-изд. л. Тираж экз. Заказ №

Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30.
Уральский государственный горный университет
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА
ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ГРАВИРАЗВЕДКА»**

специальность

21.05.03 Технология геологической разведки

Специализация № 1

***Геофизические методы поиска и разведки
месторождений полезных ископаемых***

форма обучения: очная, заочная

Автор: Виноградов В.Б.

Одобрена на заседании кафедры

Геофизики

(название кафедры)

Зав.кафедрой

Талалай А. Г.

(Фамилия И.О.)

Протокол № 1 от 01.09.2022

(Дата)

Рассмотрена методической комиссией
факультета

Геологии и геофизики

(название факультета)

Председатель

Бондарев В.И.

(Фамилия И.О.)

Протокол № 1 от 13.09.2022

(Дата)

Екатеринбург
2022

На составление курсового проекта отводится **4 недели**.

Консультации еженедельно для всей группы по сетке расписания и по 4 человека в день на неделю в одно согласованное время для всех 4 студентов

1 неделя. Выдача задания. Сбор материалов. В библиотеке необходимо взять литературу, указанную в задании.

Написание геологического задания.

Написание физико-географического раздела по БРЭ или иным источником с кратким описанием экономики и освоенности территории с приложением обзорной карты района.

Составление раздела «Геологическая характеристика».

2 неделя. Анализ работ прошлых лет. Истолкование аномалий.

Составление раздела «Геофизическая характеристика».

Решение прямых задач.

Создание ФГМ.

3 неделя Написание раздела «Методика полевых работ». Гравиметр только CG-5 или CG-6.

4 неделя Составление раздела «Камеральные работы».

Написание раздела «Обработка и истолкование результатов измерений».

Вычисление физических объемов и сроков проведения работ.

СРОК СДАЧИ КУРСОВОГО ПРОЕКТА 5 неделя (не позднее пятницы). В субботу

5 недели ЗАЩИТА КУРСОВОГО ПРОЕКТА. Без защиты курсовой проект не оценивается.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА ПО ДИСЦИПЛИНАМ «ГРАВИРАЗВЕДКА»

Курсовой проект составляется в соответствии с принятым в производственных геолого-геофизических организациях «Макетом проекта на общие (детальные) поиски твердых полезных ископаемых» [10]. В данных методических указаниях, сохраняя нумерацию и название разделов «Макета...», рассматривается содержание лишь тех разделов, которые необходимы для написания курсового проекта.

Для выполнения курсового проекта необходимо проработать рекомендуемую литературу по геологическому строению района проектируемых работ, физическим свойствам горных пород и руд, а также по методике и технике гравirazведочных работ и камеральной обработке результатов измерений гравитационного поля [3. 4. 5 и др.].

1. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

1.1 Целевое назначение работ, пространственные границы объекта, основные оценочные параметры.

Пример. Общие поиски железорудных месторождений в пределах Масловско-Ауэрбаховской зоны на участке южного замыкания Ауэрбаховского интрузива. Площадь исследований 60 кв. км.

Оценочные параметры - получение кондиционных карт поля силы тяжести масштаба 1:10000 и оценка площади на выявление промышленных месторождений до глубины 300 м.

1.2 Геологические задачи, последовательность и основные методы их решения.

Пример. Изучение перспектив площади на обнаружение скрытого магнетитового оруденения на участках южного продолжения Ауэрбаховского рудоконтролирующего разлома.

На участке площадью 60 кв. км. (10×6 км) выполнить площадную гравиметрическую съемку масштаба 1:10000.

1.3 Ожидаемые результаты и сроки выполнения работ (с указанием форм отчетной документации).

Пример. По результатам гравиметрической съемки будут выделены перспективные на магнетитовое оруденение участки, определяются места заложения поисковых скважин (или даются рекомендации на проведение поисково-разведочных работ).

По результатам проведенных работ будет составлен геологический отчет. К тексту отчета будут приложены карты силы тяжести в редукции Буге (с указанием масштаба, плотности промежуточного слоя, сечением изоаномал), схематические геолого-геофизические разрезы по профилям, пересекающим перспективные аномалии, объемная плотностная модель, ее геологическое истолкование.

1. ГЕОГРАФО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ

Указывается административное положение района работ. Приводится краткая характеристика рельефа, климата, растительного и животного мира, населенности и путей сообщения, возможности найма рабочей силы на месте или их найма в другом районе. Приводится обзорная карта района работ с нанесением участка полевых работ. Определяется категория трудности местности для проведения геофизических и топогеодезических работ (прил.1).

В курсовом проекте этот раздел составляется по литературным источникам, которые указываются в задании.

4. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ И ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА

4.1. Геологическая характеристика

Указывается геолого-структурное положение района проектируемых работ.

Пример. В структурном плане район работ расположен в пределах восточного крыла Тагильского мегасинклинория в Турьинской структурно-фациальной зоне.

Данный раздел содержит подразделы: “Стратиграфия”, “Магматизм”, “Тектоника”, “Геоморфология и гидрогеология”, “Полезные ископаемые”. В них приводятся краткие сведения по стратиграфии с указанием состава пород и их мощности, сведения об интрузивных образованиях, тектонике. Подробно описываются рудовмещающие комплексы, гидротермальные и метасоматические процессы, отмечаются рудоконтролирующие факторы. Особо отмечаются процессы метаморфизма, которые обуславливают изменение физических свойств горных пород.

В подразделе «Полезные ископаемые» приводится характеристика месторождений и рудопроявлений всех полезных ископаемых, встреченных в данном районе работ, отмечается их приуроченность к определенным комплексам пород, структурно-тектоническим и металлогеническим зонам. Выделяются полезные ископаемые, на которые площадь проектируемых работ является наиболее перспективной, и более подробно описываются месторождения, типичные для этого полезного ископаемого.

Необходимо уделить особое внимание анализу поверхностных рыхлых отложений, поскольку они могут иметь переменную мощность, неоднородны по составу и часто вносят существенные искажения в геофизические поля.

В результате анализа геологического строения района должны быть сформулированы геологические предпосылки для выполнения геологического задания.

4.3. Геофизическая характеристика

В этом разделе проекта необходимо обосновать применение гравиразведки для решения поставленной геологической задачи.

В разделе приводится таблица плотности горных пород и руд, которая составляется по литературным источникам. Выполняется анализ физических свойств горных пород и руд. Породы с близкими физическими свойствами могут объединяться в группы. Указываются возможные пределы изменения плотности, обусловленные метаморфическими процессами, выветриванием и т. п.

На основе анализа физических свойств и особенностей геологического строения составляются плотностная модель (ПМ). Основой для построения ПМ служит геологический разрез, на котором в упрощенном виде выделяются главные источники аномалий. Породы, близкие по свойствам, могут быть объединены в единый источник. Объекты, создающие помехи для выделения главных источников, например переменная мощность рыхлых отложений, также показываются на ПМ.

Необходимо выполнить расчеты гравитационных и магнитных полей в плане от ПМ и провести анализ ожидаемых аномалий от искомых объектов и от объектов-помех. Приводится качественная характеристика ожидаемых гравитационных полей в плане над различными комплексами пород, и особенно над рудовмещающей толщей. При решении задач геологического картирования необходимо дать характеристику полей

над наиболее крупными блоками пород, дать характеристику ожидаемых аномалий над зонами тектонических нарушений.

В результате анализа формулируются физико-геологические предпосылки, благоприятные для решения поставленных задач, и отмечаются факторы, затрудняющие выделение аномалий от искомым объектов. В заключение делаются выводы о возможностях использования гравиразведки для выполнения геологического задания и указываются конкретные задачи, решаемые гравиразведкой. Раздел иллюстрируется геолого-геофизическими разрезами (ПМ), на которых приводятся расчетные кривые поля.

5. МЕТОДИКА, ОБЪЕМЫ И УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОЕКТИРУЕМЫХ РАБОТ

5.1. Геологические задачи и методы их решения

Конкретизируются геологические задачи, которые необходимо решить для выполнения геологического задания. Намечается сеть измерений для решения поставленных задач, а также последовательность проведения создания опорной сети, рядовой съемки и т.д. Указываются решаемые с помощью гравиразведки геологические задачи. Поскольку курсовой проект ограничен рамками курса «Гравиразведка», то задачи, решаемые другими методами, лишь перечисляются, без обоснования.

Пример. Для определения мощности рыхлых отложений будет поставлен метод ВЭЗ, для выявления природы гравитационных аномалий проектируется метод ВП (или МПП) и т. п.

5.8. Наземные геофизические работы

На основании разделов 4.1 и 4.3 перечисляются критерии выбора участка проектируемых работ. **Главной целью курсового проекта является подробное обоснование методики полевых.**

5.8.1. Гравиразведка

В данном разделе необходимо обосновать:

- 1) вид съемки;
- 2) точность и масштаб съемки, сечение изоаномал отчетной карты, масштаб графиков при профильной съемке;
- 3) систему расположения и густоту рядовых пунктов наблюдений, систему опорных пунктов.

Гравиметровая съемка по отдельным маршрутам (профилям) применяется редко, например при рекогносцировочных наблюдениях или при изучении сильно вытянутых по простиранию объектов. Обычно применяется площадной вид съемки с детализацией выявленных аномалий, когда по результатам съемки может быть построена кондиционная гравиметрическая карта на всю площадь исследования.

Проектная точность съемки (среднеквадратическая погрешность определения аномалии силы тяжести в редукции Буге) выбирается в зависимости от интенсивности предполагаемых аномалий, а также от условий работ и заданного масштаба съемки и требований инструкции [5]. Для обоснования проектной точности съемки нужно использовать расчеты для типичных геологических разрезов (ПМ, см. разд. 4.3). Среднеквадратическая погрешность определения аномалии силы тяжести в редукции Буге (ϵ_a) не должна превышать при поисковой съемке 1/5, а при региональной - 1/3 минималь-

ной величины локальных аномалий гравитационного поля, создаваемых искомыми объектами.

При выполнении курсового проекта в некоторых случаях масштаб, указанный в задании, может не соответствовать величине среднеквадратической погрешности, рассчитанной по аномалии для заданного разреза (ε_a)_{расч.} Если (ε_a)_{расч.} оказывается меньше ε_a для заданного масштаба, то искомая аномалия может оказаться пропущенной, т. к. изолинии на отчетной карте (сечение изоаномал) проводят через $2.5\varepsilon_a$.

Пример. Задан масштаб съемки 1:25000, для этого масштаба $\varepsilon_a=0.10$ мГал, изоаномалы проводятся (табл.1) через 0.25 мГал. Амплитуда расчетной аномалии (рис.1) $A=0.2$ мГал, т. е. меньше сечения изоаномал отчетной карты. Аномалия не будет оконтурена изолинией и может оказаться пропущенной. Расчетная погрешность $\varepsilon_a=(1/5)\times A=0.2\times 0.2=0.04$ мГал соответствует (табл. 1) масштабу 1:10000. Следовательно, необходимо изменить масштаб съемки, указанный в геологическом задании. В подобных случаях необходимо в проекте привести убедительное обоснование, т. к. повышение точности съемки и применение более детальных работ потребует увеличения расходов денежных средств и затрат труда.

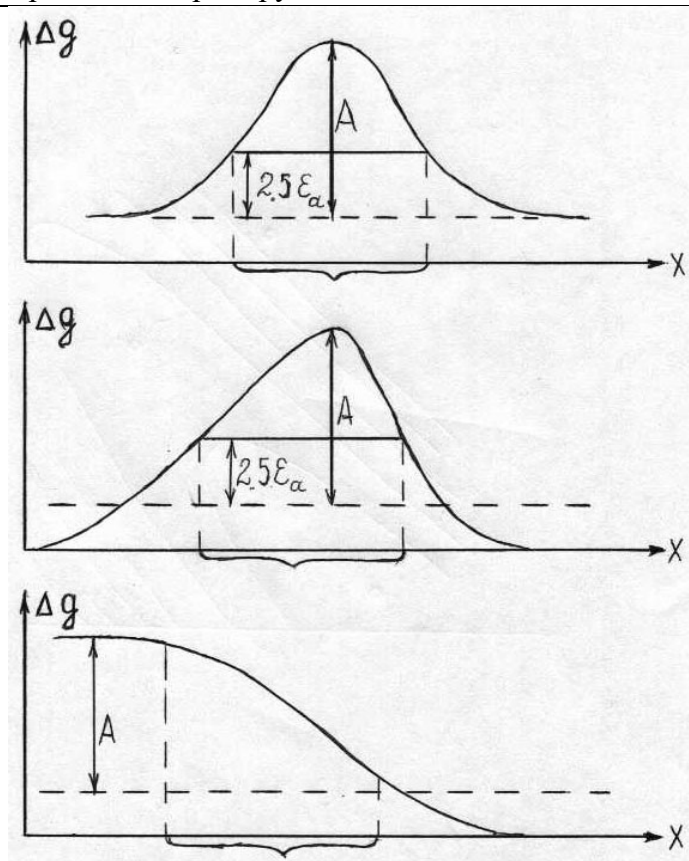


Рис. 1. Определение ширины аномальной зоны

Если (ε_a)_{расч.} превышает ε_a для заданного масштаба съемки, то принимается заданный масштаб, так как искомая аномалия в этом случае будет оконтурена не менее чем одной изолинией.

Пример. Задан масштаб съемки 1:25000, $\varepsilon_a=0.10$ мГал, сечение 0.25 мГал. Расчетная аномалия получилась равной $A=1.2$ мГал, расчетная погрешность (ε_a)_{расч.} $=0.2\times 1.2=0.24$ мГал. Амплитуду аномалии A следует отсчитывать от уровня нормального поля или уровня фона помех (см. рис. 1). Формально можно проектировать съемку масштаба

1:50000 с $\varepsilon_a=0.20$ мГал. Но геологическое задание предусматривает поиски и более мелких рудных тел, залегающих на большей глубине. Следовательно, принимается масштаб съемки, указанный в геологическом задании, и относительно него определяются ε_a , сеть съемки и другие параметры.

Связь масштаба, точности и сети наблюдений определяется Инструкцией по гравиметрической съемке (см. табл.1) [5].

Для построения кондиционной гравиметрической карты желательно предусмотреть измерения по равномерной сети наблюдений. При поисках и картировании объектов изометричной формы в плане рационально проводить измерения по квадратной сети. При изучении объектов вытянутой формы наблюдения лучше проводить по прямоугольной сети. Отношение расстояний между профилями и между пунктами на профиле не должно превышать 5:1. Профили наблюдений следует ориентировать в направлении перпендикулярном основному простиранию контактов, структур и искомым объектам.

Расстояние между профилями наблюдений рассчитывается исходя из того, чтобы аномалия от искомого объекта была установлена как минимум тремя профилями. Если в задачу работ входит картирование нескольких объектов, то при расчете сети наблюдений ориентируются на аномалию объекта минимальных размеров, который должен быть выявлен гравиметрической съемкой.

Расстояние между пунктами наблюдений на профиле рассчитывается по величине ширины аномалий искомого объекта. Для уверенного выделения аномалии необходимо, чтобы не менее трех точек наблюдения, имеющих амплитуду, не меньшую сечения карты, попало в аномальную зону (см. рис.1). Для определения размеров аномальной зоны рассчитывается Δg при минимально возможной глубине залегания искомого объекта. Расстояния между профилями и пунктами наблюдения на профиле приводятся к ближайшим стандартным (см. табл.1). Определяется густота сети, т. е. количество пунктов на 1 кв. км. Рассчитанная сеть наблюдений должна удовлетворять требованиям, указанным в колонке 7 табл.1. для соответствующего масштаба съемки. Таким образом, рассчитав ε_a и густоту, можно определить масштаб съемки либо выбрать оптимальную сеть наблюдений, если масштаб съемки заранее указан в геологическом задании.

В проекте необходимо предусмотреть детализацию выявленных аномалий в объеме до 20 % от общего объема работ и наблюдения по интерпретационным профилям, пересекающим выявленные аномалии. Сеть наблюдений на интерпретационных профилях сгущается примерно в 2 раза. Точность наблюдений на интерпретационных профилях должна быть выше, чем на основных. В проекте необходимо описать сеть наблюдений, указать точность и предполагаемые объемы детализационных работ.

Определив окончательно масштаб, сеть съемки и ε_a , из табл.1 берется среднеквадратическая погрешность определения наблюденных значений силы тяжести:

$$\varepsilon_g = (\varepsilon_0^2 + \varepsilon_{\text{ряд.}}^2)^{1/2}$$

и вычисляются проектные погрешности опорной и рядовой сетей. Опорная сеть должна иметь погрешность в 1.5 - 2 раза меньше погрешности рядовой съемки, т. е. $\varepsilon_{\text{ряд.}}=2\varepsilon_{\text{оп.}}$, отсюда $\varepsilon_g=2.236\varepsilon_{\text{оп.}}$ или $\varepsilon_{\text{оп.}}=0.4472\varepsilon_g$; $\varepsilon_{\text{ряд.}}=0.8944\varepsilon_g$.

Число независимых наблюдений N на точках рядовой и опорной сетей рассчитывается по формуле

$$N > \varepsilon_0^2 / \varepsilon_{\text{пр.}}^2,$$

где ε_0 - среднеквадратическая погрешность единичного наблюдения (определяется по паспорту или в результате испытаний прибора на полигоне);

$\varepsilon_{\text{пр.}}$ - проектная точность рядовой или опорной сети, для которой вычисляется N .

Таблица 1

Соотношение масштаба, точности и сети съемки

Масштаб отчетных карт и гра- фиков	Сече- ние изоано мал, мГал	Ср. кв. погр. опред. силы тяж. в ред. Буге ε_a , мГал	Ср. кв. погр. опред. набл. знач. Силы тяж. ε_g , мГал	Средн. квадр. погр. опред. высот, м	Средн. квадр. погр. опред. коорд. пунктов, м	Густота сети	
						число пунктов на 1 кв. км	Расстоя- ние меж- ду пунк- тами при набл. по профи- лям, м
1	2	3	4	5	6	7	8
1:200000	2	± 0.80	± 0.40	± 2.5	± 100	0.10-0.25	1000-2000
1:100000	1	0 ± 0.40	± 0.30	± 1.2	± 80	0.25-1.00	500-1000
1:50000	0.5	± 0.20	± 0.15	± 0.7	± 40	2-30	100-500
1:50000	0.25	± 0.10	± 0.07	± 0.35	± 40	4-50	50-250
1:25000	0.25	± 0.10	± 0.06	± 0.35	± 20	12-60	50-250
1:25000	0.20	± 0.08	± 0.06	± 0.15	± 20	16-80	20-100
1:10000	0.20	± 0.08	± 0.06	± 0.20	± 4	20-100	20-100
1:10000	0.10	± 0.04	± 0.03	± 0.10	± 4	25-200	10-50
1:5000	0.10	± 0.04	± 0.03	± 0.10	± 2	50-250	10-50
1:5000	0.05	± 0.02	± 0.015	± 0.05	± 2	100-500	5-25

На опорных точках должно быть не менее двух независимых наблюдений. Способ достижения проектной кратности N обосновывается в проекте – или многократные независимые рейсы (циклы) с одним прибором, или измерения с группой приборов в одном рейсе (цикле).

Пример. Для гравиметровой съемки масштаба 1:10000 $\varepsilon_a=0.08$ мГал, $\varepsilon_g=0.06$ мГал, $\varepsilon_{оп.}=0.06/2.236=0.027$ мГал, $\varepsilon_{ряд.}=0.054$ мГал. Для рядовой съемки возьмем гравиметр ГНУ-КС, у которого по паспорту $\varepsilon_0=0.06$ мГал. Число независимых наблюдений на рядовой сети: $N_{ряд.}>0.0036/0.054^2$, $N_{ряд.}=2$. Для опорной сети возьмем гравиметр ГНУ-КВ, у которого $\varepsilon_0=0.04$ мГал, $N_{оп.}=0.04^2/0.027^2$, $N=3$. Если при создании опорной сети использовать тот же гравиметр ГНУ-КС, то потребуется 7-кратное повторение.

В случае применения гравиметров CG-5 и CG-6 смещение нуля не более 0,02 мГал/сутки, что позволяет существенно разрядить сеть опорных пунктов (до 2 – 3 в день) и стоимость работ.

Далее осуществляется выбор и обоснование системы полевой опорной сети. Сеть опорных пунктов может создаваться как в самом начале полевых работ, так и в процессе съемки. В последнем случае необходимо до рядовой съемки создать каркасную опорную сеть и один из этих пунктов привязать к пункту государственной опорной гравиметрической сети.

При рекогносцировочных масштабных съемках в трудных для передвижения условиях местности наблюдения на опорной сети выполняются по методике узловых пунктов. Наблюдения на пунктах опорной сети выполняются по центральной и двухступенчатой системе.

Центральной называется такая система наблюдений, при которой каждый опорный пункт имеет непосредственную связь с единым для всего участка исходным пунктом,

который, в свою очередь, привязан к государственной гравиметрической сети. В настоящее время подавляющая часть измерений проводится именно так. Связь между опорными пунктами осуществляется циклами или короткими рейсами. Такая система наблюдений применяется для небольших участков при условии быстрой транспортировки приборов. Схема создания опорной сети по центральной системе показана на рис.2.

Двухступенчатая система состоит из каркасной и заполняющей опорной сети. Стоимость таких работ существенно возрастает, а потому требует дополнительного обоснования. Каркасная сеть создается по центральной или полигонной системе с числом сторон в полигоне 3 - 5. Заполняющая опорная сеть создается рейсами. Рейсы заполняющей опорной сети начинаются и заканчиваются на пунктах каркасной опорной сети. Схема отработки опорной сети по двухступенчатой системе показана на рис. 3а и 3б.

Расстояние между опорными пунктами выбирается из расчета, чтобы рейс по рядовым пунктам укладывался в интервал времени $\Delta t_{\text{эф.}}$, в течение которого закон смещения нуль-пункта гравиметра можно считать линейным. Этот интервал для каждого прибора и для заданной точности съемки определяют по графику смещения нуль-пункта, полученному при изучении характера смещения нуль-пункта во время подготовки гравиметра к полевым работам. В курсовом проекте $\Delta t_{\text{эф.}}$ следует брать для масштаба 1:10000 - 1.5-2 часа; для масштабов 1:25000 и 1:50000 - 3-3.5 часа; для масштабов 1:100000 и 1:200000 - 6-7 часов. Продолжительность рейсов по опорной сети в 2 раза меньше.

По $\Delta t_{\text{эф.}}$ и нормам времени (табл. 2) для избранной сети наблюдений рассчитывается расстояние между опорными пунктами. В зависимости от масштаба съемки расчетные расстояния между магистралями и каркасными опорными пунктами следует приводить к расстояниям, кратным 1 км или 0.5 км. При расстоянии между профилями, соизмеримыми с расстоянием между пунктами на профиле, опорные пункты на магистралях располагают через один профиль, в шахматном порядке. При проектировании нужно учитывать возможность подъезда (наличие посадочной площадки для вертолета) к каркасным опорным пунктам и фактическую проходимость местности для автотранспорта. Характеристики категорий местности приведены в прил. 1. В результате расчета получают лишь примерное расстояние между каркасными пунктами. Фактическое их положение наносится на топографическую карту с учетом удобства подъезда к ним, быстрого и надежного их опознания на местности и т. п.

Рядовые рейсы выполняются по методике без повторений. Каждый рейс начинается и заканчивается на опорных пунктах.

Контрольные рейсы выполняются диагональными ходами в объеме 5 – 10 % от объема рядовой съемки. Схемы рядовых и контрольных рейсов показаны на рис.2, 3а и 3б.

Исходный пункт, на который передают абсолютное значение силы тяжести от пункта Государственной гравиметрической сети, создают по цикловой схеме (рис. 3а, 3б):

ГГС→ИП→ГГС.

Опорные пункты создают по цикловой схеме (рис. 3):

ИП→ОП→ИП.

Наблюдения на пунктах рядовой сети выполняют отдельными рейсами, опирающимися на пункты опорной сети (рис. 3а, 3б). Рядовой рейс выполняют по схеме от опорного пункта до опорного пункта:

ОП1-РП1-РП2-....-РПN-ОП2.

Точность наблюдений на рядовых пунктах в 1.5 – 2 раза ниже, чем на опорных.

Гравиметрические опорные пункты должны по возможности располагаться на площади равномерно, иметь стабильное основание для установки прибора. Удобно совмещать пункты опорной гравиметрической сети с пунктами геодезических сетей.

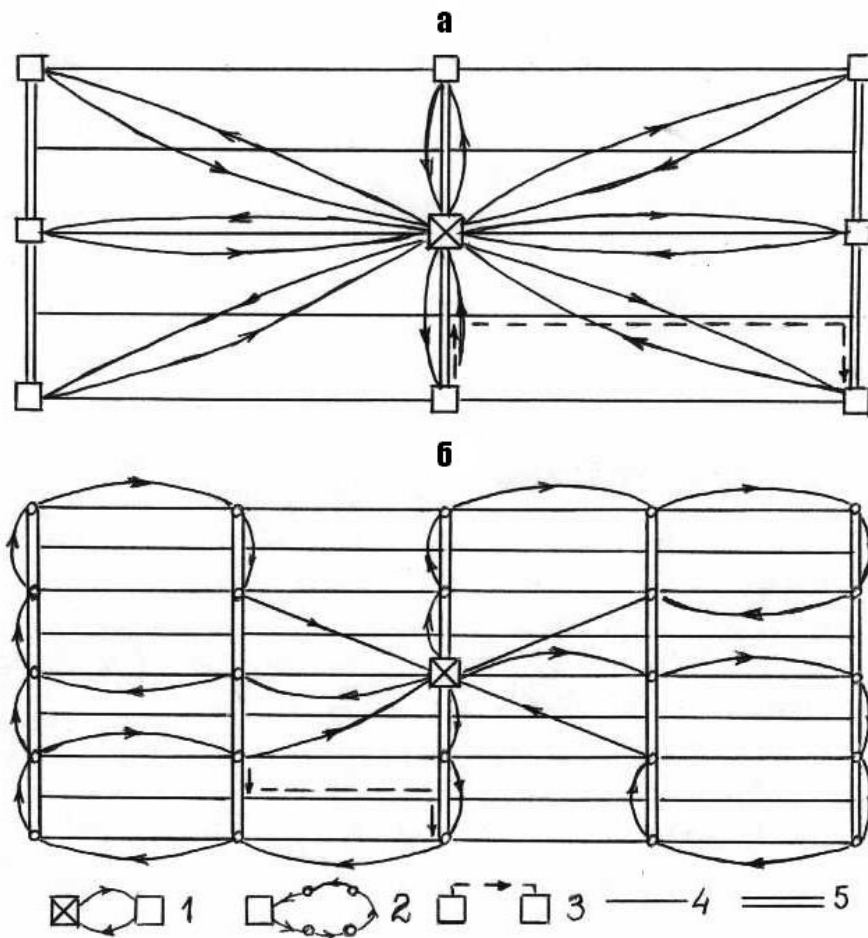


Рис. 2. Центральная система отработки опорной сети:

а – съемка циклами, б – съемка рейсами:

1 – гравиметрический цикл, связывающий опорный пункт с исходным пунктом; 2 – рейс, связывающий опорные пункты с исходным пунктом;

3 – рейс по рядовым пунктам между двумя опорными пунктами; 4 – профиль рядовой съемки; 5 – магистраль

Густота сети пунктов наблюдений, точность измерений, характеристики применяемой техники регламентируются действующей инструкцией.

С целью подтверждения паспортных характеристик гравиметров перед проведением съемки проводят предполетную подготовку:

- а) исследование зависимости показаний прибора от атмосферного давления, температуры, режима транспортировки;
- б) изучение закона смещения нуля-пункта;
- в) определение цены деления;
- г) определение времени становления отсчета;
- д) проверка герметичности;
- е) определение полного диапазона без перестройки;
- ж) определение люфта измерительного устройства;
- и) сопоставление результатов измерений различными приборами.

Приводится расчет объема работ в физическом выражении (погонные километры, физические точки) и приборо-сменах по видам работ (привязка к Государственной гравиметрической сети, опорная сеть, рядовая съемка, контрольные измерения, детализационные работы и т. д.).

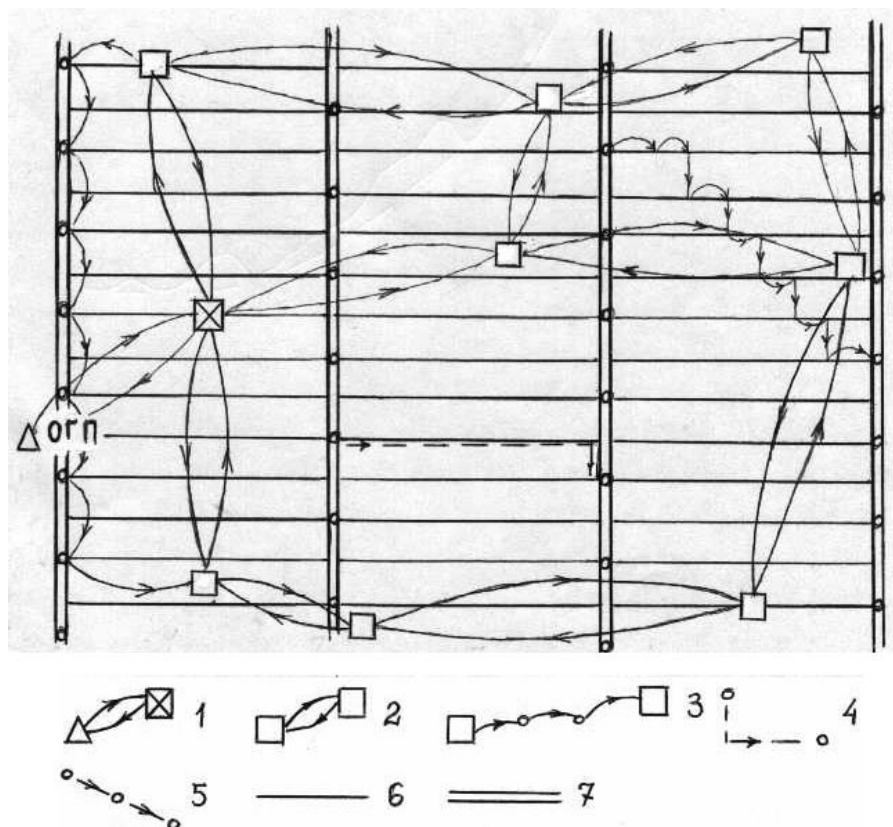


Рис. 3а. Двухступенчатая опорная сеть:

1 - гравиметрический цикл, связывающий опорный государственный пункт и исходный пункт; 2 - гравиметрический цикл, связывающий два каркасных пункта; 3 - рейс по заполняющей опорной сети, опирающийся на каркасные пункты; 4 - рейс по рядовым пунктам между двумя опорными; 5 - диагональный контрольный ход между двумя опорными пунктами; 6 – профиль рядовой съемки; 7 - магистраль

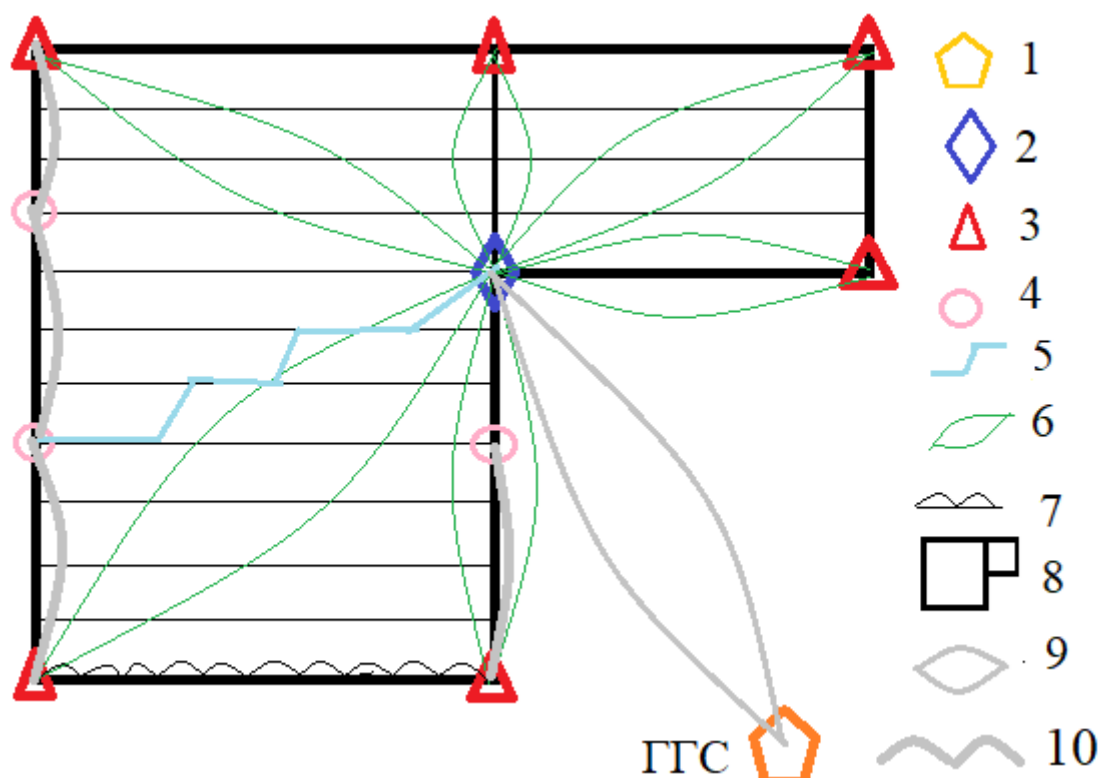


Рис. 3б Схема гравиметрической съемки

Условные обозначения к рис. 3б:

- 1 – пункт Государственной гравиметрической сети (ГГС)
- 2 – исходный пункт на участке съемки, на который передают абсолютное значение силы тяжести,
- 3 – пункты каркасной опорной сети,
- 4 – пункты заполняющей опорной сети,
- 5 – контрольный диагональный ход (показан условно схематически, контрольные пункты выбирают после окончания съемки),
- 6 – циклы передачи абсолютного значения силы тяжести от исходного пункта на пункты каркасной опорной сети (КОС),
- 7 – рейс по пунктам рядовой сети измерений,
- 8 – контур участка съемки,
- 9 – схема передачи по цикловой схеме абсолютного значения силы тяжести с пункта ГГС на исходный пункт участка.
- 10 – рейс по пунктам каркасной сети.

Пример. Для съемки масштаба 1:50000 по сети 500×250 м для местности III категории трудности (залесенная местность), при пешем передвижении норма времени 2.05 приборо-смены на съемку 80 пунктов; $\Delta t_{\text{эф}}$ для рядовой съемки равна 3 - 3.5 часа. При 8-часовом рабочем дне норма на 1 час равна $80:(8 \times 2.05) = 5$ пунктов. За $\Delta t_{\text{эф}} = 3$ часа нужно выполнить наблюдения на 15 пунктах. Следовательно, расстояние между опорными пунктами в рядовом рейсе равно $250 \times 15 = 3750 \approx 3500$ м. Опорные пункты заполняющей сети обычно располагаются на пересечении профилей с магистралями. Таким образом, расстояние между магистралями в данном примере равно 3 км. Расстояние между опорными пунктами заполняющей сети по магистрали равно $500 \times 2 = 1000$ м. Если местность позволяет, для передвижения следует использовать автомобиль. Тогда норма времени равна 1.36 приборо-смен на съемку 50 пунктов. За $\Delta t_{\text{эф}} = 2$ часа можно

выполнить съемку $(50:(8 \times 1.36)) \times 2 = 9$ пунктов. Каркасная опорная сеть создается по цикловой схеме (см. рис. 17.3). Расстояние между каркасными опорными пунктами должно быть таким, чтобы продолжительность цикла не превышала 1.5 часов, т.е. примерно 6-8 км.

Таблица 2
Нормы времени на гравиразведку с наземными гравиметрами.
Летний период. [16]

Рассто- яние между профи- лями,м	Рас- стоя- ние между пунк- тами, м	Коли- чество пунк- тов	Количество приборо-смен						
			Передвижение пешее, оператор с 1 гравиметром				Передвижение на автомобиле		
			Категория трудности						
			I	II	III	IV	I	II	III
100	20	500	4.00	4.90	5.80	7.19	-	-	-
100	100	100	1.11	1.33	1.58	2.06	0.82	1.01	1.24
250	50	80	0.73	0.88	1.05	1.31	-	-	-
500	250	80	1.37	1.56	1.83	2.48	0.77	0.98	1.25
500	500	40	1.13	1.25	1.53	2.13	0.44	0.58	0.76
1000	250	40	0.69	0.78	0.91	1.24	0.39	0.49	0.63
1000	500	20	0.56	0.62	0.76	1.06	0.22	0.29	0.38
2000	500	10	0.28	0.31	0.38	0.53	0.11	0.14	0.19
2000	1000	50	2.50	2.78	3.42	5.04	0.67	0.88	1.17
4000	2000	12.5	1.25	1.34	1.66	2.33	0.25	0.33	0.46
Рассто- яние между профи- лями, км	Рас- стоя- ние между пунк- тами, км	Коли- чество пунк- тов	Передвижение на вертолете (самолете)						
			Категория трудности						
			Ia		IIa		IIIa		IVa
2	2	250	9.40		12.3		20.0		25.6
5	5	40	1.79		2.29		3.57		4.52
8	8	15.62	0.784		0.976		1.50		1.89
10	10	100	5.65		6.81		10.2		12.8
20	20	25	1.81		2.25		3.19		3.85
30	30	11.11	1.09		1.27		1.73		2.05
50	50	4	0.574		0.644		0.834		0.937

5.17. Топографо-геодезические работы

Для обеспечения плановой и высотной привязок пунктов наблюдений Δg предусматриваются следующие виды топогеодезических работ:

- 1) разбивка магистралей и профилей наблюдений с пикетами, соответствующих проектной сети наблюдений;
- 2) закрепление опорных пунктов, концов профилей и магистралей на местности;
- 3) привязка участков съемки к государственной триангуляционной сети;

- 4) определение высот пунктов наблюдений;
- 5) нивелирование или иные методы определения высот для учета рельефа местности в ближней зоне в пунктах гравиметрических наблюдений;
- б) применение спутниковых навигационных систем.

Определение высот (п.4) проводится одним из нижеперечисленных методов (выберите свой вариант):

- а) техническое нивелирование;
- б) геодезическое нивелирование;
- в) гидростатическое нивелирование;
- г) барометрическое нивелирование;
- д) стереофотограмметрические способы определения высот;
- е) снятие высот с топографических карт.

В настоящее время широкое применение получили спутниковые системы позиционирования и навигации (ССП): GPS (NAVSTAR) и ГЛОНАСС. Благодаря своим уникальным возможностям ССП позволяют круглосуточно и практически при любых погодных условиях оперативно и с высокой точностью (в зависимости от класса применяемой аппаратуры - от единиц миллиметров до десятков метров) определить плановое положение и высоты пунктов геофизических наблюдений. По сравнению с традиционными методами спутниковые технологии навигационно-геодезических определений координат обеспечивают высокую производительность труда, автоматизацию полевых и камеральных работ. Но при крупномасштабных съемках (крупнее 1:10000) приходится применять техническое нивелирование

5.22. Камеральные работы

Перечисляются и обосновываются основные этапы текущей и камеральной обработки. В измеренные данные вводятся поправки за влияние лунно-суточных вариаций и смещение нуля гравиметра.

Вычисляют редукцию Буге с фактической и стандартными плотностями промежуточного слоя.

Особое внимание уделяют учету влияния дневного и подземного рельефа. Предпочтительнее использовать компьютерные технологии учета поправок, которые обеспечивают высокую точность и производительность.

Основным критерием оценки качества гравиметрической съемки является среднеквадратическая погрешность определения аномалии силы тяжести в редукции Буге:

$$\varepsilon_a = \pm (\varepsilon_{оп.}^2 + \varepsilon_g^2 + \varepsilon_B^2 + \varepsilon_{\gamma 0}^2 + \varepsilon_p^2)^{1/2},$$

где $\varepsilon_{оп.}$ - среднеквадратическая погрешность привязки полевой опорной сети (исходного пункта) к государственной опорной сети;

ε_g - среднеквадратическая погрешность определения наблюдаемых значений силы тяжести;

ε_B - среднеквадратическая погрешность определения поправки Буге;

$\varepsilon_{\gamma 0}$ - среднеквадратическая погрешность определения нормального значения силы тяжести;

ε_p - среднеквадратическая погрешность определения поправки за влияние рельефа местности.

В проекте необходимо привести вычисленные погрешности ε_g , ε_B , $\varepsilon_{\gamma 0}$, ε_a ;

$$\varepsilon_B = [(0.3086 - 0.0419 \sigma_{пр.сл.})^2 \times \varepsilon_H^2 + (0.0419 H)^2 \varepsilon_{\sigma}^2]^{1/2}.$$

Здесь ε_H - в метрах берется из колонки 5 табл. 1. Погрешность $\varepsilon_{\gamma 0}$ определяют по формуле, мГал

$$\varepsilon_{\gamma 0} = \Delta \gamma_0 * \delta x / L = \delta_{\gamma 0} * \delta x,$$

где $\Delta\gamma_0$ - изменение γ_0 на 1° широты в условиях проектного участка съемки,

L - длина дуги меридиана в 1° ;

$\delta\gamma_0$ - нормальный горизонтальный градиент силы тяжести;

δx - среднеквадратическое отклонение фактического положения гравиметрических пунктов от проектного положения в направлении меридиана (для проекта берется из колонки 6 табл.1).

Пример. При съемке масштаба 1:10000 в Свердловской области $\varepsilon_g=0.06$ мГал; $\varepsilon_B=0.2 \times 0.2=0.04$ мГал; $\varepsilon_{\gamma_0}=0.0007 \times 4=0.003$ мГал. Нормальный горизонтальный градиент для Свердловской области вычислен следующим образом; для широты 57° $\gamma_0=981658.2$ мГал, для широты 56° $\gamma_0=981574.2$ мГал. Считая Землю шаром с радиусом 6370 км, $\delta\gamma_0=(981658.2-981574.2):(6.28 \times 6370000/360)=0.0007$ мГал/м, $\varepsilon_a=(0.06^2+0.04^2+0.003^2)^{1/2}=0.072$ мГал.

Согласно табл.1 допустимая $\varepsilon_a=0.08$ мГал. Разность между расчетной и проектной ε_a включает погрешность привязки исходного пункта к государственной опорной сети и погрешность учета влияния рельефа.

Образец выполнения титульного листа пояснительной записки курсового проекта приведен в прил. 3.

Приложение 1

Категории местности по трудности передвижения [18]

I. Местность равнинная степная или лесостепная, крутизна склонов не более 10° , не более 20 % площади участка заболочено, залесено, занято строениями; не более 50 % занято пашней.

Переезд возможен на автомобиле с объездами до 20 % расстояния между пунктами наблюдений.

II. Местность слабовсхолмленная степная, лесостепная с развитой сетью неглубоких оврагов, водостоков при наличии отдельных возвышенностей с крутизной склонов до 20° ; до 40 % площади заболочено, залесено, занято строениями; до 70 % площади занято пашней.

Объезды на транспорте с пониженной скоростью не превышают 20 % расстояний между пунктами и 70 % - при переезде на автомобиле.

III. Местность сильно пересеченная, с развитой сетью оврагов, водостоков, при наличии отдельных возвышенностей с крутизной склонов до 25° ; поймы рек, заросшие кустарником; районы, где более 70 % занято пашней; слегка заболоченная тундра; территория, до 60 % занятая солончаками, заболоченными и залесенными участками или поливными культурами, строениями; пустыня, 40 % площади которой, занято незакрепленными песками; территория вблизи (до 1 км) действующих промышленных предприятий.

Объезды на вездеходах не превышают 50 % расстояния между пунктами наблюдений, на автомобилях повышенной проходимости объезды превышают 70 % расстояния между пунктами наблюдений.

IV. Местность горная, отдельные возвышенности имеют крутизну склонов до 30° ; крупные массивы поливных культур; сплошное распространение барханных песков; таежная местность или полностью покрытая лесом с буреломом и сплошными зарослями кустарника; незамерзающие болота занимают 60 % площади; болотистая тундра и лесотундра.

Перемещение возможно пешком, на лыжах, вьючным транспортом с небольшими объездами; перемещение с помощью вездехода возможно по отдельным маршрутам с объездами более 50 % расстояния между пунктами наблюдений.

Приложение 2 СТАДИИ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

В целях повышения эффективности геологоразведочных работ их выполняют в определенной последовательности: геологоразведочный процесс делят на этапы и стадии.

При поисках и разведке **месторождений нефти и газа** выделяют три этапа - **региональный, поисковый и разведочный**.

На **региональном** этапе изучают основные закономерности геологического строения слабо изученных осадочных бассейнов и отдельных литолого-стратиграфических комплексов, оценивают нефтегазоносность крупных территорий. Региональный этап делят на две стадии:

1) стадия прогноза нефтегазоносности, на которой выделяют наиболее перспективные, первоочередные объекты;

2) стадия оценки зон нефтегазонакопления, на которой оценивают потенциальные и прогнозные ресурсы этих зон.

На **поисковом** этапе основная задача - обнаружение новых месторождений или новых залежей на ранее открытых месторождениях. Поисковый этап делят на две стадии:

1) стадия выявления и подготовки объектов к поисковому бурению, на которой в пределах перспективных зон выделяют перспективные локальные объекты-ловушки, передают их на поисковое бурение, устанавливают очередность глубокого бурения;

2) стадия поиска месторождений или залежей, на которой локальные объекты подробно изучают; стадия завершается либо получением первого промышленного притока нефти, либо обоснованием бесперспективности объекта.

На **разведочном** этапе выполняют исследования, обеспечивающие возможность разделения месторождений или залежей на промышленные и непромышленные, определить запасы углеводородов, подготовить объекты к разработке.

Этапы и стадии геологоразведочных работ (твердые полезные ископаемые) [13]

Этап, стадия	Объект изучения	Цель работ	Основной конечный результат
1	2	3	4
Этап I. Работы общегеологического минерагенического назначения			
Стадия I. Региональное геологическое изучение недр и прогнозирование полезных ископаемых.	Территория Российской Федерации, ее крупные геолого-структурные, экономические, горнорудные и нефтегазоносные регионы, шельф и ис-	Создание фундаментальной многоцелевой геологической основы прогнозирования полезных ископаемых, обеспечение различных отраслей промышленности и сельского хозяйства систематизированной геологической информацией для решения вопро-	Комплекты обязательных и специальных геологических карт различного назначения масштабов 1:1000000, 1:200000, 1:50000; сводные и обзорные карты геологического содержания масштабов 1:500000 и мельче, комплект карт, схем и разрезов глубинного строения

	ключительная экономическая зона, глубинные части земной коры, районы с напряженной экологической обстановкой, районы интенсивного промышленного и гражданского строительства, мелиоративных и природоохранных работ и др.	сов в области геолого-разведочных работ, горного дела, мелиорации, строительства, обороны, экологии и т.п.	недр Российской Федерации, ее регионов; комплексная оценка минералогического потенциала изученных территорий с выделением перспективных рудных районов и узлов, зон, угленосных бассейнов; определение прогнозных ресурсов категорий P_3 и P_2 ; оценка состояния геологической среды и прогноз ее изменения.
--	---	--	---

Этап II. Поиски и оценка месторождений.

Стадия 2. Поисковые работы.	Бассейны, рудные районы, узлы и поля с оцененными прогнозными ресурсами категорий P_3 и P_2 .	Геологическое изучение территории поисков; выявление проявлений и месторождений полезных ископаемых; определение целесообразности их дальнейшего изучения.	Комплексная оценка геологического строения и перспектив исследованных площадей, выявленные проявления и месторождения полезных ископаемых с оценкой их прогнозных ресурсов по категориям P_2 и P_1 ; оценка возможности их освоения на основе укрупненных показателей; обоснование целесообразности и очередности дальнейших работ. Месторождения полезных ископаемых с оценкой их запасов по категориям C_2 и C_1 , а по менее изученным участкам – прогнозных ресурсов категории P_1 ; технико-экономическое обоснование временных кондиций и промышленной ценности месторождения.
Стадия 3. Оценочные работы.	Проявления и месторождения полезных ископаемых с оцененными прогнозными ресурсами категорий P_2 и P_1 .	Геологическое изучение и геолого-экономическая оценка проявлений и месторождений; отбраковка проявлений, не представляющих промышленной ценности.	

Этап III. Разведка и освоение месторождений

Стадия 4. Разведка месторождения.	Месторождения полезного ископаемого с оцененными запасами по категориям C_2 и C_1 и прогнозными ресурсами категории P_1 .	Изучение геологического строения, технологических свойств полезного ископаемого, гидрогеологических, инженерно-геологических условий отработки месторождения; технико-экономическое обоснование промышленной ценности и освоения месторождения; уточнение геологического строения месторождения в процессе освоения на недостаточно изученных участках (фланги, глубокие горизонты) с переводом запасов из низших в более высокие категории.	Геологические, гидрогеологические, горногеологические, технологические и другие данные, необходимые для составления технико-экономического обоснования постоянных условий и освоения месторождения; подсчитанные запасы по категориям А, В, C_1 , C_2 .
Стадия 5. Эксплуатационная разведка.	Эксплуатационные этажи, горизонты, блоки, уступы, подготавливаемые для очистных работ.	Уточнение полученных при разведке данных для оперативного планирования добычи, контроль за полнотой и качеством отработки запасов	Запасы подготовленных и готовых к выемке блоков; исходные материалы для оценки полноты отработки месторождения, уточнение потерь и разубоживания полезного ископаемого.

Образец выполнения титульного листа объяснительной записки курсового проекта

Министерство образования Российской Федерации
Уральская государственная горная академия

Институт геологии и геофизики

Кафедра структурной геофизики

**ГЕОЛОГО - МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ПРОЕКТА
НА ПРОИЗВОДСТВО ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ И
МАГНИТОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ
МАСШТАБА 1:10000 НА ЮЖНОМ УЧАСТКЕ
САРБАЙСКОГО РАЙОНА С ЦЕЛЬЮ ПОИСКОВ
ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В 2023 г.**

Пояснительная записка курсового проекта
по дисциплине «Гравиразведка»

Оценка проекта _____

Руководитель

проф., д - р геол.-минерал. наук

Э.В. Иванов

Разработал

студент гр. РФ-18-3

Д.В. Серебряков

Екатеринбург, 2023

Таблица 2

Нормы времени на гравиразведку с наземными гравиметрами.
Летний период. [16]

Рас- стоя- ние между про- филя- ми,м	Рас- стоя- ние между пунк- тами, м	Ко- личе- ство пунк- тов	Количество приборо-смен						
			Передвижение пешее, оператор с 1 гравимет- ром				Передвижение на автомобиле		
			Категория трудности						
			I	II	III	IV	I	II	III
100	20	500	4.00	4.90	5.80	7.19	-	-	-
100	100	100	1.11	1.33	1.58	2.06	0.82	1.01	1.24
250	50	80	0.73	0.88	1.05	1.31	-	-	-
500	250	80	1.37	1.56	1.83	2.48	0.77	0.98	1.25
500	500	40	1.13	1.25	1.53	2.13	0.44	0.58	0.76
1000	250	40	0.69	0.78	0.91	1.24	0.39	0.49	0.63
1000	500	20	0.56	0.62	0.76	1.06	0.22	0.29	0.38
2000	500	10	0.28	0.31	0.38	0.53	0.11	0.14	0.19
2000	1000	50	2.50	2.78	3.42	5.04	0.67	0.88	1.17
4000	2000	12.5	1.25	1.34	1.66	2.33	0.25	0.33	0.46
Рас- стоя- ние между про- филя- ми, км	Рас- стоя- ние между пунк- тами, км	Ко- личе- ство пунк- тов	Передвижение на вертолете (самолете)						
			Категория трудности						
			Ia		IIa		IIIa		IVa
			2	2	250	9.40		12.3	
5	5	40	1.79		2.29		3.57	4.52	
8	8	15.62	0.784		0.976		1.50	1.89	
10	10	100	5.65		6.81		10.2	12.8	
20	20	25	1.81		2.25		3.19	3.85	
30	30	11.11	1.09		1.27		1.73	2.05	
50	50	4	0.574		0.644		0.834	0.937	

Пример. Для съемки масштаба 1:50000 по сети 500×250 м для местности III категории трудности (залесенная местность), при пешем передвижении норма времени 2.05 приборо-смены на съемку 80 пунктов; $\Delta t_{эф}$ для рядо-

вой съемки равна 3 - 3.5 часа. При 8-часовом рабочем дне норма на 1 час равна $80:(8 \times 2.05) = 5$ пунктов. За $\Delta t_{\text{эф}} = 3$ часа нужно выполнить наблюдения

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Виноградов В.Б. Гравиразведка. Гравитационное поле Земли, аппаратура, методика измерений. Учебное пособие. Ай Пи Ар Медиа. Москва. 153 с. 2023. Текст электронный.
- 2 Виноградов В.Б., Болотнова Л.А. Гравиметры. Учебное пособие. УГГУ. – Екатеринбург. Изд. УГГУ. 2010. 67 с.
3. Гравиметры наземные: Общие технические условия. ГОСТ 13017-83.-М.: Изд-во стандартов, 1987. - 36 с.
4. Гравиметр узкодиапазонный с кварцевой чувствительной системой класса С ГНУ-КС: Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 1989. - 46 с.
5. Гравиразведка: Справочник геофизика / Под ред. Е.А. Мудрецов, К.Е. Веселова. - 2-е изд.-М.:Недра, 1990. - 607 с.
6. Инструкция по гравиразведке: Единые технические требования. Часть 5. - М., 1980. - 80 с.
- 8 Долгаль А.С. Гравиметрия и магнитометрия: трансформации геопотенциальных полей. Учебное пособие. ПГНИУ. Пермь. 2022. 140 с.
9. Макет проекта на общие (детальные) поиски твердых полезных ископаемых. - М., 1982.
10. Методические рекомендации по интерпретации геофизических данных при крупномасштабном геологическом картировании. - Свердловск: Изд. УПГО “Уралгеология”, 1983. - 301 с.
11. Петрофизические методы поисков и изучения железорудных месторождений на Урале: Методические рекомендации. - Свердловск: Изд. УПГО “Уралгеология”, 1988.
12. Положение о порядке проведения геологоразведочных работ по этапам и стадиям (твердые полезные ископаемые).- М.: МПР РФ, ВИЭМС, 1999.
13. Развитие гравиметрии и магнитометрии в XX веке: Труды конференции / Под ред. В.Н. Страхова. - М.: ОИФЗ РАН, 1997. - 234 с.
14. Справочник сметных норм. Выпуск 3. - М.: Недра, 1993.
15. Суворов В.В. Гравиразведка: Курс лекций для бакалавров. Часть -1.- Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 1995. - 124 с.
16. Суворов В.В. Гравиразведка: Курс лекций для бакалавров. Часть 2. –Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 1996. - 180 с.
17. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика): Справочник геофизика / Под ред. Н. В. Дортман - М: Недра, 1984.



**Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации**

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский государственный горный
университет»

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по выполнению контрольной работы
по дисциплине «Магниторазведка»
для студентов всех форм обучения специальности
21.05.03 Технология геологической разведки
специализации «Геофизические методы
поисков и разведки МПИ (РФ)»**

Екатеринбург
2020

СОДЕРЖАНИЕ

Введение

1. Задания контрольной работы
2. Методические рекомендации по выполнению контрольной работы
 - 2.1 Оформление контрольной работы
 - 2.2 Критерии оценки контрольной работы
3. Методические рекомендации по составлению глоссария
4. Рекомендуемая литературы для выполнения контрольной работы

Введение

Данные методические указания разработаны в помощь для выполнения контрольной работы по курсу «Магниторазведка».

В методических рекомендациях содержится: перечень вопросов контрольной работы, методические рекомендации по выполнению контрольной работы, перечень рекомендуемых учебных изданий, интернет-ресурсов, дополнительной литературы.

Внимательно прочитайте задание контрольной работы, подготовьте рекомендуемую вам литературу (при необходимости), ознакомьтесь с рекомендациями по выполнению работы, с критериями оценивания работы.

Прежде чем сдать выполненную контрольную работу преподавателю на проверку, выполните самооценку по заданным критериям.

Контрольная работа является обязательной для каждого обучающегося и определяется учебным планом. Наличие положительной оценки по контрольной работе необходимо для получения промежуточной аттестации по дисциплине «Магниторазведка».

1. Задания для контрольной работы

Вариант № 1

1. История возникновения теории земного магнетизма.
2. Нормальное магнитное поле Земли и гипотезы его происхождения.

Вариант № 2

1. Инверсии магнитных полюсов Земли. Опишите в чем отличие магнитного полюса Земли от геомагнитного?
2. Применение исследований магнитного поля Земли в археологии.

Вариант № 3

1. Роль отечественных ученых в развитии метода магниторазведки.

2. Вариации магнитного поля Земли и их причины. Способы учета вариаций при проведении магниторазведочных работ.

Вариант № 4

1. Природа магнитного поля Земли (рассмотреть гипотезы, в том числе теории гидромагнитного динамо).
2. Палеомагнетизм и археомагнетизм.

Вариант № 5

1. История изучения Курской магнитной аномалии (КМА).
2. Современное состояние развития магниторазведочной аппаратуры и оборудования.

Вариант № 6

1. Магнитные свойства горных пород.
2. Вариации магнитного поля Земли и методы их учета.

Вариант № 7

1. Прямая и обратная задачи магниторазведки.
2. Нормальное магнитное поле Земли и гипотезы его происхождения.

Вариант № 8

1. Единицы измерения магнитных величин в системах СГС и СИ. Напряженность магнитного поля и магнитная индукция.
2. Структура магнитного поля Земли (нормальное и аномальное поля).

Вариант № 9

1. Палеомагнетизм и археомагнетизм. Физическая основа применения этих методов и решаемые задачи.
2. Региональные и локальные магнитные аномалии. Понятие положительной и отрицательной аномалий.

Вариант № 10

1. Применение исследований магнитного поля Земли в археологии.
2. Современное состояние развития магниторазведочной аппаратуры и оборудования.

Вариант № 11

1. Назначение, устройство, принцип действия и область применения протонных магнитометров
2. Магнитная проницаемость и магнитная восприимчивость горных пород.

Вариант № 12

1. Назначение, устройство, принцип действия и область применения квантовых магнитометров
2. Индукционная и остаточная намагниченность пород и причина их образования. Виды остаточной намагниченности.

Вариант № 13

1. Назначение, устройство, принцип действия и область применения феррозондовых магнитометров
2. Региональные и локальные магнитные аномалии. Понятие положительной и отрицательной аномалий.

Вариант № 14

1. Магнитосфера и радиационные пояса Земли. Способы их изучения.
2. Аналитическое выражение магнитного поля Земли как поля диполя.

Вариант № 15

1. Коэффициент размагничения и его роль в формировании индукционной намагниченности пород.
2. Рассчитать магнитное поле Z_0 , H_0 и T_0 для Екатеринбурга.

2. Методические рекомендации по выполнению контрольной работы

Контрольная работа является индивидуальной самостоятельно выполненной работой студента.

Контрольная работа должна содержать следующие структурные элементы:

1. титульный лист;
2. содержание;
3. ответы на контрольные вопросы;
4. список использованных источников;
5. приложения (при необходимости).

Количество источников в списке определяется студентом самостоятельно, рекомендуемое количество от 5 до 10. При этом в списке обязательно должны присутствовать источники, изданные в последние 5 лет.

2.1 Оформление контрольной работы

При выполнении контрольной работы необходимо соблюдать следующие требования:

- текст располагается на одной стороне листа белой бумаги формата А-4;
- размер шрифта - 14 Times New Roman, цвет – черный;
- междустрочный интервал – полуторный;
- поля на странице – размер левого поля – 2 см, правого – 1 см, верхнего - 2 см, нижнего – 2 см;
- текст должен быть отформатирован по ширине листа;
- на первой странице необходимо изложить план (содержание) реферата;
- в конце работы необходимо указать источники использованной литературы.

Список использованных источников должен формироваться в алфавитном порядке по фамилии авторов.

Включенная в список литература нумеруется сплошным порядком от первого до последнего названия. По каждому литературному источнику указывается: автор (или группа авторов), полное название книги или статьи, место и наименование издательства (для книг и брошюр), год издания; для журнальных статей указывается наименование журнала, год выпуска и номер. По сборникам трудов (статей) указывается автор статьи, ее название и далее название книги (сборника) и ее выходные данные. На использованные источники в тексте работы должны быть ссылки

2.2 Критерии оценки контрольной работы

Срок сдачи готовой контрольной работы определяется утвержденным графиком. В случае отрицательного заключения преподавателя студент обязан доработать или переработать контрольную работу. Срок доработки контрольной работы устанавливается преподавателем с учетом сущности замечаний и объема необходимой доработки.

Контрольная работа оценивается по системе:

Оценка "отлично" выставляется за контрольную работу, которая носит исследовательский характер, содержит грамотно изложенный материал, с соответствующими обоснованными выводами.

Оценка "хорошо" выставляется за грамотно выполненную во всех отношениях контрольную работу при наличии небольших недочетов в его содержании или оформлении.

Оценка "удовлетворительно" выставляется за контрольную работу, которая удовлетворяет всем предъявляемым требованиям, но отличается поверхностностью, в ней просматривается непоследовательность изложения материала, представлены необоснованные выводы.

Оценка "неудовлетворительно" выставляется за контрольную работу, которая не носит исследовательского характера, не содержит анализа источников и подходов по выбранной теме, выводы носят декларативный характер.

Обучающийся, не представивший в установленный срок готовую контрольную работу, которая была оценена на «неудовлетворительно», считается имеющим академическую задолженность и не допускается к сдаче экзамена или зачета.

3. Составление глоссария

Выполнить подбор и систематизации терминов, непонятных слов и выражений, встречающихся при выполнении контрольной работы. Расположить после основной части контрольной работы название и значение терминов, слов и понятий в алфавитном порядке.

Роль студента: прочитать материал источника, выбрать главные термины, непонятные слова; подобрать к ним и записать основные определения или расшифровку понятий; критически осмыслить подобранные определения и попытаться их модифицировать (упростить в плане устранения избыточности и повторений).

4.Рекомендуемая литературы для выполнения контрольной работы

Основная литература

1. Виноградов В.Б., Болотнова Л.А. Магниторазведка: Практикум, Часть I. Екатеринбург: Изд-во УГГУ. 2012.- 100 с.
2. Инструкция по магниторазведке: наземная магнитная съемка, аэромагнитная съемка, гидромагнитная съемка /Под ред. Ю.С.Глебовского и В.Е.Никитского. Л.: Недра, 1981. 364 с.
3. Логачев А.А., Захаров В.П. Магниторазведка. Изд. 5-е, перераб. и доп. – Л.: Недра, 1979. 351 с.
4. Магниторазведка: Справочник геофизика/ Под ред. В.Е. Никитского и Ю.С. Глебовского. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. 470 с.
5. Соколов, А. Г. Полевая геофизика [Электронный ресурс]: учебное пособие / А. Г. Соколов, О. В. Попова, Т. М. Кечина. - Электрон. текстовые данные. - Оренбург : Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2015. - 160 с. - 978-5-7410-1182-9. - Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/33649.html>

Дополнительная литература

1. Гринкевич Г.И. Магниторазведка: Учебник. – Екатеринбург: УГГГА, 2001. – 308 с.

2. Гордин В.М., Розе Е.Н., Углов Б.Д. Морская магниторазведка. М.: Недра, 1986. -232 с.
3. Магнетизм горных пород / Т. Нагата; Пер. с англ. В. П. Августиновича и др. ; Под ред. д-ра физ.-мат. наук Г. Н. Петровой. - М. : Мир, 1965. - 347 с.
4. Миков Д.С. Методы интерпретации магнитных аномалий. Томск.: изд. ТПИ, 1975. -180с.
5. Ревякин П.С. Бредовой В.В., Ревякина Э.А. Высокоточная магниторазведка. М.: Недра, 1986. 275 с.
6. Скважинная магниторазведка: Методические рекомендации в двух частях. Под ред. В.Н.Пономарева, А.Н.Авдониной.-Свердловск:ПГО «Уралгеология», 1984.-240 с.
7. Стадухин В.Д.,Туранов В.М., ШабановаН.Н. и др. Метод искусственного подмагничивания при поисках магнетитовых месторождений: Методические рекомендации.-Свердловск: УНЦ АН СССР.1982.
8. Тафеев Г.П., Соколов К.П. Геологическая интерпретация магнитных аномалий. Л.: Недра, 1981. 327 с.
9. Трухин В.И. Введение в магнетизм горных пород.-М.: Изд МГУ, 1973.
10. Храмов А.Н., Шолпо Л.Е. Палеомагнетизм: Принципы, методы и геологические приложения палеомагнитологии. Труды Всесоюзного нефтяного научно-исследовательского геологоразведочного института (ВНИГРИ). Выпуск 256., 1967.- 224 с.
11. Хасанов Д.И. Магниторазведка. Казань: Казанский государственный университет, 2009г.
12. Яновский Б.М. Земной магнетизм. Л.: Изд-во ЛГУ, 1978. 592 с.

Единое окно доступа к образовательным ресурсам - Режим доступа:
<http://window.edu.ru>

Составитель: _____ Л.А. Болотнова, доцент, к.г.-м.н.
подпись

Министерство образования и науки Российской Федерации

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Уральский государственный горный университет»

Г. С. Возжеников, Ю. В. Бельшев

РАДИОМЕТРИЯ
И
ЯДЕРНАЯ ГЕОФИЗИКА

Екатеринбург – 2020

Ядерные методы в разведочной геофизике

Радиометрия и ядерная геофизика – научные дисциплины, входящие составными разделами в современную область знаний среди наук о земле – «разведочную геофизику».

В отличие от «большой геофизики», которая имеет отношение к физическим процессам глобальных масштабов, протекающим в околоземном пространстве или на значительных глубинах внутри Земли, – **объектом** исследований разведочной геофизики является земная кора и скрытые в ней минеральные ресурсы.

Предметом исследований разведочной геофизики являются физические поля, в особенности их деформации (аномалии), вызываемые присутствием в природных средах объектов, отличающихся по физическим свойствам от вмещающих пород.

Радиометрия объединяет в своем составе методы, основанные на изучении *естественной* радиоактивности природных сред, а **ядерная геофизика** имеет дело с *искусственно*-радиоактивными полями.

Несмотря на очевидную общность радиометрических и ядерно-геофизических методов, в основе которых лежит явление радиоактивности, существует различие в областях применения и характере решаемых задач с использованием естественной и искусственной радиоактивности.

Главной **задачей** радиометрических исследований является получение сведений, которые могут оказаться полезными (или решающими) при поисках, разведке и добыче радиоактивных руд и полезных ископаемых, генетически или парагенетически связанных с естественно-радиоактивными элементами (ЕРЭ). Радиометрические измерения при этом настолько же целесообразны, насколько необходимы, например измерения напряженности магнитного поля при поисках и разведке магнетитовых руд. Кроме главной, существуют и другие задачи, решение которых облегчается при наличии данных об особенностях поведения естественной радиоактивности природных сред в изучаемом регионе.

Хорошо известна высокая эффективность воздушной или автомобильной γ -спектрометрии для геологического картирования горных пород (например гранитов), отличающихся повышенными величинами кларков ЕРЭ. Минимальными значениями γ -полей характеризуются ультрабазиты, а также отложения известняков и некоторых других пород. Радиометрические

исследования широко используются при разведке и эксплуатации месторождений калийных солей, горючих сланцев, углей, фосфоритов, бокситов, редкометальной минерализации и других месторождений, связанных с аномальными проявлениями естественной радиоактивности.

Применение методов, основанных на использовании искусственной радиоактивности, оказалось эффективным на разных стадиях геологоразведочных работ (съемка, поиски, разведка и эксплуатация) применительно к очень широкому перечню полезных ископаемых.

Топливо (нефть, газ, уголь, уран), руды черных, цветных, редких и благородных металлов, месторождения нерудных полезных ископаемых (фосфориты, флюориты, сырье для керамической промышленности, асбест, пьезооптическое сырье), другие виды минерального сырья – объекты, поиски, разведку и эксплуатацию которых в настоящее время трудно проводить без привлечения ядерно-геофизических методов.

Остановливаясь на областях применения радиометрических и ядерно-геофизических методов, следует подчеркнуть, что получаемые с их помощью сведения об особенностях состава и свойств природных сред носят дистанционный характер. Речь идет об *изучении вещества на расстоянии*, что важно не только в практике геологоразведочных работ, но и для других целей. Так, с помощью γ - γ -плотномера, установленного на автоматической станции «Луна-13», были впервые получены сведения о плотности лунного грунта, а с помощью рентгенорадиометрического анализатора «РИФМА» (радиоизотопный флуоресцентный метод анализа) – сведения о составе лунных пород по трассам перемещения луноходов.

Существенным недостатком практически каждого из радиометрических методов является малая представительность получаемой информации, что объясняется большой поглощающей способностью твердых веществ по отношению к ядерным излучениям. По этой причине имеется отличие эффективности ядерных методов на разных стадиях геологоразведочных работ. Известно, что их поисковые возможности заметно уступают по эффективности результатам, получаемым на разведочной и, особенно, на эксплуатационной стадии, где ядерные методы практически незаменимы при контроле и управлении качеством минерального сырья.

В последние годы развивается новое направление в ядерно-геофизических исследованиях, связанное с дистанционным изучением особенностей состава околорудных гидротермально-измененных пород. Известно, что наличие ореолов гидротермального метасоматоза является

необходимой (хотя и недостаточной) предпосылкой для локализации оруденений гидротермального типа. Значительные размеры метасоматических ореолов, обычно во много раз превышающие размеры рудных тел, многократно увеличивают геохимическую «глубинность» ядерных методов, ориентированных на обнаружение и оконтуривание околорудных изменений.

Конечно, главная отдача от использования ядерных методов связана с *разведкой* месторождений, где они особенно широко используются для бескернавого определения границ коллекторов нефти и газа, мощности угольных, рудных подсечений и других целей, включая решение проблемы дистанционной оценки линейных запасов полезной компоненты в рудных интервалах разведочных скважин. Несмотря на значительную отдачу в использовании ядерных методов при поисках и разведке, их применение на стадиях *добычи* и *переработки* минерального сырья рассматривается как не менее перспективное.

Известно, что совершенствование технологических процессов на добывающих и перерабатывающих предприятиях во многом зависит от достоверной и оперативной информации о качестве минерального сырья. Широко используемые для этой цели традиционные методы опробования и химического анализа во многих случаях не в состоянии удовлетворить требованиям современного производства в основном из-за низкой оперативности. Именно по этой причине на добывающих и перерабатывающих предприятиях все шире и с возрастающими масштабами используются геофизические, и в первую очередь ядерно-геофизические методы экспрессного контроля качества минерального сырья [15,33,38,75].

Помимо предприятий по добыче урановых руд, опыт радиометрического и ядерно-геофизического контроля и обогащения сырья имеется и на объектах других отраслей. Например, на предприятиях цветной металлургии для контроля и управления качеством оловосодержащего сырья широко используется рентгенорадиометрический метод (РРМ), основанный на явлении фотопоглощения γ -лучей и на законе Мозли. На основе этого метода разработаны эффективные технологии контроля качества полиметаллических руд на Pb и Zn, W и Mo, Ti в ильменитовом концентрате, Nb и Ta в редкометалльных карбонатитах, другие полезные ископаемые, включая Sb, As и Ag. Для контроля качества руд легких элементов (Li, Be, B) высокоэффективными оказались методы нейтронной геофизики из-за высоких сечений захвата тепловых нейтронов ядрами лития и бора и благоприятной предпосылки для фотонейтронного расщепления бериллия.

На горнорудных предприятиях черной металлургии в последнее время начал применяться γ -абсорбционный метод, позволяющий получать оперативные сведения о содержании полезной компоненты в исследуемом материале так называемого квазибинарного состава. Наиболее подробно этот метод разработан применительно к хромитовым рудам Донского горно-обогатительного комбината (ГОКа), где использовался в различных вариантах, включая непрерывный анализ на конвейерной ленте.

Предложенная и разработанная уральскими геофизиками (Институт горного дела УрО РАН и кафедра ядерной геофизики УГГГА) технология γ -абсорбционных измерений на Сг оказалась универсальной, принципиально пригодной для квалитетических целей при эксплуатации месторождений, руды которых по γ -лучевым свойствам могут быть отнесены к квазибинарным. Можно показать, что кроме хромитов к таким рудам относятся также марганцевые, железные и некоторые другие, например целестиновые, а также бруситы (если оценивать их качество по содержанию СаО).

Применительно к железным рудам γ -абсорбционный метод (ГАМ) может оказаться полезным при необходимости получения сведений о содержании так называемого общего Fe или когда связь между магнитной восприимчивостью и массовой долей железа оказывается неустойчивой.

При благоприятном поведении элементного состава матрицы γ -абсорбционный метод оказывается весьма эффективным при контроле и управлении качеством Mn-содержащего минерального сырья. В последнее время уже получены положительные результаты по использованию γ -просвечивания в условиях ферросплавного производства для целей дозирования марганцевого агломерата. Интересные результаты получены с помощью γ -абсорбционных измерений при оценке качества огнеупорного сырья (бруситы и продукты их переработки – периклазовый порошок).

В отличие от многочисленных разновидностей γ - γ -метода, работающих в режиме «отражения», γ -просвечивание позволяет получать экспрессную и достоверную информацию о *количестве* дробленого материала, прошедшего через рудоконтрольный пункт за произвольное время. Имеются и другие примеры эффективного использования методов ядерной геофизики в практике горнодобывающих работ, однако подлинные возможности ядерных и других геофизических методов для контроля и управления качеством минерального сырья еще далеко не исчерпаны.

Главным препятствием для более широкого использования прогрессивных «горно-геофизических» технологий является практическое

отсутствие геофизической службы на горно-обогатительных комбинатах ряда отраслей. Но даже и там, где такие службы в свое время были сформированы (урановое и редкометальное сырье, некоторые предприятия цветной и черной металлургии), ощущается острый недостаток геофизиков «горного профиля», поскольку отсутствует целенаправленная подготовка таких специалистов. В технических вузах горно-геологического профиля отсутствуют выпускающие кафедры горной геофизики, хотя необходимость в геофизиках для горно-металлургических предприятий является очевидной.

Важной областью применения ядерных методов является их использование для аналитических целей, особенно для надежного и экспрессного определения массовых долей редких и драгоценных металлов. Например, с помощью γ -активационного метода присутствие Au в геологических пробах определяется практически немедленно по интенсивности аналитической линии γ -излучения изомера Au^{197m} , образующегося в результате ядерной реакции (γ, γ') за счет материнского изотопа Au^{197} . Для количественных определений Au широко используется также нейтронно-активационный анализ (НАА). В этом случае оказывается возможным определение Au в активированных пробах по искусственно-радиоактивному изотопу Au^{198} , который образуется в результате ядерной реакции (n, γ), идущей на тепловых нейтронах. При наличии достаточно мощных потоков нейтронного излучения, например с использованием нейтронных каналов реакторов атомных станций, оказывается возможным количественное определение содержания Au в пробах на кларковом уровне.

Нейтронный активационный анализ успешно используется в аналитических целях не только на Au, но и на другие элементы, включая редкоземельные. При этом в ряде случаев отсутствует необходимость «нейтронной накачки» исследуемых проб с помощью нейтронных каналов АЭС. К настоящему времени на вооружении геофизиков имеются полевые лаборатории с γ -спектрометрической аппаратурой и источниками нейтронов с выходом до 10^{11} н/с. Гамма-спектры активированных проб регистрируются с помощью полупроводниковых детекторов, а для расшифровки и интерпретации спектров применяется бортовая ЭВМ. Такая лаборатория для экспрессного многоэлементного анализа геологических проб создана, например, в Канаде [35]. Применение детекторов с высоким энергетическим разрешением позволяет идентифицировать одновременно более 20 редких элементов с пределом обнаружения 10^{-4} %. В полевых условиях используется также малогабаритная установка для многоэлементного нейтронно-активационного анализа, разработанная в США. В установке применяется калифорниевый

источник нейтронов с выходом $3 \cdot 10^7$ н/с (масса Cf^{252} – 12 мкг). Анализ ведется по короткоживущим радионуклидам, образующимся в результате ядерной реакции (n, γ). С помощью этой установки оказывается возможным экспрессное количественное определение Al и 12 редких элементов. Предел обнаружения Sc, V, Co, Se, Br, Ag и Dy – менее 1 мкг; Al, Ti, Cu и Gd – от 1 до 10 мкг; Ro и Ir – от 10 до 100 мкг [35].

Кроме отмеченных, имеются и другие варианты полевых ядерно-геофизических лабораторий, предназначенных для получения достоверной и экспрессной информации относительно особенностей элементного состава исследуемых природных сред. Например, на основе узкополосного дифференциального детектора (УДД) в НПО «Буревестник» разработана серия отечественных портативных рентгеновских приборов, обеспечивающих экспрессное определение ряда элементов, включая раздельное определение элементов со смежными атомными номерами, например Cr, Mn, Fe.

Особую роль в геологии и других отраслях знаний (археология, биология) играют способы датировки природных сред и живых организмов, в основе которых лежит постоянство скорости «остывания» любых, в том числе долгоживущих радионуклидов. К настоящему времени детально разработаны K-Ar, Rb-Sr, радиоуглеродный, U-Pb и другие методы определения абсолютного возраста самых разнообразных объектов.

Краткая история развития ядерных методов

Ядерная геохронология – это, пожалуй, первое приложение явления радиоактивности в геологии. Уже в 1902 г. П. Кюри, а вслед за ним Э. Резерфорд высказали мысль о том, что скорость радиоактивного распада элементов может быть использована в качестве эталона времени для определения абсолютного возраста горных пород. В 1907 г. эта идея получила практическое осуществление. Английский физик Б. Болтвуд по содержанию в горных породах U и конечного продукта его распада – Pb впервые определил абсолютный возраст урансодержащих минералов. В дальнейшем радиологические методы датировки минералов непрерывно совершенствуются и расширяются.

Кроме U-Pb-метода, разрабатываются U-He-, K-Ar-, Rb-Sr- и другие методы. В США в 1923 г. была организована специальная комиссия по измерению геологического возраста радиоактивными методами. В нашей стране такие измерения начали проводиться в Радиевом институте с 1924 г. Отечественные специалисты В. Г. Хлопин, К. А. Ненадкевич, Э. К. Герлинг, Л. В. Комлев, И. Е. Старик и др. внесли большой вклад в разработку радиоактивных способов датировки горных пород.

Параллельно с разработкой ядерных методов непрерывно исследуются особенности распределения радиоактивных элементов в земной коре и изучается тепло, выделяющееся при распаде ЕРЭ. Ведущую роль в изучении распределения радиоактивных элементов в земной коре играли отечественные ученые. В 1912 г. по инициативе и под руководством академика В. И. Вернадского в России была организована Радиовая экспедиция Академии наук. В начале 30-х годов проблемы ядерной геохронологии и радиотермии определились настолько отчетливо, что появилась самостоятельная отрасль геологии – радиогеология. Основоположником радиогеологии как самостоятельной ветви наук о Земле является В. И. Вернадский. Большой вклад в развитие радиологии внесли А. Е. Ферсман, В. Г. Хлопин, К. А. Ненадкевич, А. П. Соколов, И. Е. Старик, Г. В. Войткевич, В. И. Баранов и др.

С открытием явления радиоактивности (А. Беккерель, 1896 г., М. Кюри, 1898 г.) непрерывно разрабатываются методы исследования этого фундаментального явления. Разрабатываются также методы поисков и разведки месторождений радиоактивных руд, других полезных ископаемых, связанных с радиоактивностью.

Первые полевые работы, связанные с изучением радиоактивности, были выполнены отечественными геофизиками на урановом месторождении Тюя-Муюн (Средняя Азия). Здесь в 1923 г. А. П. Кириковым впервые был применен эманационный радоновый метод с целью поисков рудных тел на площадях, перекрытых чехлом четвертичных отложений. Несколько позже (1923-1925) Л. Н. Богоявленским были выполнены первые измерения естественного γ -излучения с целью поисков полезных ископаемых.

Эманационная съемка, разновидности γ -измерений (включая γ - γ -каротаж скважин), некоторые виды радиометрического анализа геологических проб, γ -опробование руд в условиях естественного залегания впервые возникли в нашей стране. Некоторые из этих методов параллельно развивались в Германии; в США они начали применяться на несколько лет позже.

В 1924-1925 гг. были организованы радиометрические комитеты при Геолкоме (А. П. Кириков) и при Институте прикладной геофизики (Л. Н. Богоявленский). Исследования велись как по линии полевых радиометрических измерений, так и по линии исследования радиоактивности геологических коллекций образцов горных пород. Уже в 1925 г. в результате радиометрического изучения коллекций геолога С. Ф. Машковцева было открыто Табошарское месторождение урановых руд в Средней Азии. В 1926-1927 гг. на этом месторождении были выполнены эманационные и γ -измерения, позволяющие обнаружить новые рудные тела.

Существенную роль в разработке радиометрических методов как методов разведочной геофизики сыграл радиометрический кабинет при Ленинградском центральном научно-исследовательском геологоразведочном институте (А. П. Кириков, А. Г. Граммаков, Г. В. Горшков, Б. С. Айдаркин, П. Н. Тверской) и радиометрический кабинет при лаборатории ЦНИГРИ в Москве (В. И. Баранов, Е. Г. Грачева).

Курс лекций по радиометрии впервые прочитан Л. Н. Богоявленским в 1923-1924 гг. в Петроградском горном институте. В 1930 г. в Московском геологоразведочном институте создана первая в стране кафедра радиометрии во главе с В. И. Барановым (в настоящее время – кафедра ядерной геофизики и геоинформатики, зав. кафедрой – проф. А. А. Ники-тин).

Мощным толчком к дальнейшему развитию ядерно-геофизических методов послужила проблема поисков, разведки и эксплуатации месторождений нового вида энергетического и стратегического сырья – урана. С этой целью уже в первые послевоенные годы совершенствуется техника и методика радиометрических измерений. Появляются автомобильный и воздушный варианты γ -съемки. Развивается теория этих методов, методика измерений и способы интерпретации результатов. Создается и внедряется в практику γ -спектрометрическая аппаратура, позволяющая получать сведения о долях К, U и Th в суммарной γ -активности пород. А. Г. Граммаков, В. Л. Шашкин и др. разработали метод анализа радиоактивности горных пород в условиях естественного залегания (*in situ*) и в лабораториях. Полевые методы измерений естественной радиоактивности к настоящему времени достигли высокой степени развития. Эти методы в разных модификациях, от аэро- γ -спектрометрии до γ -измерений в скважинах (приоритет в изобретении γ -каротажа принадлежит отечественным геофизикам: Г. В. Горшков, Л. М. Курбатов, В. А. Шпак – 1935 г.) стали неотъемлемой частью геолого-съемочных, поисковых, разведочных и эксплуатационных работ.

Собственно ядерно-геофизические методы, составляющие арсенал современных средств ядерной геофизики и основанные на эффектах взаимодействия ядерных излучений с веществом, появились позже радиометрических методов. Их появление связано с потребностями отраслей хозяйства в различных видах минерального сырья: от нефти, газа и угля до редких и драгоценных металлов. Возможности ядерных методов заметно расширились благодаря развитию атомной энергетики, когда оказалось возможным получение в широких масштабах источников α -, β -, γ - и n -излучений.

Среди ядерно-геофизических методов важное значение принадлежит методам нейтронной геофизики, среди которых выделяется нейтронный активационный анализ. В его основе лежит явление искусственной радиоактивности, за открытие которого в 1934 г. французские физики Ирен и Фредерик Жолио-Кюри были удостоены Нобелевской премии. Несколько позже итальянский физик Э. Ферми предложил использовать нейтронное излучение для изучения состава вещества. Образующиеся в результате взаимодействия нейтронов с ядрами вещества искусственно-радиоактивные продукты являются объектом изучения в активационном анализе.

Вслед за фундаментальным открытием явления искусственной радиоактивности были предприняты успешные попытки использовать его для прикладных целей в различных областях науки и техники, в том числе и в геологии. В 1935 г. венгерские ученые Хевизи и Леви исследовали искусственно-радиоактивные изотопы, образующиеся при облучении нейтронами редкоземельных элементов. Эти работы положили начало развитию нейтронного активационного анализа. В 1940 г. Р. Е. Фирон предложил использовать активацию нейтронами Al для расчленения горных пород в скважинах при поисках бокситов. В патентной заявке содержалась схема глубинного зонда, в котором источник нейтронов заключался между двумя детекторами γ -лучей. При подъеме снаряда по скважине верхний детектор регистрировал интенсивность естественного γ -излучения, а нижний – суммарное γ -излучение (естественное и искусственно созданное).

В нашей стране предложение об использовании искусственной радиоактивности для литологического расчленения горных пород в скважинах было впервые высказано в 1946 г. А. А. Коржевым. Реализация этого предложения была начата в 1950 г. в Московском институте нефтяного хозяйства по инициативе проф. В. Б. Лапука, а с 1953 г. в Институте нефти АН СССР под руководством академика Г. Н. Флерова и проф. Ф. А. Алексеева.

Важным достижением в совершенствовании технологии геофизических исследований скважин следует считать предложенный в 1942 г. физиком-ядерщиком Б. Понтекорво нейтронный γ -метод, который позволил получать информацию о распределении H по оси скважин. Появление этого метода по праву считается крупным «подарком» геологии со стороны физиков, поскольку благодаря возможности получения дистанционной информации о распределении водорода по разрезу скважины геологи оказались в состоянии перейти на бескерновое бурение нефтяных скважин.

В 1947 г. Холленбах предложил γ - γ -метод, основанный на регистрации рассеянного γ -излучения. Физической основой этого метода является эффект

Комптона, названный так в честь лауреата Нобелевской премии, исследовавшего процессы взаимодействия γ -квантов с электронами.

Период с 1950 г. характеризовался исследованиями по усовершенствованию γ - γ -метода. В 1954 г. метод впервые был успешно испытан для выделения рудных (М. М. Соколов, А. П. Очкур) и угольных подсечений в скважинах (Ю. П. Булашевич, Г. М. Воскобойников, 1955-1957 гг.). В 1957 г. Г. М. Воскобойников предложил модификацию γ - γ -каротажа с источниками мягких γ -лучей, названную им селективным γ - γ -каротажем (ГГК-С). Этот метод обладает высокой чувствительностью даже к небольшим изменениям эффективного атомного номера природных сред. В определенных условиях с помощью ГГК-С оказалось возможным определение концентрации тяжелых металлов в рудах (Г. М. Воскобойников) и зольности каменных углей (В. И. Уткин, 1966 г.). Значительный вклад в теорию и практику γ - γ -измерений внесли Е. М. Филиппов, И. Г. Дядькин, В. А. Арцыбашев и др.

В качестве важного этапа развития методов, основанных на взаимодействии γ -лучей с веществом, следует отметить исследования Л. Рейфела и Р. Хемфриса по рентгенофлуоресцентному анализу вещества с использованием источников γ -лучей. В 1958 г. А. Л. Якубович и В. Ю. Залесский разработали методику и аппаратуру для количественных определений металлов в геологических пробах, доказав реальную возможность применения метода, названного ими рентгенорадиометрическим (РРМ). Важным этапом в развитии этого метода были работы специалистов кафедры ядерной геофизики Ленинградского университета (В. А. Мейер, В. С. Нахабцев и др.) по созданию скважинного варианта РРМ. Разработка РРМ послужила основой для широкого использования рентгенофлуоресцентного метода при исследовании состава руд в горных выработках (Е. П. Леман и др.), на обнажениях, т. е. в естественном залегании. В дальнейшем РРМ стал использоваться также как средство контроля и сортировки минерального сырья на ГОКах при добыче и обогащении руд цветных металлов.

Для контроля и управления качеством минерального сырья и продуктов переработки руд черных металлов весьма эффективным оказался также γ -абсорбционный метод, в разработке которого большую роль сыграли уральские геофизики (С. Г. Возжеников, Ю. В. Белыйшев и др.).

В начале 60-х годов появились работы геофизиков Московского геологоразведочного института (В. М. Бондаренко, Г. Г. Викторов и др.), связанные с разработкой нового способа подземных геофизических исследований, основанного на регистрации проникающего космического излучения.

В середине 50-х годов заметно усилилось внимание к методам нейтронной геофизики. В 1956 г. академик Г. Н. Флеров обосновал применение так называемого импульсного варианта нейтрон-нейтронного каротажа (ННК) для решения ряда проблем нефтяной геофизики, например установление положения водонефтяного контакта в скважине. Появление импульсного нейтрон-нейтронного каротажа (ИННК), разработка которого была выполнена С. А. Кантором, Ю. С. Шимилевичем, Б. Г. Ерозолимским, А. С. Школьниковым, Д. Ф. Беспаловым (ВНИИ ядерной геофизики и геохимии), ознаменовало начало внедрения скважинных генераторов нейтронов.

В рудной геофизике ядерные методы появились несколько позже, чем в нефтяной отрасли. В начале 60-х годов появились первые технологии дистанционного определения линейных запасов полезных ископаемых в рудных подсечениях разведочных скважин, пройденных с недостаточным выходом керна или его отсутствием: Си в медных колчеданах (Г. С. Возжеников, 1961 г.), Al в бокситах (И. Н. Сенько-Булатный, 1963 г.), черные металлы (К. И. Якубсон, 1964 г.), F во флюоритовых рудах (В. Я. Бардовский, 1965 г.). Бериллий в редкометальных рудах – И. П. Кошелев, А. К. Сенько, Е. М. Филиппов, В. В. Шестаков и др., 1959-1966 гг.

С появлением полупроводниковых детекторов были решены задачи о редкометальных ассоциациях в связи с прогнозированием рудных месторождений (Au в черных сланцах Средней Азии – П. А. Ваганов, 1981 г.).

Историю развития методов ядерной геофизики невозможно с необходимыми подробностями изложить в вводном разделе курса лекций. Перечислим лишь основные организации, без упоминания которых невозможно осветить даже ключевые моменты развития ядерно-геофизических методов в нашей стране. В дополнение к уже упоминавшимся учреждениям или лабораториям, сыгравшим основополагающую роль в формировании ядерного направления в разведочной геофизике, отметим, что некоторые лаборатории или научные группы в разное время вошли в состав крупных научно-исследовательских центров – ВНИИ ядерной геофизики и геохимии, ВНИИ разведочной геофизики, ВНИИ минерального сырья, ВНИИ радиационной техники, ВНИИ геофизических исследований скважин и др.

Были созданы ядерно-геофизические лаборатории при Институте геофизики Уральского научного центра АН (Ю. П. Булашевич), при Институте геологии и геофизики Сибирского отделения АН (Е. М. Филиппов) и др.

Еще на рубеже 40-50-х годов по инициативе академика И. В. Курчатова для обеспечения специалистами научных и производственных организаций в ряде вузов страны была организована подготовка инженеров выпускающими

кафедрами ядерно-геофизического профиля: в Московском геологоразведочном институте – МГРИ (В. И. Баранов, А. С. Сердюкова, Д. Ф. Зимин), Ленинградском университете – ЛГУ (В. А. Мейер, А. А. Са-турин, П. А. Ваганов), Ленинградском горном институте – ЛГИ (Г. Ф. Новиков, Ю. Н. Капков, А. Я. Синицын), Московском институте нефтехимической и газовой промышленности – МИНХиГП (В. Н. Дахнов, В. В. Ларионов, Д. А. Кожевников), Свердловском горном институте – СГИ (Н. А. Иванов, Ю. П. Булашевич, Г. С. Возжеников).

Из названия учебного пособия следует, что его основу составляет одноименный курс лекций, который преподается студентам геофизического факультета СГИ (ныне Уральский государственный горный университет) с 1952 г. Формирование и развитие курса, особенно разделов книги 1 и 2, происходило в значительной степени под влиянием профессоров Н. А. Иванова и Ю. П. Булашевича, которые в свое время (1952-1959) начинали преподавание этой дисциплины на геофизическом факультете СГИ. Наряду с отмеченным в книгу включены сведения, заимствованные из литературных источников (учебные пособия, монографии, справочники), а также оригинальные материалы из работ авторов.

Третий раздел книги составлен на основе спецкурса «Ядерная геофизика», который был подготовлен и впервые прочитан Г. С. Возжениковым в 1970 г. на геофизическом факультете СГИ для студентов старших курсов специализации ядерно-геофизического профиля.

Авторы будут признательны всем, кто сочтет возможным прислать замечания и пожелания по изложенному в курсе материалу по адресу: 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет, факультет геологии и геофизики, кафедра геофизики.

1. ОСНОВЫ УЧЕНИЯ О РАДИОАКТИВНОСТИ

1.1. Общие сведения

Радиоактивность – физическое явление, заключающееся в способности ядер некоторых элементов самопроизвольно распадаться с испусканием ядерных излучений. При этом исходное (*материнское*) ядро превращается в *дочернее* ядро – продукт распада. Явление радиоактивности связывают также со взаимным превращением одних элементарных частиц в другие (например, нейтронов в протоны).

Различают *естественную* и *искусственную* радиоактивность. Естественная радиоактивность наблюдается у неустойчивых изотопов, существующих в природе. Искусственная радиоактивность – радиоактивность нуклидов, полученных с помощью ядерных реакций. При этом ядерные свойства данного радионуклида не зависят от способа его получения.

История открытия естественной радиоактивности связывается с именем немецкого физика Рентгена, который в 1895 г. открыл лучи, впоследствии названные его именем. В первых опытах испускание так называемых *X*-лучей сопровождалось флуоресценцией стеклянных стенок рентгеновской трубки. Вскоре были выполнены исследования флуоресценции, чтобы выяснить, всегда ли она сопровождается испусканием рентгеновского излучения. Опыты проводились с завернутыми в черную бумагу фотопластинками, на которые накладывались разные вещества, флуоресцирующие под действием яркого света. Если флуоресценция сопровождается испусканием рентгеновских лучей, то фотопластинки должны почернеть.

При испытании большого количества флуоресцирующих веществ французский ученый Беккерель в 1896 г. обнаружил, что ожидаемый эффект дают урансодержащие вещества. Однако дополнительные опыты показали, что почернение фотопластинки не было связано с флуоресценцией, так как почернение наблюдалось даже в том случае, когда соли *U* не освещались. В дальнейшем было установлено, что наблюдаемое излучение характерно для всех соединений *U*, а наиболее эффективным был металлический *U*. Оказалось, что интенсивность излучения не зависит от внешних условий и не меняется со временем. Таким образом было установлено, что наблюдаемый эффект является внутренним свойством атомов *U*.

Свойство атомов (в то время еще не существовало представления об атомном ядре) урана испускать излучение Пьер и Мария Кюри назвали радиоактивностью. Вскоре супруги Кюри открыли радиоактивность другого тяжелого элемента – тория. Как и в случае с ураном, оказалось, что это явление

не связано с физико-химическим состоянием вещества, а является свойством элемента. Позднее анализ урансодержащих руд привел к открытию полония и радия, удельная радиоактивность которых оказалась значительно выше, чем у U и Th.

Впервые радиоактивное излучение было проанализировано Резерфордом при помощи опытов по наблюдению за его поведением в электрическом и магнитных полях и поглощению в веществе. В результате этих опытов установлено, что радиоактивные вещества испускают 3 вида лучей:

1. α -лучи – тяжелые положительно заряженные частицы, двигающиеся со скоростью $\sim 10^9$ см/с и поглощающиеся алюминиевой фольгой. Впоследствии было установлено, что этими частицами являются ядра ${}^4_2\text{He}$.

2. β -лучи – легкие заряженные частицы, двигающиеся со скоростью, близкой к скорости света и поглощаемые слоем алюминия толщиной в несколько мм. Этими частицами оказались электроны (в дальнейшем были обнаружены и положительно заряженные β -частицы – позитроны).

3. γ -лучи – сильно проникающее излучение, не отклоняющееся ни в электрическом, ни в магнитном полях. Природа γ -лучей – жесткое электромагнитное излучение с длиной волны менее 10 нм ($<10^{-9}$ м). Гамма-излучение связано с энергетической перестройкой ядер, испытывающих то или иное ядерное превращение.

1.2. Элементы строения атомных ядер

Атомное ядро представляет собою систему, состоящую из некоторого числа сильно связанных между собой частиц – протонов и нейтронов, которые обычно называют *нуклонами* (от лат. *nucleos* – ядро). Идея о протонно-нейтронном составе ядра была впервые высказана академиками Д. Иваненко и А. Амбарцумяном в 1930 г.

Протон (p) – элементарная частица, имеющая единичный положительный заряд, равный по абсолютной величине заряду электрона, представляет собою ядро основного изотопа водорода ${}^1_1\text{H}$. Таким образом, масса протона равна массе атома водорода за вычетом массы электрона. Так как масса атома H составляет 1,00814 атомных единицы массы (а.е.м.), а масса электрона составляет 0,00055 а.е.м., то масса протона равна 1,00759 а.е.м. ($1,672 \cdot 10^{-24}$ г.).

Нейтрон (n) – электрически нейтральная частица с массой, близкой и немного большей, чем у протона (1,00893 а.е.м., $1,674 \cdot 10^{-24}$ г.).

Количество протонов в ядре равно порядковому (атомному) номеру элемента в периодической системе Менделеева и обозначается Z . Общее количество протонов и нейтронов в ядре определяет его массовое число (атомный вес) и обозначается A . Число нейтронов в ядре равно $A-Z$.

Разновидности одного и того же химического элемента с одинаковыми значениями Z и разными массовыми числами называются *изотопами* (равноместными). Элементы с нечетными атомными номерами являются либо моноизотопными, либо состоят не более чем из двух изотопов. Четные элементы, как правило, являются полиизотопными.

Атомы с одинаковыми A , но разными Z (принадлежащим разным химическим элементам) называются *изобарами* (барос - вес).

Атомы с одинаковым числом нейтронов $A-Z$ называют *изотонами*.

В легких ядрах (с малым Z) обычно содержится равное или примерно равное количество протонов и нейтронов, в тяжелых ядрах нейтронов примерно в 1,5 раза больше, чем протонов. Связь Z с A для стабильных ядер описывается эмпирической формулой [41]

$$Z = \frac{A}{1,98 + 0,015A^{2/3}},$$

следовательно, для легких ядер отношение $Z/A \approx 0,5$.

Нуклоны, входящие в состав атомных ядер, испытывают конкуренцию кулоновских сил отталкивания и ядерных сил сцепления. Преобладание первых приводит к распаду ядра, вторых – к его устойчивому состоянию.

Сравнение массы атомного ядра с суммой масс входящих в его состав нуклонов показывает, что масса ядра всегда меньше суммы масс всех составляющих его протонов и нейтронов. Разность между суммой масс нуклонов и массой ядра называется *дефектом массы* Δm , определяет *энергию связи* ядра относительно составляющих его нуклидов. Если обозначить через m_p , m_n и $M_{\text{я}}$ соответственно массы p , n и ядра, то

$$\Delta m = [m_p Z + m_n (A - Z)] - M_{\text{я}}. \quad (1.1)^*$$

Согласно формуле Эйнштейна, каждому значению массы соответствует определенная энергия $E = mc^2$, так что энергию связи ядра W можно выразить следующим образом:

$$W = \Delta mc^2. \quad (1.2)$$

Энергия связи представляет собою ту энергию, которую надо затратить, чтобы разделить нуклоны, «упакованные» в ядре с плотностью порядка 10^8

* Здесь и далее для широко известных формул и определений ссылки не приводятся.

т/см³. Таким образом, энергия связи является мерой прочности ядра. Особенно велика энергия связи у четно-четных ядер, т. е. у ядер с четным числом протонов и нейтронов, например у ${}^2\text{He}^4$, ${}^6\text{C}^{12}$, ${}^8\text{O}^{16}$ и др.

Энергия связи, отнесенная к массовому числу, называется *удельной энергией связи*, или средней энергией связи нуклона в ядре, $\varepsilon = W/A$. Средняя энергия связи нуклона в ядре изменяется от ядру к ядру. На рис. 1.1 приводится зависимость ε от массового числа A .

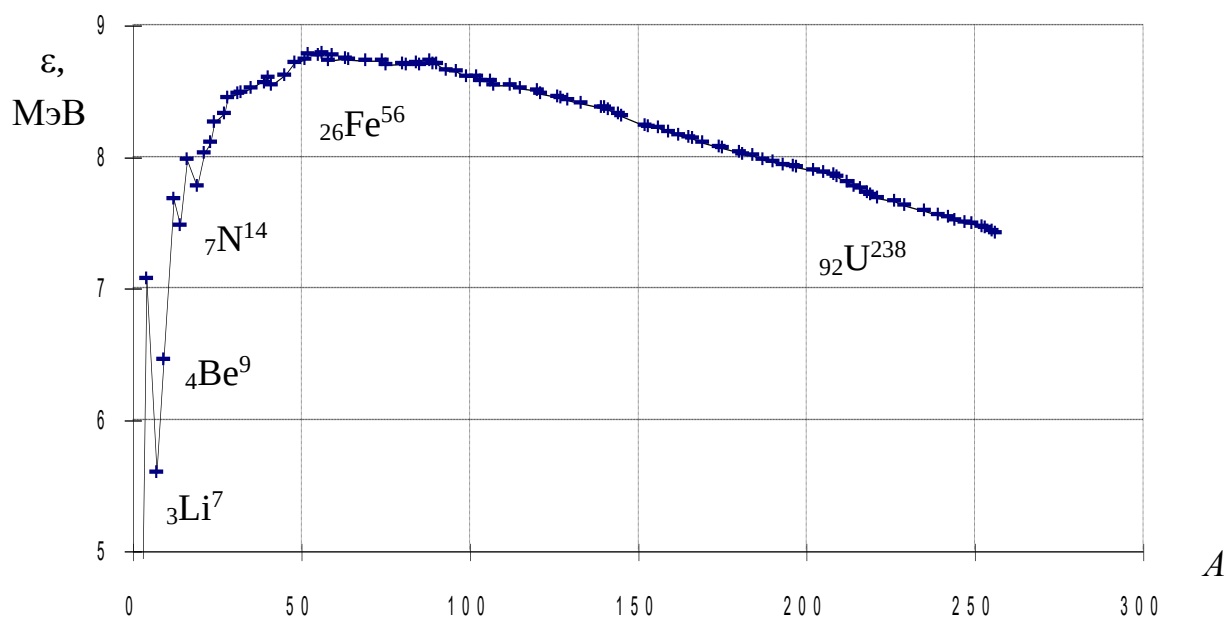


Рис. 1.1

Наименьшее значение энергии связи нейтрона имеет место для изотопа ${}^4\text{Be}^9$. В случае распада ${}^4\text{Be}^9$ на две α -частицы и нейтрон она составляет 1,67 МэВ, хотя энергия связи ядра ${}^4\text{Be}^9$, отнесенная ко всем девяти составляющим его нуклонам, равна 6,46 МэВ.

Ядра тяжелых элементов имеют очень большую энергию связи относительно всех составляющих его нуклонов, однако, например, для ${}^{92}\text{U}^{238}$ энергия связи в случае распада этого ядра на ${}^2\text{He}^4$ и ${}^{90}\text{Th}^{234}$ оказывается отрицательной (-4,25 МэВ). Это означает, что ядро урана является неустойчивым и распадается на α -частицу и ядро ${}^{90}\text{Th}^{234}$ с выделением избытка энергии. Точно так же U обладает отрицательной энергией связи для двух примерно равных по массе осколков деления, что определяет спонтанное (самопроизвольное) деление ядер U на два примерно равных по массе осколка деления.

Нуклоны, находящиеся на периферии атомных ядер, окружены не со всех сторон другими нуклонами, поэтому они связаны ядерными силами слабее

внутренних. Кроме того, ядерные силы начинают проявлять себя лишь на расстоянии, сравнимом с размером нуклона, в результате чего нуклоны в ядре сцеплены фактически лишь со своим ближайшим окружением. Следовательно, ядерные силы в отличие от кулоновских обладают свойством насыщения. По мере роста массового числа A уменьшается доля поверхностных нуклонов, и средняя энергия связи, приходящаяся на нуклон, сначала растет (рис. 1.1). По мере увеличения Z кулоновское отталкивание нуклонов непрерывно растет, поскольку эти силы имеют радиус действия порядка атомных размеров, и, следовательно, каждый протон взаимодействует со всеми другими протонами ядра.

Для сохранения устойчивости тяжелые ядра содержат большее количество нейтронов, чем протонов: с ростом числа нейтронов увеличивается среднее расстояние между протонами и уменьшаются кулоновские силы отталкивания. Однако эти «меры» лишь частично компенсируют рост сил отталкивания в ядре по мере увеличения A , в связи с чем удельная энергии связи ϵ начинает уменьшаться уже при $A > 60$. Ядра с $A > 230$ становятся неустойчивыми.

1.3. Виды ядерных превращений

Ядерные (или *радиоактивные превращения*) происходят с изменением строения и энергетического состояния ядра атома и сопровождаются испусканием или захватом заряженных частиц, делением ядра или испусканием коротковолнового γ -излучения электромагнитной природы.

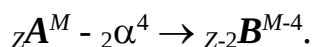
Различают следующие основные виды *ядерных превращений*: α -распад, β -распад (электронный β^- -распад, позитронный β^+ -распад и электронный захват), изомерный переход (ИП) и деление ядер (f -распад).

1.3.1. Альфа-распад

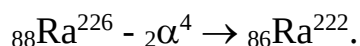
Заключается в превращении материнского ядра A в дочерний продукт B путем испускания α -частицы, представляющей собою ядро ${}^4_2\text{He}$. Альфа-частицы имеют массу, равную 4,002264 а.е.м. ($6,598 \cdot 10^{-24}$ г.), и несут двойной электрический заряд, равный $3,2044 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Радиоактивные элементы испускают α -частицы разной энергии (2-10 МэВ), однако для каждого элемента начальная энергия α -частиц постоянна и является характеристической величиной, если не учитывать особенности, связанные с так называемой «тонкой структурой» α -спектров.

Вылет α -частицы с кинетической энергией E_α из ядра радиусом R_0 с потенциальным барьером $U_0 > E_\alpha$ представляет случай *туннельного перехода* частицы через кулоновский барьер (в силу соотношения неопределенности $\Delta E \Delta t \sim h$). Схема α -распада записывается следующим образом:



Другими словами, заряд дочернего ядра в случае α -распада уменьшается на 2, а массовое число на 4 соответствующие единицы. Дочерний продукт α -распада перемещается в таблице Менделеева на 2 клетки влево. Примером α -распада может служить превращение Ra в Rn (эманация Ra):



Альфа-распад часто сопровождается γ -излучением с энергией E_γ от десятков до первых сотен кэВ. Возникновение γ -лучей связано с *тонкой структурой* α -спектра, сущность которого заключается в том, что часть материнских ядер испускает α -частицы с энергией $E_\alpha < E_\alpha^{\max}$. Дочерние ядра при этом оказываются в состоянии возбуждения и переходят в *основное энергетическое состояние* (уровень, при котором ядро обладает наименьшей эквивалентной массой) путем высвечивания избыточной энергии в виде γ -излучения сравнительно небольшой энергии и интенсивности.

При прохождении через вещество энергия α -частицы расходуется в основном на ионизацию и возбуждение атомов. Вследствие большой начальной энергии при столкновении с молекулами поглощающей среды α -частица образует на длине своего пробега (трека) сотни тысяч пар ионов. В этом смысле говорят о большой ионизирующей способности α -частиц. Оценим количество пар ионов, которые образуются на длине трека α -частицы при распаде ядер ${}_{84} \text{Po}^{210}$. Имея в виду, что $E_\alpha^{\text{Po}} = 5,3$ МэВ, а энергия, затрачиваемая на образование одной пары ионов, составляет ~ 30 эВ, имеем около 175 тысяч эффектов ионизации. Из-за относительно малой величины энергии, затрачиваемой α -частицей на один акт ионизации, α -частица после взаимодействия с атомом не меняет направления своего переноса, ее траектория движения в веществе является прямолинейной.

Отличительной способностью α -частиц является их малая проникающая способность. В зависимости от начальной энергии пробег α -частиц в воздухе составляет несколько сантиметров и может быть найден из следующей эмпирической формулы:

$$R_\alpha(E) = 0,316 E_\alpha^{3/2}, \quad (1.3)$$

где E_α - энергия α -частицы, МэВ;

$R_\alpha(E)$ - пробег α -частицы в воздухе, см.

В твердом веществе пробег еще меньше, измеряется микронами и может быть найден с помощью эмпирической формулы Брегга-Климэна:

$$L_\alpha(E) = 3,2 \cdot 10^{-4} R_\alpha(E) \frac{\sqrt{A}}{\rho}, \quad (1.4)$$

где A и ρ - соответственно атомный вес и плотность среды переноса α -частицы с энергией E .

Поскольку начальная энергия вылета α -частиц для данного типа α -излучателя постоянна, то длина их пробега в каждом конкретном веществе является также постоянной величиной. Между длиной пробега α -частиц (их энергией) и постоянной распада α -излучателей λ существует тесная связь. Согласно правилу (закону) Гейгера-Неттола эта связь выражается следующим образом:

$$\lg \lambda = A \lg R_\alpha + B, \quad (1.5)$$

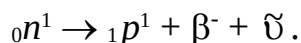
где A и B - коэффициенты, несколько отличающиеся для α -излучателей семейств урана и тория.

Ионизация и возбуждение α -частицами атомов различных веществ сопровождаются их химическими изменениями, нарушением кристаллической структуры твердых тел, выделением тепла, почернением фотопластинок, люминесценцией ряда веществ и другими физико-химическими явлениями. Явление люминесценции используется для регистрации ядерных частиц. Хорошим люминофором для регистрации α -частиц является сернистый цинк, активированный серебром $\text{ZnS}(\text{Ag})$.

1.3.2. Бета-распад

Различают три разновидности β -распада: электронный, позитронный и электронный захват (K -захват).

Электронный β -распад (β^- -распад). Заключается в ядерном превращении нейтрона в протон по следующей схеме:



Энергия β^- -распада ($E_\beta^{\max}$) распределяется сложным (случайным) образом между электроном и антинейтрино, поэтому энергетический спектр β -излучения в отличие от α -спектра, является непрерывным (рис. 1.2), причем

максимум кривой распределения β -частиц по энергиям приходится на энергию, составляющую примерно треть от $E_{\beta}^{\max}$.

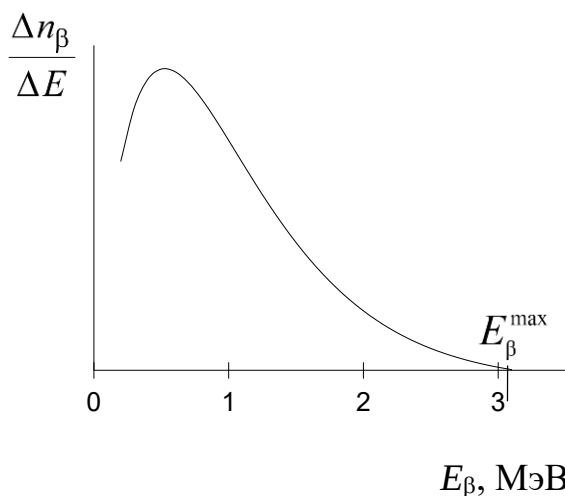
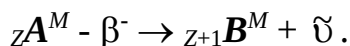


Рис. 1.2

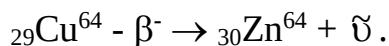
Часть дочерних ядер при своем образовании оказывается на промежуточных энергетических уровнях и при переходе на основной уровень испускают γ -лучи квантованных линий.

В результате электронного β^- -распада образуется дочернее ядро с тем же массовым числом, но его порядковый номер будет на единицу больше.

Схему β^- -распада можно представить следующим образом:



По этой схеме распадаются не только естественные радионуклиды, но и искусственно-радиоактивные изотопы, например:



Представление о частицах, не обладающих ни зарядом, ни массой покоя, было введено в 1930 г. Паули для объяснения непрерывности β -спектра; для таких частиц Ферми предложил термин «нейтрино» («маленький нейтрон», «нейтрончик»). Впоследствии была предложена концепция антинейтрино $\bar{\nu}$, согласно которой нейтрино ν испускается при β -распаде одновременно с позитроном, а $\bar{\nu}$ — вместе с электроном. Нейтрино и $\bar{\nu}$ отличаются противоположными направлениями спинов.

Специфические свойства нейтрино (отсутствие заряда и практическое отсутствие массы) делают чрезвычайно трудными опыт по их обнаружению. Оценка сечения взаимодействия нейтрино с ядром приводит к величине $\sigma \approx 10^{-44} \text{ см}^2$, что соответствует среднему пробегу в концентрированной среде ($n_a \sim 10^{22} \text{ атомов/см}^3$), равному $n_a \sigma \approx 10^{17} \text{ км}$.

Очевидно, что столь малый эффект взаимодействия нейтрино с веществом можно обнаружить лишь при наличии мощных потоков этих частиц. В последние годы уже возникал вопрос об использовании мощных потоков нейтрино подземных ядерных взрывов для нейтринного «просвечивания» Земли как планеты. Главной трудностью для реализации такого проекта является его большая стоимость.

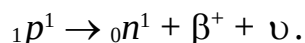
При прохождении электронов через вещество их энергия в основном расходуется на ионизацию и на возбуждение атомов. При больших энергиях электронов значительная ее часть затрачивается на образование электромагнитного излучения, называемого *тормозным*. Последнее связано с тем, что, в отличие от α -частиц, электроны взаимодействуют как с электронными оболочками атомов, так и с их ядрами. Так как массы взаимодействующих β -частиц и атомных электронов равны, то, помимо потерь энергии, электроны отклоняются от своего первоначального направления, т. е. рассеиваются. Траектории электронов не прямолинейны, а суммарная длина их пробега существенно превышает толщину слоя вещества, через который они могут пройти.

Между пробегом электронов и максимальной энергией β -спектра $E_{\max}$ существуют следующие эмпирические зависимости:

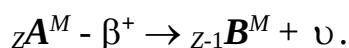
$$\begin{cases} R_m = 0,407 E_{\max}^{1,38}, & E_{\max} \leq 0,8 \text{ МэВ} \\ R_m = 0,54 E_{\max}, & E_{\max} > 0,8 \text{ МэВ}, \end{cases} \quad (1.6)$$

где R_m - массовый пробег, г/см²;
 $E_{\max}$ - энергия электронов, МэВ.

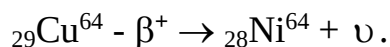
Позитронный β -распад (β^+ -распад). Заключается в ядерном превращении протона в нейтрон по следующей схеме:



В результате позитронного β -распада образуется дочернее ядро с тем же массовым числом, но с порядковым номером на единицу меньше:



Пример β^+ -распада для искусственно-радиоактивного изотопа ${}_{29}\text{Cu}^{64}$:



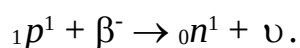
Так же, как и в случае β^- -распада, энергия позитронного распада $E_{\max}$ распределяется случайным образом между позитроном и нейтрино, поэтому энергетический спектр позитронного распада непрерывен.

Следует заметить, что превращение ${}_1p^1$ в ${}_0n^1$ надо понимать в условном смысле. Поскольку масса протона несколько меньше, чем масса нейтрона, то позитронный распад свободного протона невозможен. Однако для протона, связанного в ядре, подобное превращение возможно, так как недостающая энергия восполняется (дотируется) ядром.

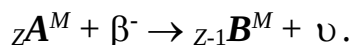
Позитрон, как и все античастицы, недолговечен. При взаимодействии позитрона с электроном возможно взаимное «уничтожение» этих частиц. В этом смысле говорят об *аннигиляции* позитрона. При аннигиляции позитрона и электрона возникают кванты электромагнитного поля. Число γ -квантов при аннигиляции определяется законами сохранения энергии и импульса. Наиболее распространена аннигиляция, в результате которой за счет античастицы образуется фотонная пара с энергией каждого из аннигиляционных квантов, равной энергии покоящегося электрона. Поскольку энергия электрона, находящегося в покое, равна $m_e c^2$, то β^+ -распад обычно сопровождается так называемого аннигиляционным γ -излучением с энергией 511 кэВ. Таким образом, позитронные излучатели возможно принципиально обнаружить по наличию аннигиляционного излучения.

В качестве примера можно сослаться на возможность дистанционного определения Cu по искусственно-радиоактивному изотопу $^{64}_{29}\text{Cu}$. В схеме его распада имеется позитронное излучение, поэтому присутствие меди обнаруживается по γ -лучам с энергией 511 кэВ.

Электронный захват (K -захват). Третья разновидность β -распада – электронный захват (ϵ) был открыт американским физиком Альварецом в 1938 г. Сущность электронного захвата заключается в захвате ядром электрона из внутренней оболочки собственного атома. При этом один из протонов внутри ядра трансформируется в нейтрон, а за пределы ядра выбрасывается нейтрино:



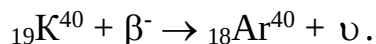
В результате электронного захвата образуется дочернее ядро с тем же массовым числом, но с порядковым номером на единицу меньше:



Природа электронного захвата была раскрыта при изучении сопровождающего его рентгеновского излучения. Оказалось, что оно соответствует переходу электронов на освободившееся место в электронной оболочке, образовавшееся после электронного захвата. Электронный захват имеет существенное значение для тяжелых ядер, у которых K -оболочка расположена близко к ядру. Наряду с захватом электрона из K -оболочки (K -захват) значительно реже наблюдается захват электрона из L -оболочки (L -захват), M -оболочки (M -захват) и т. д.

Своеобразный характер процесса ЭЗ (не испускание, а захват электрона атомом) приводит к тому, что в случае ЭЗ постоянная распада λ оказывается в некоторой зависимости от внешних условий.

Примером K -радиоактивного ядра является изотоп ${}_{19}\text{K}^{40}$, захватывающий K -электрон и превращающийся в ядро ${}_{18}\text{Ar}^{40}$ по схеме:



Нейтрино, образующееся по этой схеме, отличается от нейтрино, связанного с позитронным излучением (β^{+} -распадом) своей монохроматичностью (моноэнергетичностью).

Ядерное превращение калия в аргон лежит в основе так называемого K - Ar -метода, который используется для определения абсолютного возраста калийсодержащих горных пород по количеству накопившегося аргона.

1.3.3. Изомерный переход

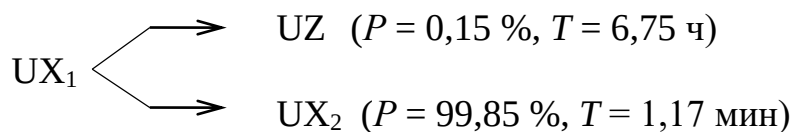
Один из видов ядерных превращений, представляющий собою переход ядра из *метастабильного* состояния в *основное*. Под метастабильным состоянием понимается такое возбужденное состояние ядра, период «высвечивания» которого по крайней мере на несколько порядков больше периода высвечивания при простом возбуждении ядра. Таким образом, состояние ядра будет метастабильным, если вероятность перехода его на основной уровень очень мала. Периоды полураспада *изомеров* (ядер в метастабильном состоянии) колеблются от 10^{-4} с до нескольких месяцев.

Переход ядер в метастабильное состояние осуществляется после ядерных превращений, происходящих в результате захвата тепловых нейтронов, фотонейтронного процесса, бомбардировки ядер тяжелыми частицами и т. д. Изомерный переход всегда сопровождается γ -излучением. В отдельных случаях, кроме γ -излучения при «успокоении» метастабильного ядра, имеет место испускание электронов или позитронов, а также электронов *конверсии*, возникающих в процессе прямой передачи энергии от возбужденного ядра к электронной оболочке.

Изомерный переход связан с явлением ядерной изомерии, проявляющейся в существовании радиоактивных ядер, одинаковых по числу Менделеева Z и по атомному весу A , но находящихся в разном энергетическом состоянии и отличающихся между собою по периоду полураспада.

Первая пара изомерных ядер была открыта в 1921 г. Ганом. Он обнаружил радиоактивное вещество UZ (${}_{91}\text{Pa}^{234}$), в точности совпадающее по номеру и массе с изотопом UX_2 , но отличающееся от него радиоактивными

свойствами. Оба изомера получаются с разной вероятностью P в результате β^- -распада одного и того элемента UX_1 (${}_{90}\text{Th}^{234}$):



и состоят из одинаковых ядер, но имеют разные периоды полураспада.

Разобраться в природе этого явления помогли опыты Курчатова и его сотрудников, открывших в 1935 г. существование изомерии у искусственно-радиоактивных ядер. В частности, искусственно-радиоактивный изотоп брома ${}_{35}\text{Br}^{80}$ характеризуется двумя периодами полураспада: 18 мин и 4,4 ч. Существование у одного ядра двух периодов полураспада можно понять, если предположить, что ядро ${}_{35}\text{Br}^{80}$ может возникать в двух изомерных состояниях: основном и возбужденном долгоживущем (метастабильном).

Стабильный (материнский) изотоп золота ${}_{79}\text{Au}^{197}$ в результате бомбардировки γ -квантами образует по ядерной реакции (γ , γ') дочерний продукт ${}_{79}\text{Au}^{197m}$ (метастабильный), который в отличие от материнского является радиоактивным с периодом полураспада 7,2 с. Изомерный переход ядер ${}_{79}\text{Au}^{197m}$ в основное состояние происходит путем испускания γ -квантов с энергий 279 кэВ. Регистрируя интенсивность γ -излучения, связанного с изомером ${}_{79}\text{Au}^{197m}$, оказывается возможной быстрая и надежная идентификация золота в исследуемых пробах.

1.3.4. Деление ядер

Термин «деление» (*f-распад*) применяется к процессам, когда атомное ядро, захватив нейтрон, расщепляется (делится) на две части (осколки деления), между которыми распределяются нуклоны исходного ядра (например, ${}_{92}\text{U}^{235}$): $Z_U = Z_1 + Z_2$; $A_U \cong A_1 + A_2$. Соотношение масс осколков деления может варьировать в широких пределах, но наиболее вероятное значение A_1/A_2 (или A_2/A_1) близко к 2 (0,5).

При делении тяжелого ядра высвобождается большая энергия. Этот вывод следует из сравнения масс делящегося ядра A_U и масс образующихся осколков A_1 и A_2 . Величину выделяющейся энергии Q_U можно оценить, имея в виду удельную энергию связи осколков $\bar{\epsilon}$ и параметр ϵ для урана:

$$Q_U = \Delta \epsilon A,$$

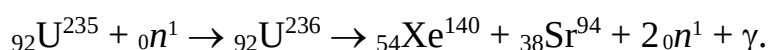
где $\Delta \epsilon = \bar{\epsilon} - \epsilon$; A – массовое число делящегося ядра.

Так как ϵ для ядер середины периодической системы примерно на 0,8 МэВ больше, чем $\bar{\epsilon}$ для ${}_{92}\text{U}^{235}$, получим: $Q_U = 235 \cdot 0,8 \approx 200$ МэВ.

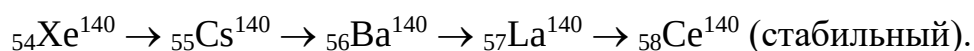
Подавляющая часть энергии деления проявляется в виде кинетической энергии осколков деления Q_f . Образующиеся при делении осколки являются радиоактивными (β -излучателями) и могут испускать *нейтроны деления*. Последнее обстоятельство определяет то, что процесс деления при определенных условиях может стать самоподдерживающимся с непрерывным выделением энергии. В этом и состоит основной принцип получения атомной энергии. Важнейшими материалами, испытывающими деление, являются: ${}_{92}\text{U}^{235}$, ${}_{92}\text{U}^{233}$ и ${}_{94}\text{Pu}^{239}$. Частицы с очень высокими энергиями могут вызывать деление и в других материалах (например, ядра ${}_{92}\text{U}^{238}$ делятся при их облучении быстрыми нейтронами).

В результате деления ядра испускаются *мгновенные* и *запаздывающие* нейтроны. Первые из них составляют ~99 % всех нейтронов деления и испускаются в течение 10^{-14} с за пределы ядра после акта деления. Большая часть мгновенных нейтронов имеет энергию от 1 до 2 МэВ, а распределение их по энергиям называется *спектром нейтронов деления*. Запаздывающие нейтроны испускаются с задержкой до нескольких секунд со спадающей интенсивностью. Запаздывающие нейтроны представляют особый интерес с точки зрения управления цепной реакцией. Регистрация запаздывающих нейтронов лежит в основе одного из методов количественного определения ${}_{92}\text{U}^{235}$ в природных средах.

Механизм деления обычно объясняется с помощью *капельной модели* ядра [41]. Схема деления ядра ${}_{92}\text{U}^{235}$ может быть представлена следующим образом:



Осколки деления являются β -излучателями. В частности, ${}_{54}\text{Xe}^{140}$ испытывает следующую цепочку β -превращений:



Как впервые показали Петржак и Флеров, ядра урана способны делиться не только под действием нейтронов, но и сами по себе, самопроизвольно, без внешнего воздействия (так называемого *спонтанное* деление).

Основные закономерности распространения изотопов

Большинство известных изотопов неустойчиво, но из 340 ядер, находящихся в природе, 273 относятся к стабильным, из которых очень небольшая часть обладает крайне слабой радиоактивностью.

Все известные нуклиды могут быть разделены на четыре типа в зависимости от четного или нечетного числа протонов и нейтронов в их

составе: четно-четный ${}^8\text{O}^{16}$ (известно 166 нуклидов), четно-нечетный ${}^4\text{Be}^9$ (55), нечетно-четный ${}^3\text{Li}^7$ (47), нечетно-нечетный ${}^5\text{B}^{10}$ (5). Из этих данных видно, что изотопы с четным Z и $N = A - Z$ преобладают над изотопами с нечетными Z и N . В то же время четно-четные ядра в природе наиболее распространены и наиболее стабильны. К ним относятся шесть изотопов: ${}^2\text{He}^4$, ${}^8\text{O}^{16}$, ${}^{12}\text{Mg}^{16}$, ${}^{14}\text{Si}^{28}$, ${}^{20}\text{Ca}^{40}$, ${}^{26}\text{Fe}^{56}$, пять из которых входят в число восьми главных химических элементов, слагающих верхнюю часть литосферы. Ядра с четным A более многочисленны, чем с нечетным A . Всего известно пять стабильных изотопов нечетно-нечетного типа: ${}^1\text{H}^2$, ${}^3\text{Li}^6$, ${}^5\text{B}^{10}$, ${}^7\text{N}^{14}$, ${}^{25}\text{V}^{50}$. Все остальные известные нечетно-нечетные ядра с $A > 14$ (включая ${}^{19}\text{K}^{40}$) β -радиоактивны.

Все тяжелые изотопы с $Z > 83$ радиоактивны, многие из них испытывают α -распад. Они группируются в четыре радиоактивных ряда: ториевый, нептуниевый, урановый и актиноурановый (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Четыре типа радиоактивных рядов

Ряд	Родоначалник ряда	Конечный продукт	Признак делимости на 4	Тип ядра
Ториевый	${}_{90}\text{Th}^{232}$	${}_{82}\text{Pb}^{208}$	$4n$	Четно-четный
Нептуниевый	${}_{93}\text{Np}^{237}$	${}_{83}\text{Bi}^{209}$	$4n + 1$	Нечетно-четный
Урановый	${}_{92}\text{U}^{238}$	${}_{82}\text{Pb}^{206}$	$4n + 2$	Четно-четный
Актиниоурановый	${}_{92}\text{U}^{235}$	${}_{82}\text{Pb}^{207}$	$4n + 3$	Четно-нечетный

В современную эпоху на Земле отсутствует нептуниевый ряд. Родоначалник этого ряда ${}_{93}\text{Np}^{237}$ получен искусственным путем.

На основании астрофизических данных по составу звездных атмосфер были получены данные о космическом (галактическом) распространении элементов и их изотопов [60] (рис. 1.3). Зависимость между распространением элемента и Z выражается следующими закономерностями:

1. Распространенность химических элементов с четным Z в общем более высокая, чем у элементов с нечетным Z . Эта закономерность получила название *правила Оддо-Гаркинса*.

2. Распространенность легких элементов с атомным номером $Z < 28$ резко преобладает над распространенностью остальных, более тяжелых элементов, за исключением Li, Be, B.

3. Существуют так называемые *магические числа*: 2, 8, 20, 50, 82, 126, относящиеся как к числу нейтронов, так и протонов в ядре.

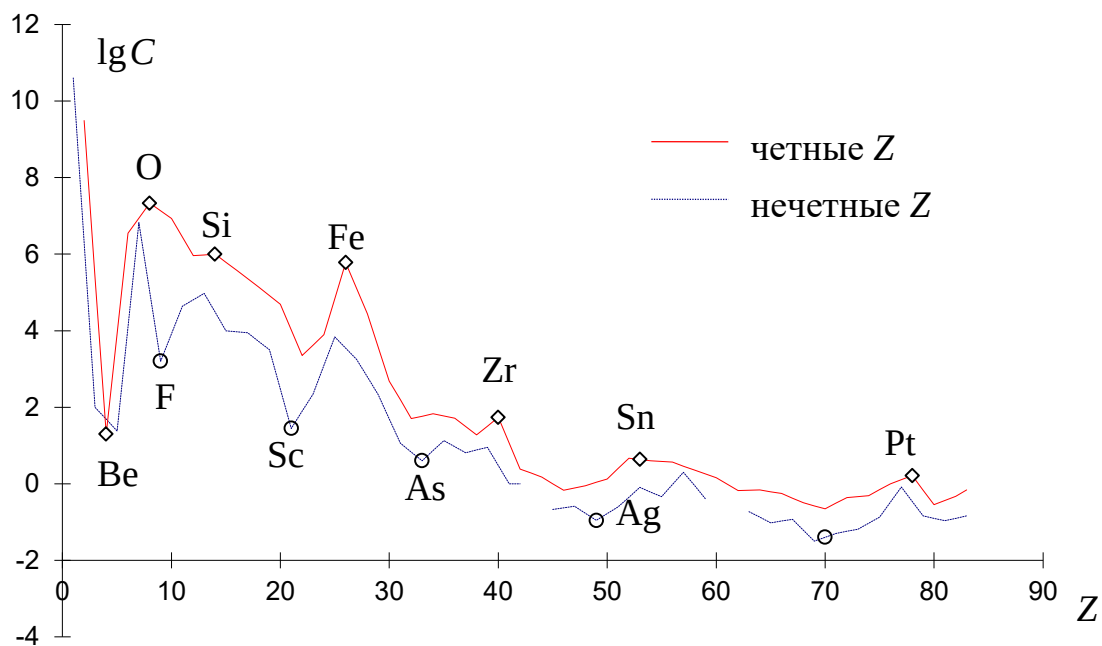


Рис. 1.3

Нуклиды с этими характеристиками обладают наибольшей прочностью (удельной энергией связи нуклонов в ядре) и повышенным распространением.

1.4. Законы радиоактивных превращений

1.4.1. Закон распада

На основании экспериментальных исследований Резерфорд и Содди в 1903 г. показали, что при радиоактивном распаде проявляется общая для всех радионуклидов закономерность, заключающаяся в том, что *количество атомов данного радиоактивного изотопа, распадающихся в среднем в единицу времени, всегда составляет определенную, характерную для данного радионуклида долю от полного числа еще не распавшихся ядер*. Математически это записывается следующим образом:

$$-\Delta N = \lambda N \Delta t, \quad (1.7)$$

где ΔN – число атомов, распадающихся за время между t и Δt ;

N – число атомов еще не распавшихся к моменту времени t ;

λ – *постоянная распада*, характеризующая вероятность ядерного превращения, отнесенная к одному ядру в единицу времени.

В форме дифференциального уравнения выражение (1.7) записывается так:

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N. \quad (1.8)$$

Из соотношения (1.8) видно, что количество ядерных превращений, происходящих в активном препарате, пропорционально начальному количеству радиоактивных ядер. Перепишем (1.8) в следующем виде:

$$\frac{dN}{dt} + \lambda N = 0, \text{ или } \frac{dN}{N} + \lambda dt = 0. \quad (1.9)$$

Интегрируя (1.9), имеем:

$$\ln N + \lambda t = A.$$

Постоянную интегрирования A найдем из начального условия: $t = 0$, $N(0) = N_0$. С учетом отмеченного, получим:

$$\ln N + \lambda t = \ln N_0, \text{ откуда}$$

$$N(t) = N_0 \exp(-\lambda t). \quad (1.10)$$

Соотношение (1.10) носит название *закона радиоактивного распада*.

Найдем время T , по истечении которого распадается половина от исходного количества ядер N_0 . Полагая $N(t)/N_0 = 0,5$, имеем:

$$0,5 = e^{-\lambda T}, \text{ откуда } T = \frac{\ln 2}{\lambda}.$$

Параметр T имеет размерность времени и носит название *периода полураспада*. Отношение $N(t)/N_0$ часто называют *функцией выживания*. Учитывая связь между λ и T , запишем для функции выживания:

$$\frac{N(t)}{N_0} = \exp\left(-\ln 2 \frac{t}{T}\right).$$

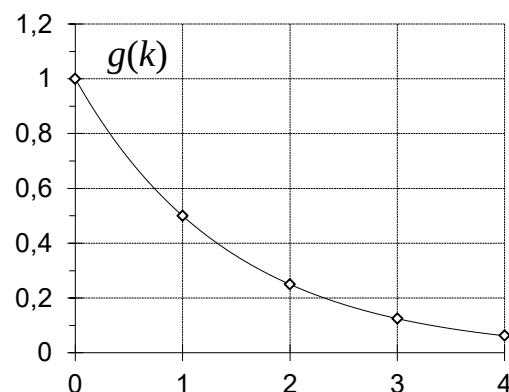
Обозначим $k = t/T$, тогда

$$g(k) = \frac{N(k)}{N_0} = 2^{-k}. \quad (1.11)$$

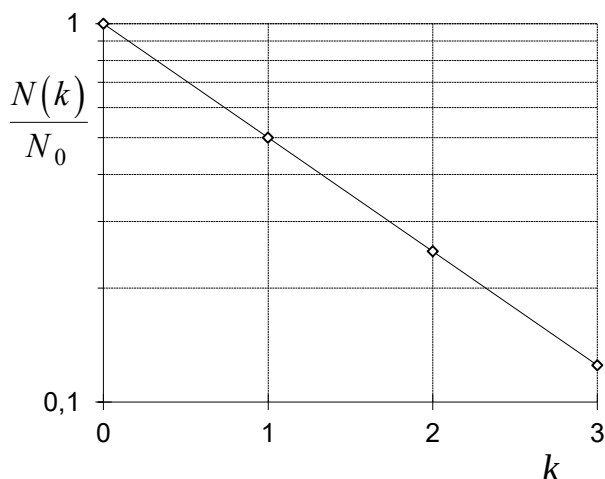
Выражение (1.11) представляет одну из форм записи закона распада. На рис. 1.4 представлено поведение функции выживания в зависимости от параметра k , представляющего собою время распада в нормировке к периоду полураспада данного радионуклида.

Если зависимость (1.11) построить в полулогарифмическом мас-

Рис. 1.4



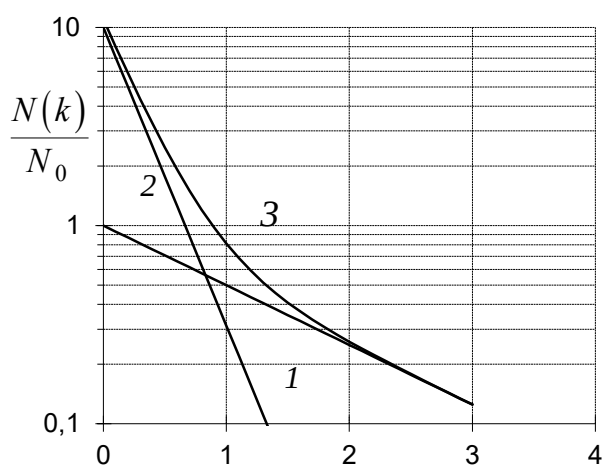
k



штабе, откладывая по ординате функцию выживания N/N_0 , а по оси абсцисс – время в линейном масштабе, то будем иметь дело с линейной зависимостью (рис. 1.5). Угловой коэффициент функции $f(k) = \ln(N/N_0)$ зависит от T . Если в радиоактивном препарате присутствуют не один, а несколько радио-

Рис. 1.5

нуклидов, например 1 и 2, отличаю-



щихся между собою по периоду полураспада T , то результирующая функция 3 в полулогарифмическом масштабе будет отличаться от прямой (рис. 1.6). Получение отдельных (парциальных) зависимостей в таких случаях возможно графическим путем лишь для двух, иногда трех изотопов с контрастными периодами полураспада (отличающихся в нес-

Рис. 1.6

сколько

Если функция $N(t)$ известна, например, получена по данным измерений активности радионуклида во времени, то его период полураспада может быть найден из следующей зависимости:

$$T = \ln 2 (\ln a_1 - \ln a_2)^{-1} \Delta t, \quad (1.12)$$

где a_1 , a_2 - активности (или аппаратурные параметры), соответствующие моментам времени t_1 и t_2 , а $\Delta t = t_2 - t_1$.

Численные значения периодов полураспада для естественно-радиоактивных элементов изменяются в очень больших пределах – от $1,40 \cdot 10^{10}$ лет для ${}_{90}\text{Th}^{232}$ до $2,09 \cdot 10^{-7}$ с для ThC' (${}_{84}\text{Po}^{212}$).

Понятие о средней продолжительности жизни атомов

Ядра радионуклидов распадаются стохастически (случайно), независимо друг от друга, поэтому о времени жизни каждого отдельного ядра любого изотопа можно сказать, что это время меняется от нуля до бесконечности. Однако средняя продолжительность жизни большой группы атомов любого из

радионуклидов является определенной и устойчивой величиной, связанной с постоянной распада.

Допустим, что на некотором отрезке времени dt распалось dN ядер данного радионуклида. Тогда произведение $t dN$ будет представлять собою суммарное время жизни всех ядер некоторой выборки dN , существующих в течение времени t , вплоть до отрезка $t + dt$. Если исходное количество ядер обозначить через N_0 и предположить, что любая сколь угодно малая выборка ядер может существовать неограниченное время от 0 до ∞ , то для среднего времени жизни τ группы атомов N_0 можно записать:

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{N_0} t dN, \text{ или} \quad (1.13)$$

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t \lambda N dt = \int_0^{\infty} t \lambda e^{-\lambda t} dt. \quad (1.14)$$

Интеграл (1.14) легко берется по частям, поэтому, опуская промежуток, запишем:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T}{\ln 2} \cong 1,44T. \quad (1.15)$$

Из-за статистического характера радиоактивного распада законы радиоактивных превращений выполняются строго лишь для очень большого количества распадающихся ядер N . При малых N наблюдаются отклонения от этих законов, называемые (статистическими) *флуктуациями*. Отклонение числа распадов n от среднего значения $\bar{N}$ подчиняется закону *распределения Пуассона*, согласно которому при большом количестве наблюдений распределение вероятностей $p(n)$ того, что за определенный промежуток времени будет зарегистрировано n распадов, описывается выражением

$$p(n) = \frac{\bar{N}^n}{n!} e^{-\bar{N}}. \quad (1.16)$$

При достаточно большом количестве ядер (на практике для $n \geq 30$), распадающихся за данный промежуток времени, пуассоновское дискретное распределение вероятностей $p(n)$ может быть описано через непрерывное *распределение Гаусса* с дисперсией $\bar{N}$:

$$p(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\bar{N}}} \exp \left[-\frac{(n - \bar{N})^2}{2\bar{N}} \right]. \quad (1.17)$$

Величина среднеквадратического отклонения σ_n , характеризующая разброс значений n относительно среднего $\bar{N}$, рассчитывается по формуле

$$\sigma_n = \pm \sqrt{N}. \quad (1.18)$$

В соответствии с этим относительное среднеквадратическое отклонение δ_n определяется выражением

$$\delta_n = \frac{\sigma_n}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}}. \quad (1.19)$$

При использовании формул (1.18) и (1.19) следует иметь в виду, что они определяют лишь вероятность, а не возможность флуктуации. Около 30 % от числа распавшихся атомов отклоняются от среднего значения на величину, большую, чем σ_n , причем 4,5 % их них на величину $2\sigma_n$, а 0,3 % – на величину $3\sigma_n$.

Закономерности (1.16) - (1.19) справедливы как для распадающихся ядер, так и для аппаратурных параметров (например скорость счета импульсов), зарегистрированных любым детектором ядерных частиц.

1.4.2. Последовательные ядерные превращения

В ряде случаев при распаде ядер исходного (материнского) элемента, родоначальника радиоактивного семейства, образуются атомы другого (дочернего) элемента, которые также являются радиоактивными и при ядерном превращении дают начало третьему элементу и т. д. Другими словами, образуется цепочка последовательных превращений типа

$$N_1(t) \rightarrow N_2(t) \rightarrow \dots \rightarrow N_{n-1}(t) \rightarrow N_n(t),$$

которая заканчивается образованием стабильных ядер. Если известно исходное количество ядер материнского элемента N_{01} , а также постоянные распада радионуклидов цепочки, то можно найти количество любого из дочерних продуктов в любой момент времени.

Вначале рассмотрим **случай двух веществ**. Допустим, что мы имеем дело с бинарной цепочкой

$$N_1(t) \rightarrow N_2(t).$$

Если обозначить через λ_1 и λ_2 постоянные распада материнского и дочернего радионуклида, то прирост дочерних ядер dN_2 за время dt составит

$$dN_2 = \lambda_1 N_1 dt - \lambda_2 N_2 dt, \quad (1.20)$$

откуда скорость прироста составит

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2. \quad (1.21)$$

Перепишем (1.21) с учетом того, что $N_1(t) = N_{01} \exp(-\lambda_1 t)$:

$$\frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_{01} \exp(-\lambda_1 t). \quad (1.22)$$

Будем искать функцию $N_2(t)$, имея в виду, что при $t = 0$, $N_1(0) = N_{01}$. Обычным приемом при решении уравнений типа (1.22) является нахождение решения в виде суммы

$$N_2(t) = N_2'(t) + N_2''(t), \quad (1.23)$$

где $N_2'(t)$ – общее, $N_2''(t)$ – частное решение уравнения (1.22).

Полагая нулю правую часть (1.22), имеем для общего решения:

$$N_2'(t) = A \exp(-\lambda_2 t).$$

Частное решение обычно ищется в соответствии со структурой правой части дифференциального уравнения. В нашем случае:

$$N_2''(t) = B \exp(-\lambda_1 t).$$

Будем искать постоянные интегрирования A и B . Поскольку частное решение обязано удовлетворять исходному дифференциальному уравнению (1.22), то можно записать:

$$-\lambda_1 B \exp(-\lambda_1 t) + \lambda_2 B \exp(-\lambda_1 t) = \lambda_1 N_{01} \exp(-\lambda_1 t). \quad (1.24)$$

Из (1.24) легко находится постоянная интегрирования:

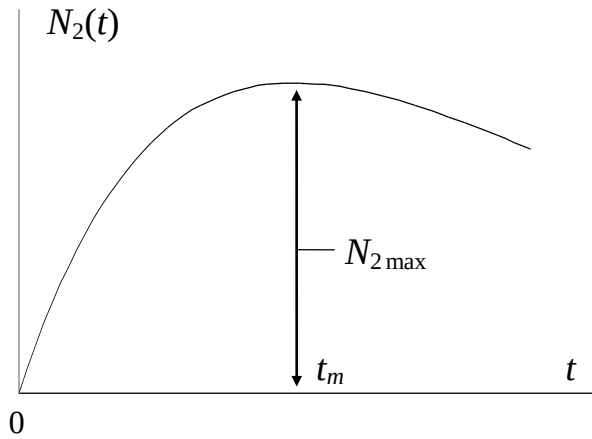
$$B = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{01}.$$

Постоянную A найдем из начального условия. Поскольку при $t = 0$ $N_2(0) = 0$ (процесс распада материнских ядер еще не начался), то, имея в виду (1.23), получим:

$$A + B = 0, \text{ откуда } A = -B = -\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{01}.$$

С учетом полученного запишем выражение для искомой функции $N_2(t)$:

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1 N_{01}}{\lambda_2 - \lambda_1} [\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)]. \quad (1.25)$$



Элементарный анализ формулы (1.25) убеждает, что функция $N_2(t)$ в нуле и в бесконечности оказывается равной нулю, поэтому в соответствии с *теоремой Ролля* она должна иметь экстремум (максимум), рис. 1.7. Решая задачу на максимум, имеем:

Рис. 1.7

$$\frac{d}{dt}[N_2(t)] = 0, \text{ откуда}$$

$$-\lambda_1 \exp(-\lambda_1 t_m) + \lambda_2 \exp(-\lambda_2 t_m) = 0, \text{ и}$$

$$t_m = \frac{\ln \lambda_2 - \ln \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}. \quad (1.26)$$

Рассмотрим поведение $N_2(t)$ для частного случая, когда период полураспада материнского изотопа оказывается много больше периода полураспада дочернего продукта, т. е. $\lambda_1 \ll \lambda_2$. С учетом отмеченного неравенства формулу (1.25) можно переписать:

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_{01} \exp(-\lambda_1 t) [1 - \exp(-\lambda_2 t)], \text{ или} \quad (1.27)$$

$$\lambda_2 N_2(t) = \lambda_1 N_1(t) [1 - \exp(-\lambda_2 t)], \lambda_1 \ll \lambda_2. \quad (1.28)$$

Произведение $A = \lambda N$ определяет *абсолютную активность* данного радиоактивного препарата или количество ядерных превращений, происходящих в нем за единицу времени. Обозначив активность материнского и дочернего продуктов через $A_1(t)$ и $A_2(t)$, получим:

$$A_2(t) = A_1(t) [1 - \exp(-\lambda_2 t)]. \quad (1.29)$$

Рассмотрим поведение функции $A_2(t)$ в начальные моменты времени (до достижения t_m), например, когда $t < T_2$ или $t \ll T_1$. В этом случае произведение $N_{01} \exp(-t \ln 2 / T_1) \approx N_{01}$, т. е. количество ядер материнского изотопа за промежуток времени, много меньший, чем его период полураспада, практически не изменяется. Обозначим через $A_0 = \lambda_1 N_{01}$ начальную активность материнского вещества, тогда

$$\frac{A_2(t)}{A_0} = 1 - \exp(-\lambda_2 t). \quad (1.30)$$

Другими словами, в начальные моменты времени (до достижения максимума) накопление дочерних ядер происходит пропорционально *функции накопления* $f(t) = 1 - \exp(-\lambda_2 t)$ с постоянной распада короткоживущего дочернего продукта, т. е. накопление дочернего вещества происходит достаточно быстро.

В моменты времени после достижения $N_2(t)$ максимума, например, когда $t > T_1$ или $t \gg T_2$, непосредственно из (1.27) вытекает, что

$$A_2(t) = \lambda_1 N_{01} \exp(-\lambda_1 t). \quad (1.31)$$

Другими словами, уменьшение активности дочернего продукта (после достижения максимума) происходит пропорционально *функции остывания* $f(t) = \exp(-\lambda_1 t)$ с постоянной распада долгоживущего материнского вещества, т. е. относительно медленно.

Можно показать, что процесс накопления дочерних ядер всегда происходит быстро (с постоянной распада короткоживущего нуклида), а уменьшение идет медленно, т. е. с постоянной распада долгоживущего нуклида, вне зависимости от того, материнский это изотоп или дочерний.

Понятие о радиоактивном равновесии

Если в дифференциальном уравнении (1.21) левую часть принять равной нулю, то получим следующее равенство:

$$\lambda_1 N_1(t) = \lambda_2 N_2(t). \quad (1.32)$$

Соотношение (1.32) характеризует состояние *радиоактивного равновесия*, наступающего по достижении максимума функции $N_2(t)$. Радиоактивное равновесие свидетельствует о равенстве активностей материнского и дочернего продуктов, при этом количество тех и других ядер меняется во времени, сохраняется постоянным лишь их отношение

$$\frac{N_2(t)}{N_1(t)} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \text{const}. \quad (1.33)$$

Различают *подвижное* и *устойчивое (вековое)* состояния радиоактивного равновесия. Допустим, что продолжительность жизни материнского вещества больше времени жизни любого из дочерних продуктов цепочки последовательных превращений, но пренебречь распадом («остыванием») материнского вещества нельзя. В этом случае по истечении достаточно длительного промежутка времени количество каждого из последующих продуктов превращения изменится по закону распада материнского вещества и отношение между количеством материнского изотопа и количеством

последующих продуктов распада будет приближаться к постоянному предельному значению.

Рассмотренный выше случай относится к так называемому подвижному равновесию, что имеет место, например, при установлении равновесия между Rn ($T = 3,825$ суток) и его дочерними продуктами распада RaA , RaB и RaC . При малых периодах полураспада указанные продукты быстро достигают состояния радиоактивного равновесия с материнским веществом. Так, RaA ($T = 3,05$ мин.) приходит в состояние равновесия с Rn практически через 12-15 минут, а ThA ($T = 0,16$ с) практически всегда находится в равновесии с торием ($T = 54,5$ с). То же самое относится к AcA ($T = 1,08 \cdot 10^{-3}$ с), находящемуся в равновесии с актиноном ($T = 3,9$ с).

Если материнское вещество распадается настолько медленно, что его остыванием можно пренебречь, то во всей цепочке последовательных превращений по истечении достаточного времени наступит состояние, называемое устойчивым (вековым) равновесием. Накопление любого продукта цепочки будет происходить до тех пор, пока число его распадающихся ядер в единицу времени не окажется равным числу распадающихся в единицу времени ядер материнского вещества. Теоретически такое состояние может быть достигнуто через бесконечно большой промежуток времени, практически же он достигается за такой конечный отрезок, когда прирост ядер дочернего продукта уже нельзя заметить опытом. По достижении в радиоактивном ряду состояния устойчивого равновесия количество распадающихся в единицу времени атомов любого радионуклида цепочки становится одинаковым, т. е.

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \dots = \lambda_n N_n = \text{const} . \quad (1.34)$$

Из (1.34) видно, что при устойчивом радиоактивном равновесии число атомов $N_1, N_2, \dots, N_n$ пропорционально их периодам полураспада.

Число ядер радионуклида, соответствующее активности 1 расп/с, можно оценить как $N = 1/\lambda$, а масса вещества в грамм, излучающая эту активность, составляет:

$$m = N \frac{A}{N_A} = \frac{A}{\lambda N_A} = \frac{A}{N_A} \frac{T}{\ln 2} ,$$

где N_A – число Авогадро; A – атомный вес радионуклида.

О радиоактивном равновесии между U и Ra

Радиоактивное равновесие между ураном и радием наступает по истечении длительного промежутка времени и наблюдается в древних хорошо сохранившихся породах и минералах. Имея в виду (1.32), оценим количество Ra , находящегося в равновесии с одним граммом U . Полагая массу урана

равной 1 г, а периоды полураспада ${}_{92}\text{U}^{238}$ и ${}_{88}\text{Ra}^{226}$ равными $4,47 \cdot 10^9$ и 1602 лет, соответственно, получим:

$$m_{\text{Ra}} = m_{\text{U}} \frac{\lambda_{\text{U}}}{\lambda_{\text{Ra}}} \frac{A_{\text{Ra}}}{A_{\text{U}}}, \quad (1.35)$$

где $A_{\text{Ra}}, A_{\text{U}}$ – массовые числа радия и урана.

Из (1.35) следует, что один грамм U соответствует активности (количеству распадов в единицу времени) $3,4 \cdot 10^{-7}$ г Ra, т. е. из трех тонн равновесного U можно извлечь примерно один грамм Ra.

Происходящие в природе процессы растворения и выщелачивания радиоактивных элементов из горных пород и минералов приводят к нарушениям радиоактивного равновесия и, в частности, вызывают смещение равновесия между Ra и U. В этом случае степень смещения равновесия выражается в % и определяется соотношением

$$K_{\text{pp}} = \frac{\alpha}{\alpha_0} 100 \%, \text{ или} \quad (1.36)$$

$$K_{\text{pp}} = \frac{Q_{\text{Ra}}}{Q_{\text{U}}} \frac{100 \%}{3,4 \cdot 10^{-7}},$$

где α – отношение Ra к U в исследуемом образце;

α_0 – равновесное соотношение между Ra и U ($3,4 \cdot 10^{-7}$);

$Q_{\text{Ra}}, Q_{\text{U}}$ – содержания Ra и U в исследуемом образце.

Если $\alpha > \alpha_0$, то говорят о смещении равновесия в сторону Ra; при $\alpha < \alpha_0$ – в сторону U; если $\alpha = \alpha_0$ – равновесной руде.

Отношение (1.36) называется *коэффициентом радиоактивного равновесия* между Ra и U и может меняться от 0 до ∞ . Сведения о состоянии радиоактивного равновесия имеют важное значение при интерпретации результатов γ -измерений, например при количественных определениях U по результатам γ -каротажа.

Случай трех веществ

Допустим, что имеется цепочка последовательных превращений

$$N_1(t) \rightarrow N_2(t) \rightarrow N_3(t).$$

Атомы 3-го вещества образуются за счет распада 2-го вещества, который, в свою очередь, возникает за счет распада материнских ядер.

Будем считать, что в начальный момент времени $t = 0$, $N_1(0) \neq 0$, $N_2(0) = 0$, $N_3(0) = 0$. Требуется найти выражение для функции $N_3(t)$, т. е. количество ядер третьего продукта в любой момент времени. Скорость прироста ядер 3-го элемента можно записать следующим образом:

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3, \text{ или} \quad (1.37)$$

$$\frac{dN_3}{dt} + \lambda_3 N_3 = \lambda_2 N_2. \quad (1.38)$$

Имея в виду, что количество ядер N_2 зависит от времени и определяется формулой (1.25), получим:

$$\frac{dN_3}{dt} + \lambda_3 N_3 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 N_{01}}{\lambda_2 - \lambda_1} [\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)]. \quad (1.39)$$

Будем искать функцию $N_3(t)$ в виде суммы

$$N_3(t) = N_3'(t) + N_3''(t), \quad (1.40)$$

где $N_3'(t)$ – общее, $N_3''(t)$ – частное решение уравнения (1.39).

Полагая нулю правую часть (1.39), получим для общего решения:

$$N_3'(t) = A \exp(-\lambda_3 t).$$

Частное решение будем искать в виде, соответствующем структуре правой части уравнения. В нашем случае:

$$N_3''(t) = B \exp(-\lambda_1 t) + C \exp(-\lambda_2 t).$$

Поскольку частное решение обязано удовлетворять исходному дифференциальному уравнению, то, учитывая, что

$$\frac{dN_3''}{dt} = -\lambda_1 B \exp(-\lambda_1 t) - \lambda_2 C \exp(-\lambda_2 t), \text{ имеем:}$$

$$B(\lambda_3 - \lambda_1) \exp(-\lambda_1 t) - C(\lambda_3 - \lambda_2) \exp(-\lambda_2 t) = \frac{\lambda_1 \lambda_2 N_{01}}{\lambda_2 - \lambda_1} [\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)],$$

откуда легко находятся постоянные интегрирования B и C :

$$B = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} N_{01}, \quad C = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)} N_{01}.$$

Постоянную интегрирования A найдем, имея в виду начальное условие. Считая, что при $t = 0$, $N_3(0) = 0$, получим из (1.40): $A + B + C = 0$, откуда легко показать, что

$$A = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} N_{01}.$$

Подставляя выражения для постоянных A , B и C в (1.40), имеем:

$$N_3(t) = \lambda_1 \lambda_2 N_{01} \left[\frac{\exp(-\lambda_1 t)}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} + \frac{\exp(-\lambda_2 t)}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)} + \frac{\exp(-\lambda_3 t)}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} \right]. \quad (1.41)$$

Обобщение на случай n веществ

Пусть имеется цепочка ядерных превращений типа

$$N_1(t) \rightarrow N_2(t) \rightarrow \dots \rightarrow N_{n-1}(t) \rightarrow N_n(t).$$

Будем считать, что в начальный момент времени $t = 0$, $N_1(0) \neq 0$, $N_2(0) = N_3(0) = \dots = N_n(0) = 0$. Имея в виду особенности правых частей функций $N_2(t)$ и $N_3(t)$, формулы (1.25) и (1.41), запишем для $N_n(t)$:

$$N_n(t) = \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1} N_{01} \left[\frac{\exp(-\lambda_1 t)}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1) \dots (\lambda_n - \lambda_1)} + \frac{\exp(-\lambda_2 t)}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2) \dots (\lambda_n - \lambda_2)} + \dots + \frac{\exp(-\lambda_n t)}{(\lambda_1 - \lambda_n)(\lambda_2 - \lambda_n) \dots (\lambda_{n-1} - \lambda_n)} \right]. \quad (1.42)$$

Если период полураспада первого (материнского) вещества является наибольшим, то по истечении достаточно длительного времени в цепочке из n веществ устанавливается состояние радиоактивного равновесия либо подвижное, либо вековое. В первом случае количество каждого нуклида уменьшается пропорционально остыванию материнского вещества:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{N_n}{N_1} = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1) \dots (\lambda_n - \lambda_1)}. \quad (1.43)$$

Если же период полураспада материнского (1-го) вещества оказывается настолько большим, что $\lambda_1 \ll \lambda_2$, $\lambda_1 \ll \lambda_3$, ..., $\lambda_1 \ll \lambda_n$, то в этом случае между материнским и дочерними радионуклидами устанавливается вековое равновесие, которое характеризуется равенством активностей:

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \dots = \lambda_n N_n.$$

Радиоактивное равновесие в цепочке последовательных превращений практически наступает спустя время, на порядок превышающее период полураспада дочернего радионуклида с наибольшим временем жизни.

1.5. Естественные радиоактивные элементы

Систематическое изучение радиоактивности природных сред показало, что в любой горной породе содержатся (в разных количествах) радиоактивные изотопы тяжелых элементов с числами Менделеева от 81 до 92.

К числу естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ), все изотопы которых являются неустойчивыми, относятся элементы от ^{84}Po до ^{92}U . Встречающиеся в природе ^{81}Tl , ^{82}Pb , ^{83}Bi содержат в своем составе радиоактивные изотопы. Имеются радиоактивные изотопы и у других элементов средней части таблицы Менделеева.

Таблица 1.2

Ядерные характеристики одиночных естественных радионуклидов

Изотоп	Отн. распростран., %	Период полураспада	Схема распада	Дочернее ядро	Энергия излучений, МэВ
$^{19}\text{K}^{40}$	0,0119	$1,27 \cdot 10^9$ лет	β^- -распад (89%) <i>K-захват</i> (11%)	$^{20}\text{Ca}^{40}$ $^{19}\text{Ar}^{40}$	β_m - 1,325 γ - 1,460
$^{37}\text{Rb}^{87}$	27,5	$4,7 \cdot 10^{10}$ лет	β^- -распад	$^{38}\text{Sr}^{87}$	β_m - 0,274 γ - 0,394
$^{49}\text{In}^{115}$	95,72	$6,0 \cdot 10^{14}$ лет	β^- -распад	$^{49}\text{Sn}^{115}$	β_m - 0,6
$^{57}\text{La}^{138}$	0,089	$1,1 \cdot 10^{11}$ лет	β^- -распад (6%) <i>K-захват</i> (94%)	$^{58}\text{Ce}^{138}$ $^{56}\text{Ba}^{138}$	β_m - 1,0 γ - 0,81, 1,43
$^{62}\text{Sm}^{147}$	14,97	$1,2 \cdot 10^{11}$ лет	α -распад	$^{60}\text{Nd}^{143}$	α - 2,18
$^{71}\text{Lu}^{176}$	2,59	$2,1 \cdot 10^{10}$ лет	β^- -распад (33%) <i>K-захват</i> (67%)	$^{72}\text{Hf}^{176}$ $^{70}\text{Yb}^{176}$	β_m - 0,43 γ - 0,19, 0,31
$^{75}\text{Re}^{187}$	66,93	$1,2 \cdot 10^{11}$ лет	β^- -распад	$^{76}\text{Os}^{187}$	$\beta_m < 0,008$ γ - нет
$^{78}\text{Pt}^{190}$	0,012	$6,9 \cdot 10^{11}$ лет	α -распад	$^{76}\text{Os}^{186}$	α - 3,3

В 1906 г. Кэмпбелл и Вуд обнаружили слабую β^- -активность у калия и рубидия, которая не была обусловлена какими-либо примесями, поскольку оказалась пропорциональной массовой доле элемента. Впоследствии выяснилось, что радиоактивность К связана с присутствием в его составе малораспространенного изотопа $^{19}\text{K}^{40}$, распадающегося по схеме β^- - и *K*-захвата. Радиоактивным изотопом рубидия оказался $^{37}\text{Rb}^{87}$, испускающий β^- -частицы. Известны и другие радионуклиды, встречающиеся в земной коре, их основные свойства приведены в табл. 1.2.

1.5.2. Ядерная геохронология

Особенности ядерных превращений широко используются в приложениях, в частности для определения абсолютного возраста горных

пород. Известно, что в любой горной породе можно обнаружить даже самые микроскопические количества любого химического элемента, включая и естественно-радиоактивные.

Допустим, что начальное количество ядер некоторого радионуклида в заданном образце горной породы составляет N_0 ядер. Если установлено, что за прошедший период этот радионуклид не выносился или дополнительно не поступал в исследуемую породу, то, зная постоянную распада радионуклида и соотношение начального N_0 и конечного количества N ядер, можно вычислить время t , которое потребовалось для этого соотношения.

Конечное (существующее на момент датировки) содержание радионуклида определяется аналитически (химия, радиохимия, γ -спектрометрия и др. методы анализа). О начальном содержании N_0 судят по количеству накопившегося в породе стабильного изотопа $N_{\text{ст}}$, являющегося конечным продуктом распада исходного радионуклида. При этом используется то обстоятельство, что начальное содержание радионуклида может быть представлено в виде суммы его концентрации N на момент исследований и содержания $N_{\text{ст}}$ – продукта распада, т. е.

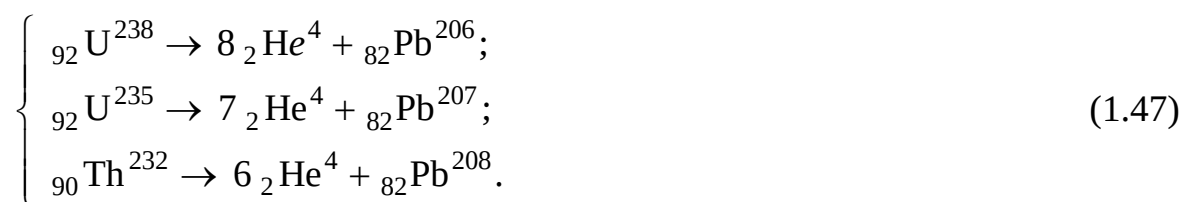
$$N_0 = N + N_{\text{ст}}. \quad (1.44)$$

Учитывая, что $N = N_0 \exp(-\lambda t)$, имеем:

$$\frac{N_{\text{ст}}}{N} = \exp(\lambda t) - 1, \text{ откуда} \quad (1.45)$$

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(1 + \frac{N_{\text{ст}}}{N} \right). \quad (1.46)$$

Первые методы определения абсолютного возраста были основаны на использовании цепочки последовательных превращений U, Th и актиноурана в соответствующие стабильные изотопы ${}_{82}\text{Pb}^{206}$, ${}_{82}\text{Pb}^{208}$ и ${}_{82}\text{Pb}^{207}$:



В результате этих реакций образуется He и изотопы Pb в зависимости от того, по какому из указанных конечных продуктов распада определяется возраст, метод соответственно называется *гелиевым* или *свинцовым*.

В наиболее простом случае, когда возраст минерала априори относительно невелик ($t < 200$ млн лет), а Th в его составе отсутствует, возраст может быть оценен приближенно по формуле

$$t = 1,155 \frac{1}{\lambda_{U^{238}}} \frac{C_{Pb}}{C_U}, \quad (1.48)$$

где C_{Pb} , C_U - массовые доли свинца и урана.

При наличии в минерале Th его содержание выражают в эквиваленте U, учитывая соотношения их активностей. Формула для расчета возраста при этом выглядит так:

$$t = 7600 \frac{C_{Pb}}{0,36C_{Th} + C_U}. \quad (1.49)$$

При более древнем возрасте минералов ($t > 200$ млн. лет) его рассчитывают через содержания изотопов свинца $^{82}Pb^{206}$, $^{82}Pb^{207}$ и $^{82}Pb^{208}$, определяемые масс-спектрометрическим методом.

Расчет ведется по формулам [59]:

$$\left\{ \begin{array}{l} t = \frac{1}{\lambda_{U^{238}}} \ln \left(1 + 1,155 \frac{C_{Pb^{206}}}{C_{U^{238}}} \right); \\ t = \frac{1}{\lambda_{U^{235}}} \ln \left(1 + 1,135 \frac{C_{Pb^{207}}}{C_{U^{235}}} \right); \\ t = \frac{1}{\lambda_{Th^{232}}} \ln \left(1 + 1,115 \frac{C_{Pb^{208}}}{C_{Th^{232}}} \right). \end{array} \right. \quad (1.50)$$

Возраст, полученный по трем формулам (1.50), теоретически должен быть одинаковым. В действительности этого обычно не наблюдается, так как природные системы не являются полностью закрытыми, и на протяжении геологической истории возможна частичная потеря как промежуточных, так и конечных нуклидов. Определенную погрешность дают также и масс-спектрометрические измерения.

Для определения истинного возраста урановых минералов и руд применяют способ так называемой «*кривой конкордии*». Указанная кривая представляет собою теоретическую зависимость отношения $^{82}Pb^{207}/_{92}U^{235}$ к $^{82}Pb^{206}/_{92}U^{238}$ от возраста природных сред, построенного на основании закона распада (рис. 1.9) [59].

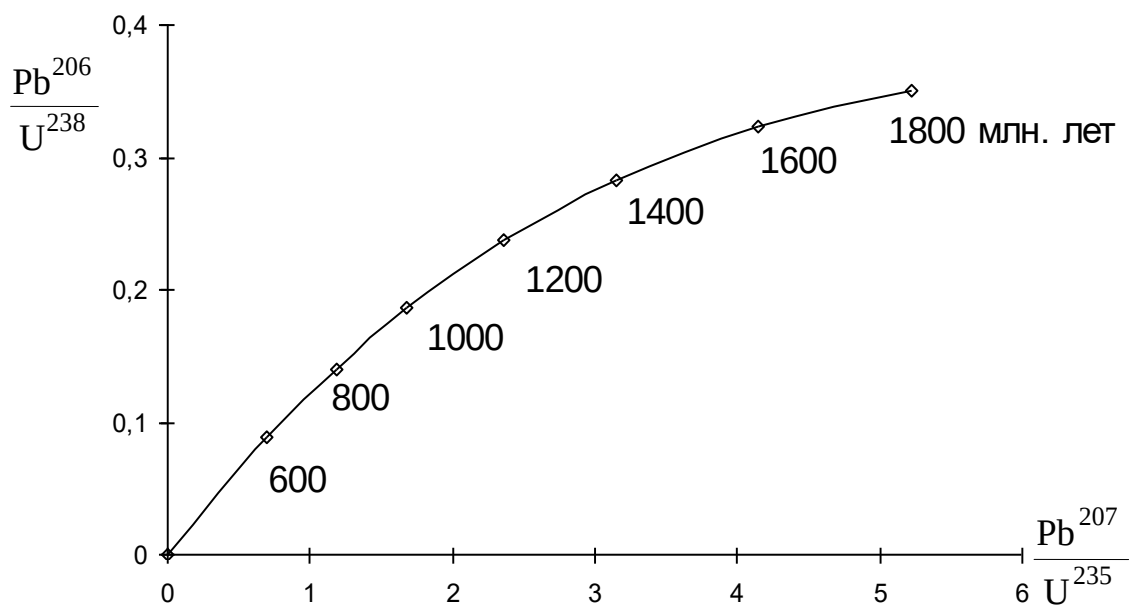


Рис. 1.9

Кроме указанных методов, для датировки природных образований используются также К-Аг-, Rb-Sr- и радиоуглеродный (C^{14}) методы.

Калий-аргоновый метод. Калий - широко распространенный элемент, входит в состав большинства горных пород. Кларк К в земной коре равен 2,5 %, его содержание в горных породах колеблется от 0,03 до 3,34 % (кроме солей). Почти 18 % массы земной коры приходится на долю К-содержащего минерала – ортоклаза (КПШ). Это двойная соль кремниевой кислоты $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$. В результате химического выветривания ортоклаз превращается в каолин, песок (SiO_2) и воду. По этой причине К можно встретить как в изверженных, так и в осадочных горных породах.

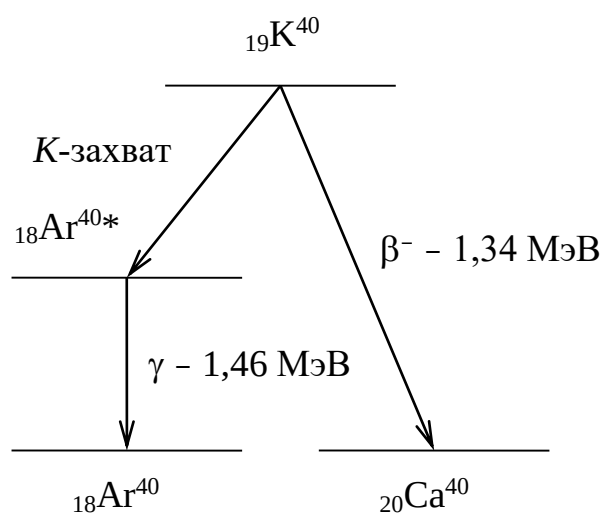
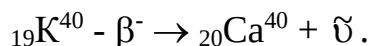


Рис. 1.10

Природная смесь К состоит из двух стабильных изотопов $^{39}_{19}K$ (98,03 %), $^{41}_{19}K$ (6,91 %) и одного радиоактивного - $^{40}_{19}K$ (0,0119 %). Радиоактивный изотоп калия распадается путем β^- -превращения (с вероятностью 89 %) и превращения типа К-захвата (11 %), сопровождающегося γ -излучением с энергией 1,46 МэВ (рис. 1.10). В результате К-захвата по схеме $^{40}_{19}K + \beta^- \rightarrow ^{40}_{18}Ar + \nu$

образуется возбужденное ядро ${}_{18}\text{Ar}^{40*}$, которое переходит в основное состояние после испускания γ -кванта с энергией 1,46 МэВ.

Постоянная распада λ_e , соответствующая явлению e -захвата, для ${}_{19}\text{K}^{40}$ составляет $0,585 \cdot 10^{-10} \text{ год}^{-1}$. Бета-минус распад ${}_{19}\text{K}^{40}$ приводит к образованию стабильного изотопа ${}_{20}\text{Ca}^{40}$ по схеме



Постоянная β^- -распада ${}_{19}\text{K}^{40}$ составляет $\lambda_\beta = 4,72 \cdot 10^{-10} \text{ год}^{-1}$.

При расчетах значение абсолютного возраста t может быть получено из следующего соотношения:

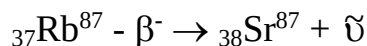
$$t = \frac{1}{\lambda_\beta + \lambda_e} \ln \left(1 + \frac{\lambda_\beta + \lambda_e}{\lambda_e} \frac{C_{\text{Ar}^{40}}}{C_{\text{K}^{40}}} \right). \quad (1.51)$$

Надежность датировки пород с помощью К-Аг-метода во многом зависит от скорости утечки образующегося Аг из минералов.

Рубидиево-стронциевый метод. Рубидий – химический элемент I группы периодической системы, имеет порядковый номер $Z = 37$ и атомный вес $A = 85,47$. Рубидий малораспространен в природе, его кларк в земной коре составляет 0,015 % по массе.

Среди изверженных пород наиболее высокие содержания Rb отмечаются в кислых разностях (0,02 %), а наиболее низкие – в ультрабазитах (2 г/т). Среднее содержание Rb в глинах и глинистых сланцах 0,02 %. В природе Rb, как правило, встречается совместно с Cs и собственных минералов не образует. Наиболее высокие концентрации этих элементов наблюдаются в некоторых минералах пегматитовых жил: полевых шпатах, слюдах, бериллах и особенно в поллуците. Содержание Rb в ортоклазах и микроклинах может достигать 2,7-2,8 %, в мусковитах – 1,8, в биотитах – 0,37, в лепидолитах – 2,7-3,7 %.

Природный рубидий состоит из смеси двух изотопов с массовыми числами 85 (72,81 %) и 87 (27,19 %). Изотоп ${}_{37}\text{Rb}^{87}$ β -радиоактивен и распадается по схеме



с периодом полураспада $T = 4,7 \cdot 10^{10}$ лет. В природных условиях встречаются четыре стабильных изотопа стронция: ${}_{38}\text{Sr}^{84}$ (0,56 %), ${}_{38}\text{Sr}^{86}$ (9,86 %), ${}_{38}\text{Sr}^{87}$ (7,02 %) и ${}_{38}\text{Sr}^{88}$ (82,56 %).

Данные по относительной распространенности стабильных изотопов Sr были получены после того, как Гольдшмидт в 1937 г. высказал предположение, что β^- -распад ${}_{37}\text{Rb}^{87}$ с образованием ${}_{38}\text{Sr}^{87}$ можно использовать в качестве

геохронометра. Поскольку изотоп $^{87}_{38}\text{Sr}$ может быть как естественным, так и радиогенным (за счет распада $^{87}_{37}\text{Rb}$), то при расчете геологического возраста следует сопоставлять между собою массовые доли радионуклида $^{87}_{37}\text{Rb}$ и радиогенной «добавки» $^{87}_{38}\text{Sr}$.

Время t , необходимое для получения имеющегося в данном образце количества радиогенного $^{87}_{38}\text{Sr}$, рассчитывается из соотношения

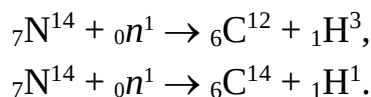
$$t = \frac{1}{\lambda_{\text{Rb}^{87}}} \frac{C_{\text{Sr}^{87}}}{C_{\text{Rb}^{87}}}, \quad (1.52)$$

где $\lambda_{\text{Rb}^{87}}$ – постоянная распада материнского изотопа $^{87}_{37}\text{Rb}$;

$C_{\text{Rb}^{87}}$, $C_{\text{Sr}^{87}}$ – массовые доли изотопа $^{87}_{37}\text{Rb}$ и радиогенного $^{87}_{38}\text{Sr}$.

Радиоуглеродный метод. Ниже рассматривается метод, который широко используется для датировки объектов жизнедеятельности, существовавших тысячи или первые десятки тысяч лет. Речь идет о датировке по радиоуглероду $^{14}_6\text{C}$, который образуется в атмосфере под действием космического излучения.

Космические лучи, состоящие из частиц высокой энергии, разрушают в верхних слоях атмосферы ядра атомов азота, входящих в состав воздуха. При этом образуются вторичные ядерные частицы и дочерние продукты, которые могут быть радиоактивными. Вторичные ядерные частицы, например нейтроны, могут взаимодействовать с $^{14}_7\text{N}$ и образовывать ^3_1H и $^{14}_6\text{C}$:



Первая из этих реакций идет на быстрых, а вторая на тепловых нейтронах. Возникающие под действием космических лучей нейтроны замедляются в воздухе до тепловых энергий, поэтому скорость образования ядер $^{14}_6\text{C}$ оказывается заметно выше скорости образования ^3_1H (примерно 2,3 атом/с на 1 см² поверхности для $^{14}_6\text{C}$ и 0,4 атома ^3_1H при тех же условиях).

Радиоуглерод $^{14}_6\text{C}$ является β -излучателем с периодом полураспада 5570 лет. Максимальная энергия β -частиц составляет 155 кэВ. Если предположить, что интенсивность космического излучения оставалось постоянной за последние десятки тысяч лет, то, исходя из периода полураспада $^{14}_6\text{C}$, можно считать, что к настоящему времени достигнуто равновесие между образующимися и распадающимися ядрами $^{14}_6\text{C}$. Атом радиоуглерода в воздухе довольно быстро окисляется и переходит в двуокись $\text{C}\hat{\text{I}}_2$.

Растительный мир живет за счет атмосферного углекислого газа. Животный мир питается растительным, и, следовательно, слабо радиоактивный углерод проникает в организм животных. В результате распада атомов $^{14}_6\text{C}$

каждый грамм углерода в живом организме испускает примерно 15 β -частиц в минуту. Когда жизнедеятельность прекращается, то обрывается и углеродный обмен с атмосферой и биосферой, количество атомов ${}^{14}\text{C}$ в организме не восполняется, происходит лишь их распад с известным периодом. Спустя 5570 лет после прекращения жизнедеятельности, число испускаемых β -частиц на каждый грамм содержащегося в нем С уменьшается вдвое, а спустя два периода полураспада ${}^{14}\text{C}$, это число уменьшится в 4 раза. Следовательно, измеряя удельную активность ${}^{14}\text{C}$, можно установить в пределах точности метода, когда для изучаемого объекта прекратился углеродный обмен, т. е. когда этот живой организм умер.

Зная удельную радиоактивность атмосферного углерода I_0 (та же, что и в организме) и активность исследуемого ископаемого остатка I , можно вычислить возраст с момента прекращения обмена углеродом:

$$t = \frac{1}{\lambda_{{}^{14}\text{C}}} \ln \left(\frac{I_0}{I} \right). \quad (1.53)$$

Радиоуглеродный метод применим для датировки образований, возраст которых не превышает 20 тыс. лет. Для него пригодны древесный уголь (обугленное вещество), древесина, торф, кости, раковины и т. п.

Радиоуглеродный метод был проверен на образцах пород, возраст которых был хорошо известен из археологических данных. Одним образцом служил брусок кипариса из гробницы фараона Снофру; возраст бруска по археологическим данным оценивался в 5600 лет. Другой образец был взят из палубы похоронного судна фараона Сезостриса III; возраст – 3800 лет. Для каждого из этих образцов, как и для ряда других, возраст по ${}^{14}\text{C}$ совпал с археологическими данными с точностью $\pm 10\%$ относительных [61].

1.5.3. Физико-химические свойства некоторых естественно-радиоактивных элементов

Уран (U). Уран является наиболее тяжелым природным элементом с порядковым номером 92. Атомный вес природной смеси его изотопов (U^{238} , U^{235} , U^{234}) равен 238,03, плотность урана – 18,9 г/см³. Этот элемент открыт Клапротом в 1782 г., а его радиоактивность обнаружена Беккерелем в 1896 году. Уран характеризуется большим зарядом ядра и сложным строением электронной оболочки. В природных условиях он встречается в 4- (U^{+4}) и 6-валентной (U^{+6}) формах. Основной особенностью U является большая химическая активность и сильная восстановительная способность, особенно ярко проявляющаяся в кислых водных растворах. С кислородом U образует

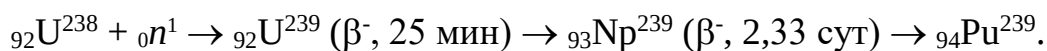
оксиды UO_2 , U_3O_8 , и UO_3 . Последний оксид в природных условиях без воды обычно не встречается. Галогенные соединения урана неустойчивы и весьма летучи. Сульфатные соединения урана в природе неизвестны. В природных условиях соединения 4-валентного U имеют черный, темно-коричневый и красно-бурый цвет и характеризуют гипогенные условия образования минералов при условиях восстановительной среды. Соединения U^{+6} имеют яркий зеленовато-желтый цвет и относятся ко вторичным урановым минералам.

Все урановые минералы делятся на *первичные* и *вторичные*. В группу первичных минералов U, представленных его оксидами, в первую очередь выделяют уранинит и настуран, отличающийся от уранинита тем, что он образуется в виде плотных натечных форм. Для всех первичных минералов U характерно присутствие Th. Вторичные минералы U представлены карбонатами, силикатами, фосфатами, ванадатами и сульфатами уранила. Во вторичных урановых минералах Th, как правило, отсутствует.

Кларк U в земной коре составляет $2,5 \cdot 10^{-4} \%$. Наиболее высокие средние содержания урана отмечаются в кислых изверженных породах (4,5 г/т), а наиболее низкие – в ультрабазитах $3 \cdot 10^{-7} \%$. В глинах и глинистых сланцах среднее содержание урана 3,2 г/т. Основная масса U (60 - 90 %) находится в литосфере в рассеянном состоянии, хотя известно большое количество (~200) U-содержащих минералов. Наибольшее практическое значение из них имеет около 30. Многие U-содержащие минералы являются сырьем на редкие земли и другие элементы.

Природные скопления урана образуются при магматических и гидротермальных процессах, при осадконакоплении, метаморфизме и выветривании пород. Встречаются как собственно урановые месторождения, так и комплексные. Массовые доли U в рудах колеблются от сотых долей процента до первых процентов. Среди урановых руд выделяют богатые (1-3 %), рядовые (0,1-1,0 %) и бедные (0,05-0,1 %). Из комплексных руд U извлекается и при убогих концентрациях (< 0,05 %)

Изотоп U^{235} делится под действием тепловых нейтронов и является основным сырьем для тепловых АЭС. Наиболее распространенный изотоп U^{238} делится под действием быстрых нейтронов и служит сырьем для получения стратегического делящегося материала – плутония. Образование Pu идет по следующей схеме:



Изотоп ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ был открыт в 1941 г; он является α -излучателем с периодом полураспада $2,44 \cdot 10^4$ лет, превращаясь в дочерний продукт ${}_{92}\text{U}^{235}$.

Изотоп ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ имеет очень большое сечение деления тепловыми нейтронами (738 барн) и испускает при одном акте деления $\sim 2,9$ нейтрона, что позволяет использовать ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ в качестве стратегического сырья.

До пуска первых атомных реакторов урановые руды добывали в основном для извлечения из них Ra. Мизерные количества урановых соединений использовали в некоторых красителях и катализаторах. Когда из элемента, не имеющего почти никакого промышленного значения, U превратился в стратегическое сырье № 1, началась настоящая охота за его рудами. Чуть ли не все уголки земного шара были обследованы на U, благо его радиоактивность подсказывала принципы конструирования чувствительных поисковых радиометров.

При среднем содержании урана 2,5 г/т в некоторых горных породах, например в гранитах, его массовая доля составляет 4,5 г/т. Полная энергия, «спрятанная» в этих граммах, эквивалентна теплосодержанию сотен тонн каменного угля. Поэтому (а еще и потому, что во всем мире наблюдается устойчивая тенденция к извлечению U, и не только его, из все более бедных руд) можно полагать, что со временем гранит вполне может оказаться одним из видов минерального сырья. Всего в относительно тонком, 20-км верхнем слое Земли заключено 10^{14} т U. Количество громадное, способное удовлетворить все энергетические потребности человечества на долгое время. Энергия этого U оценивается астрономической цифрой – $2,3 \cdot 10^{24}$ киловатт-часов. Это в 10^6 раз больше, чем могут дать все разведанные и предполагаемые месторождения горючих полезных ископаемых.

Если бы в массе планеты концентрация U была такой же, как в гранитном слое, то температура Земли была бы намного выше существующей. Это обстоятельство, подтвержденное прямыми измерениями, показывает, что по мере продвижения к центру Земли концентрация U падает.

Способов извлечения U из руд разработано великое множество. Причина тому, с одной стороны – стратегическая важность этого элемента, а с другой, – разнообразие его минеральных форм. Но каков бы ни был метод или сырье, любое урановое производство включает три стадии: предварительное концентрирование (обогащение), выщелачивание U и получение достаточно чистых соединений U осаждением, экстракцией или ионным обменом. Далее, в зависимости от назначения получаемого урана, следует обогащение продукта изотопом U^{235} или сразу же восстановление элементного (металлического) урана.

Радий (Ra). Промежуточный продукт распада в радиоактивном семействе U^{238} , радий имеет порядковый номер 88 и атомный вес 226, плотность 5,0 г/см³. Открыт супругами Кюри в 1898 г. В чистом виде представляет собой довольно мягкий металл серебристого цвета. Химические свойства Ra близки к свойствам Ba, вместе с которым они часто встречаются в руде. Радий всегда двухвалентен. При взаимодействии с кислотами оксиды и гидраты окисей Ra легко образуют соли, причем соли с анионами Cl^- и NO_3^- легкорастворимы, а соли с анионами F^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} – труднорастворимы в воде.

В природных условиях Ra встречается преимущественно в рассеянном состоянии и вследствие чрезвычайно низкого кларка ($1 \cdot 10^{-10}$ %) самостоятельных минералов не образует. Наиболее высокие содержания Ra отмечаются в кислых породах, а наиболее низкие – в ультрабазитах. Среднее содержание Ra в глинах и глинистых сланцах $1 \cdot 10^{-10}$ %.

Наиболее распространенный изотоп ${}^{226}_{88}Ra$ образуется за счет α -распада иония Io (${}^{230}_{90}Th$). Изотоп ${}^{226}_{88}Ra$ является α -излучателем с периодом полураспада 1602 лет. Кроме этого изотопа, в природе еще известен продукт цепочки ядерных превращений семейства U^{235} – ${}^{223}_{88}Ra$ ($T = 11,43$ сут) и продукт цепочки Th^{232} – ${}^{224}_{88}Ra$ ($T = 3,64$ сут).

Радон (Rn). Радиоактивный инертный газ (эманация), существует в природе как одно из промежуточных звеньев в цепочке ядерных превращений семейства U^{238} . Образуется в результате α -распада ${}^{226}_{88}Ra$. Массовое число 222, атомный номер 86, период полураспада 3,825 сут. Является α -излучателем. К настоящему времени известно 19 изотопов Rn с массовыми числами 204 и от 206 до 224. Искусственным путем получено 16 изотопов. В природных средах существует всего три изотопа Rn.

Эманация тория – Tn (${}^{220}_{86}Rn$ – торон) является членом другого естественно-радиоактивного семейства – ряда ${}^{232}_{90}Th$. Это изотоп радона с массовым числом 220 и периодом полураспада 55,6 с.

Третий природный изотоп радона – актинон An (${}^{219}_{86}Rn$). Так же как радон и торон, он является радиоактивным газом, относящихся к группе инертных (благородных) газов. Актинон является членом семейства актиноурана ${}^{235}_{92}U$, его массовое число 219, период полураспада 3,96 с.

Рассматриваемые эманации распространены в почвенном и (очень незначительно) в атмосферном воздухе, а также в минеральных источниках. Концентрация Rn в почвенном воздухе изменяется в широких пределах: от $2,6 \cdot 10^{-15}$ до $44 \cdot 10^{-15}$ %. В районах развитого уранового оруденения концентрация Rn в почвенном воздухе может достигать 10^{-12} %. В атмосферном воздухе

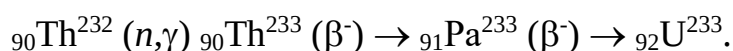
концентрация Rn невелика, примерно на три порядка ниже нормальной концентрации в почвенном воздухе, и составляет $\sim 4 \cdot 10^{-18} \%$.

В природных водах концентрация Rn меняется в очень широких пределах – от $4 \cdot 10^{-16}$ до $4 \cdot 10^{-10} \%$.

Торий (Th). Естественнo-радиоактивный элемент Th состоит из одного изотопа с массовым числом 232, который является родоначальником ториевого семейства. Открыт Берцелиусом в 1828 г., а его радиоактивность обнаружена М. Кюри в 1898 г.

Торий – металл белого цвета, плотностью $11,7 \text{ г/см}^3$, темнеющий на открытом воздухе. Торий является относительно широко распространенным элементом, его присутствие можно обнаружить практически в любой горной породе. Кларк Th составляет $1,5 \cdot 10^{-3} \%$ (15 г/т), т. е. примерно в четыре раза выше кларка урана. Наиболее высокое содержание тория отмечается в кислых породах (18 г/т), минимальные – в ультрабазитах (до $5 \cdot 10^{-7} \%$). В некоторых типах изверженных пород содержание Th достигает сотых долей процента, в глинах и глинистых сланцах – 11 г/т.

Известно более 120 Th-содержащих минералов, однако промышленное значение имеют немногие: монацит $(\text{GeLaTh})(\text{PO}_4)$, торит ThSiO_4 , ураноторит, торианит и др. Торий тесно связан с редкими землями и U. Основным источником Th является монацитовый песок. Не меньшую ценность представляет и находящийся в его составе Се. Торий может использоваться для получения делящегося материала, которым наряду с U^{235} , Pu^{239} является U^{233} . Этот изотоп получается по ядерной реакции



Калий (K). Среди трех природных изотопов калия только ${}_{19}\text{K}^{40}$ является радиоактивным с содержанием в естественной смеси 0,0119 % и периодом полураспада $T = 1,27 \cdot 10^9$ лет. Физико-химические свойства K резко отличаются от свойств других радиоактивных элементов. Прежде всего K распространен в природе в несравненно больших количествах. Кларк K в земной коре равен 2,4 %, высокие содержания отмечены в щелочных и кислых породах – 4,9 и 3,6 % соответственно, минимальные – в ультрабазитах – 0,03 %. Калий относится к группе щелочных металлов, имеет порядковый номер 19, атомную массу 39,1 и плотность $0,86 \text{ г/см}^3$.

Из наиболее распространенных K-содержащих минералов, обуславливающих повышенную радиоактивность горных пород, можно назвать сильвин $\hat{\text{E}}\text{Cl}$, карналлит, микроклин и ортоклаз. В глинистых минералах

значительная часть $\hat{E}$ находится в сорбированной форме и прочно связана с ними. Наиболее сильно $\hat{E}$ адсорбируется гидрослюдами.

1.5.4. Естественно-радиоактивные элементы в природе

Естественная радиоактивность горных пород обуславливается присутствием в их составе K, U и Th. Присутствие радиоактивных элементов в том или ином количестве характерно для всех горных пород – изверженных, метаморфических и осадочных, а также для современных почв и донных осадков различных водоемов.

Радиоактивность изверженных пород. В результате изучения радиоактивности изверженных пород были установлены закономерности.

Массовые доли U и Th, а соответственно и продуктов их распада, значительно выше в кислых породах, чем в основных; радиоактивность изверженных пород растет в направлении от ультрабазитов к кислым.

Радиоактивные элементы в магматических породах концентрируются в основном в цветных и акцессорных минералах: монаците, цирконе, сфене, рутиле, биотите и др. В наиболее общем случае в минералах пород гранитного ряда радиоактивность, связанная с U и Th, растет в направлении кварц → полевые шпаты → слюды → магнезиально-железистые минералы → акцессорные минералы. Особенности концентрации радиоактивных элементов обуславливают неодинаковую радиоактивность пород даже одного и того же интрузивного массива; для гранитов она обычно выше в зонах концентрации акцессорных минералов, в сравнении с участками, сложенными кварцем и полевыми шпатами альбитового ряда.

Радиоактивность метаморфических пород. Зависит, во-первых, от радиоактивности исходных пород, а во-вторых, от характера метаморфизма: происходил ли он с привносом материала, включая радиоактивные элементы, или этого привноса не было. Кроме того, при метаморфизме осадочных толщ может происходить минеральная перегруппировка внутри образований с обеднением или обогащением их ЕРЭ в отдельных участках толщи. Считается, что в результате перегруппировки U внутри пород, подвергшихся изменению, могут образовываться так называемые метаморфогенные месторождения урана. Из сказанного можно сделать выводы:

Радиоактивность метаморфических пород весьма различна не только для разных пород, но и для одной и той же толщи.

Радиоактивность гнейсов и сланцев, образовавшихся из глинистых отложений, в целом оказывается выше, чем радиоактивность мраморов и кварцитов, образовавшихся из осадков с пониженной радиоактивностью.

Радиоактивность пород растет при гидротермальном метаморфизме.

Радиоактивность осадочных пород. Среди осадочных пород наибольшей радиоактивностью отличаются калийные соли, глины и, особенно, горючие сланцы. Наименьшей радиоактивностью обладают известняки, доломиты, гипс, ангидрит, галит. Радиоактивность песчаников увеличивается с ростом содержания глинистого материала, слюд и акцессорных минералов. Резко аномальные содержания радиоактивных элементов нередко фиксируются в природных средах с развитием органических остатков.

В некоторых разностях углей, фосфоритов, песчаников и известняков содержание ЕРЭ может достигать промышленных значений. Нередко в осадочных породах повышенные концентрации U обусловлены гипергенными процессами выщелачивания и его переотложением в более благоприятных участках осадочных толщ. Замечено, что морские отложения содержат более высокие концентрации ЕРЭ, чем осадочные породы речного и озерного происхождения. Накопление ЕРЭ элементов в осадочных породах связано также с адсорбцией их тонкокластическим (глинистым) материалом из водоемов, где шло осадконакопление. Более подробные сведения о радиоактивности природных сред приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Содержания ЕРЭ и интенсивность γ -излучения природных сред

Породы, объекты	Содержание элементов				γ -поле I_γ , мкР/ч	Парциальные доли ЕРЭ в I_γ (%)			Отношения ЕРЭ		
	Ra, мкг/т	U, г/т	Th, г/т	K, %		U γ	Th γ	K γ	Th/U	U/K	Th/K
Земная кора (ЗК)	0,8 0,6-1,3	2,3 1,8- 4,4	8,0 5-13	2,4 2,3-2,6	8,4 5- 8	26 22-32	46 40-48	28 24-34	3,5 2,5-4,5	1,0 0,8-1,5	3,5 2,0-5
Гранитный слой ЗК	1,2 0,8-1,7	3,6 2,4- 5,0	15,5 12-18	3,6 2,5-3,6	12,5 10- 15	24 23-31	52 48-54	24 19-26	4,0 3,0-5	1,0 0,8-2,0	4,0 3,5-6
Базальтовый слой ЗК	0,3 0,2-0,5	1,0 0,6- 1,5	3,3 1,8-3,8	1,0 0,7-1,2	3,5 2,0-5,0	28 22-32	44 40-48	28 24-34	3,5 3,0-4	1,0 0,8-1,5	3,5 2,0-4
Щелочные породы	1,6 0,1-30	4,7 0,3- 89	18,5 5-80	4,9 3- 12,5	18,0 9-130	25 20-35	49 40-55	26 23-32	4,0 1,0-8	1,0 0,9-3,0	4,0 1,5-9
Кислые породы	1,2 0,2-17	3,5 0,6- 35	15,5 3-96	3,6 1,6-9,0	15,0 8-95	24 20-35	52 45-55	24 20-30	4,0 1,5-15	1,0 0,8-2,0	4,5 3-8
Средние породы	0,7 0,1-1,9	2,0 0,3- 5,6	8,3 2-34	2,2 0,8-6,8	8,0 2- 23	24 20-30	49 45-55	27 22-30	4,0 1,5-7	1,0 0,8-1,5	4,0 2-6
Основные породы	0,3 0- 0,9	0,9 0,1- 2,7	3,5 0,5-15	1,0 0,3-1,8	3,5 0,5-10	25 20-30	47 40-50	28 24-34	4,0 1,5-6	1,0 0,8-1,5	3,5 2,5-5
Ультра-базиты	0,01 0-0,02	0,03 0- 0,06	0,1 0-0,3	0,03 0-0,2	0,1 0- 2,0	27 22-32	46 40-48	27 24-34	3,5 1,0-4	1,0 0,8-1,5	3,0 2-4

Известняки	0,4 0,3-4,5	1,2 0,9- 12	2,5 0,7-8	0,4 0,1-1,2	2,5 1,5-13	43 35-50	43 35-50	14 10-20	2,0 0,5-5	3,0 1,5-4	6,0 4-8
Сланцы	1,0 0,1-5,0	2,9 0,3- 90	10,0 8-17	2,7 0,7-3,2	10,0 5-25	27 22-40	47 40-50	26 20-35	3,5 1,0-5	1,0 0,8-1,5	3,5 2-7
Глины	1,3 0,2-26	3,5 0,8- 78	7,0 5-16	2,3 0,6-2,9	9,0 4- 25	38 33-60	36 30-40	26 8-30	2,0 0,5-4	2,0 1,0-8	3,0 2-5
Песчаники	0,7 0,1-2,7	2,1 0,3- 8	9,0 6-30	2,1 1,1-3,0	7,5 4,5-18	24 20-30	52 45-60	24 20-30	4,5 1,5-7	1,0 0,8-1,5	4,0 2-10
Почвы	0,8 0,2-2,5	2,1 0,3- 4,5	6,0 2,5-15	1,4 0,3-3,6	6,0 1,8-15	32 25-55	46 30-50	22 10-25	3,0 1,0-4,5	1,5 1,0-6	4,0 2-6
Морские илы	2,0 0,3-15	3,2 1,0- 20	4,6 1,6-8,8	1,2 0,5-2,5	6,5 3- 30	48 40-65	34 25-35	18 10-25	1,5 0- 3	2,7 1,5-10	4,0 3-5
Морская вода	10 ⁻⁴	0,003	0,001	0,04	0	7	2	91	0,3	0,07	0,02

Примечания: 1. В числителе приведено среднее значение, в знаменателе - возможные отклонения; 2. Модули U/K и Th/K указаны в (г/т)/%.

Основная часть U и Th присутствует в горных породах, растениях и живых организмах в рассеянном состоянии. В благоприятных условиях эти элементы создают рудные скопления с коэффициентом концентрации от двух до четырех порядков (10^2 - 10^4). В первичных и вторичных ореолах урановых месторождений этот коэффициент снижается до 5-50 единиц.

Высокая геохимическая активность U является причиной большого разнообразия его природных образований, встречающихся в форме 4-валентных U^{4+} и неустойчивых 6-валентных U^{6+} соединений. Эти особенности обеспечивают возможность промышленных скоплений U в самых разнообразных геологических условиях. Месторождения U имеют разное происхождение и встречаются в кристаллическом основании фундамента, осадочном чехле древних и молодых платформ, и особенно широко – в областях послеплатформенного орогенеза. Они отличаются по вещественному и минеральному составам руд и не обнаруживают выраженной тенденции к устойчивой ассоциации с определенными типами месторождений других типов полезных ископаемых.

Все известные наиболее значительные концентрации U связаны с эндогенными и экзогенными процессами, протекающими в орогенных условиях формирования или распада коры континентального типа. В областях с корой океанического типа крупные месторождения U не обнаружены.

В 1986 г. академиком Н. П. Лаверовым была предложена генетическая систематика месторождений U, учитывающая новые данные и сохраняющая

привычные для специалистов основные подразделения. Среди них выделены четыре основные серии: эндогенная, экзогенная, метаморфогенная и полигенная. При этом схема систематики эндогенных месторождений насчитывает три типа: А – эндогенные месторождения, связанные с щелочно-ультраосновным метаморфизмом, Б – связанные со щелочным магматизмом и В – связанные с гранитоидным метаморфизмом.

Месторождения экзогенной серии разделяются на две группы: седиментационно-диагенетические и инфильтрационные (эпигенетические), образованные поверхностными и подземными водами. В первую группу входят осадочные месторождения, образованные в речных, озерно-болотных и морских условиях. Вторая группа подразделяется на три класса месторождений, образованных грунтовыми, пластовыми и трещинными подземными водами. Внутри выделяются типы экзогенных месторождений, отличающихся минеральным и вещественным составом руд, условиями их формирования и морфологией рудных тел.

Месторождения метаморфогенной серии подразделяются на две группы – метаморфизованные и ультраметаморфизованные. Группы включают несколько классов, которые в свою очередь состоят из конкретных типов месторождений.

Месторождения полигенной серии в качестве самостоятельных выделяются Лаверовым впервые. Они включают 2 группы, 3 класса и 6 типов месторождений, например полиметаллические урановые (Ni, Co, Cu, Ag).

1.6. Метрология радиационных измерений

1.6.1. Измеряемые величины и единицы измерений [48]

Физические величины, прямо или косвенно определяемые при радиационных измерениях, приведены в табл. 1.4. Это – масса и массовая доля радиоактивных веществ, активность, плотность потока ионизирующих излучений и дозовые характеристики γ -поля. Для удобства работы с литературой наряду с единицами системы СИ в табл. 1.4. приведены ранее применявшиеся единицы и их соотношения с единицами СИ.

В соответствии со стандартом СЭВ 1052-78 массу радиоактивных веществ выражают в килограммах и производных от них единицах (миллиграммах, граммах, тоннах и т. п.).

Содержание радиоактивных веществ (ГОСТ 8.505, прил. 4) – обобщающее наименование физических величин: массовой и объемной доли, массовой концентрации, которые количественно характеризуют состав горных

пород и руд. Единицами их измерений являются массовые и объемные проценты, кг/кг, кг/м³ и др.

Единицей *активности*, характеризующей число ядерных превращений в источнике в секунду, является *беккерель* (Бк). Один беккерель соответствует активности источника, в котором происходит одно ядерное превращение в секунду. Переход от активности a (Бк) радионуклида с постоянной распада λ (с⁻¹) к массе M (г) осуществляется по формуле

$$a = \lambda \frac{N_A}{A} M, \quad (1.54)$$

где N_A – число Авогадро; A – массовое число радионуклида.

Таблица 1.4

Единицы измерения радиоактивных веществ и ядерных излучений

Физическая величина	Единицы измерения		Соотношение единиц
	система СИ	внесистемные ед.	
Масса	кг	мг-экв Ra	1 мг-экв Ra = 10 ⁻⁶ кг Ra (по γ -излучению)
Активность	беккерель (Бк)	кюри (Ки)	1 Ки = 3,7·10 ¹⁰ Бк 1 Бк = 2,7·10 ⁻¹⁰ Ки
Массовая доля	кг/кг, % мас.	г/г, % мас.	1 % мас. = 0,01 кг/кг 1 кг/кг = 100 % мас.
Объемная доля	м ³ /м ³ , % об.	см ³ /см ³ , % об.	1 % об. = 0,01 м ³ /м ³ 1 м ³ /м ³ = 100 % об.
Удельная активность	Бк/кг	Ки/г, Ки/кг	1 Ки/г = 3,7·10 ¹³ Бк/кг 1 Бк/кг = 2,7·10 ⁻¹⁴ Ки/г
Объемная активность	Бк/м ³	Ки/л, эман	1 Ки/л = 3,7·10 ¹³ Бк/м ³ 1 эман = 10 ⁻¹⁰ Ки/л 1 Бк/л = 0,27 эман
Плотность потока ядерных частиц	с ⁻¹ ·м ⁻²	с ⁻¹ ·см ⁻²	1 с ⁻¹ ·см ⁻² = 10 ⁴ с ⁻¹ ·м ⁻² 1 с ⁻¹ ·м ⁻² = 10 ⁻⁴ с ⁻¹ ·см ⁻²
Энергия	джоуль (Дж)	эВ	1 эВ = 1,602·10 ⁻¹⁹ Дж 1 Дж = 6,24·10 ¹⁸ эВ
Плотность потока энергии	Вт/м ²	эВ/(см ² ·с)	1 эВ/(см ² ·с) = 1,602·10 ⁻¹⁵ Вт/м ² 1 Вт/м ² = 6,24·10 ¹⁴ эВ/(см ² ·с)
Экспозиционная доза излучения	Кл/кг	рентген (Р)	1 Р = 2,58·10 ⁻⁴ Кл/кг 1 Кл/кг = 3,88·10 ³ Р
Мощность экспозиционной дозы излучения	А/кг	Р/с, мкР/ч	1 Р/с = 2,58·10 ⁻⁴ А/кг 1 мкР/ч = 0,0717 пА/кг

			1 пА/кг $\cong$ 14 мкР/ч
Поглощенная доза излучения	грей (Гр)	рад	1 рад = 0,01 Гр 1 Гр = 100 рад
Мощность поглощенной дозы излучения	Гр/с	рад/с	1 рад/с = 0,01 Гр/с 1 Гр/с = 100 рад/с
Эквивалентная поглощенная доза излучения	зиверт (Зв)	бэр	1 бэр = 0,01 Зв 1 Зв = 100 бэр

Ранее активность выражали в *кюри* (Ки), понимая под этим число ядерных превращений в секунду в 1 г Ra без его продуктов распада. В соответствии с (1,54) при $M_{Ra} = 1$ г активность Ra составит $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк.

Различают *массовую* (или удельную) и *объемную* активность. В первом случае это активность вещества единичной массы (Бк/кг), во втором - вещества единичного объема (Бк/м³). Обычно в радиометрии объемная активность выражается в Бк/л при оценке концентраций эманаций. Ранее применяли единицу измерения удельной активности – кюри на литр (Ки/л) и производную от нее – *эман*: 1 эман = 10^{-10} Ки/л.

Плотность потока частиц и квантов имеет размерность $c^{-1} \cdot m^{-2}$, плотность потока энергии – Вт/м². Из-за сложности измерения потока энергии для количественной характеристики рентгеновского и γ -излучения на практике используют дозовые параметры. Под *дозой* понимается энергия излучения, предназначенная для передачи или переданная среде и рассчитанная на единицу массы или объема этой среды. Доза, определяемая по степени ионизации воздуха в условиях электронного равновесия, называется *экспозиционной дозой D*; доза, определяемая поглощенной энергией в любом другом веществе, – *поглощенная доза X*. Доза, отнесенная к единице времени, – *мощность дозы*.

Единица экспозиционной дозы – кулон на килограмм (Кл/кг). Это экспозиционная доза рентгеновского или γ -излучения, при которой сопряженная корпускулярная эмиссия в одном килограмме сухого атмосферного воздуха за время t образует ионы, несущие заряд каждого знака, соответствующий 1 Кл. Единица *мощности экспозиционной дозы (МЭД)* – кулон на килограмм в секунду [Кл/(кг·с)] или ампер на килограмм (А/кг).

Мощность экспозиционной дозы I_D (А/кг) от полиэнергетического источника с квантовым выходом K_i и плотностью потока i -й линии спектра n_i ($c^{-1} \cdot m^{-2}$)

$$I_D = \frac{D}{t} = \sum_{i=1}^K \frac{E_i n_i}{F}, \quad (1.55)$$

где E_i - энергия i -й линии в спектре γ -излучения (эВ);
 F - энергетический эквивалент (Кл /кг), равный $2,75 \cdot 10^{14}$ эВ.

1.6.2. Эталоны и образцовые меры [48]

В радиометрической разведке используют стандартные образцы состава ЕРЭ и их активности, а также образцовые источники плотности потока заряженных частиц и мощности дозы γ -излучения.

Стандартные образцы состава, аттестованные по массовой доле К, U и Th, изготавливают в виде порошковых препаратов для целей радиометрического анализа, а также в виде насыщенных и ненасыщенных по γ -лучам рудных моделей, используемых для градуирования γ -спектрометров.

Стандартные образцы активности Rn представляют собою водные растворы $RaCl_2$, аттестованные по массе Ra с погрешностью 1-3 % отн. Обычно это жидкие радиевые эталоны типа ЕВ-8, ЕВ-9, ЕВ-10 с массой Ra, соответственно $(100,10,1) \times 10^{-10}$ г, а также другие источники этого типа с массой Ra до $5 \cdot 10^{-6}$ г (ЕВ-65). В герметичном сосуде (после предварительного продувания), содержащем водный раствор Ra с массой M_{Ra} (г), за время t образуется Rn активностью в Бк:

$$a_{Rn} = 3,7 \cdot 10^{10} M_{Ra} [1 - \exp(-\lambda_{Rn} t)], \quad (1.56)$$

или в кюри (Ки):

$$a_{Rn} = M_{Ra} [1 - \exp(-\lambda_{Rn} t)]. \quad (1.57)$$

В качестве образцовых источников плотности потока α -частиц используют радиоизотопы Pu²³⁹, Pu²³⁴, U²³⁸; β -частиц – Sr⁹⁰ в равновесии с Y⁹⁰; нейтронного излучения – Pu+Be, Cf²⁵² и др.

Стандартные образцы мощности дозы γ -излучения изготавливают из смеси солей $RaSi_4$ и $BaSi_4$ в виде ампульных источников в Pt-Ir-экране толщиной 0,5 мм или в другом кожухе, с толщиной стенок, эквивалентной по поглощающим свойствам 0,5 мм Pt. Обычно это источники типа ЕР, аттестованные по массе Ra (мг) с погрешностью 0,5-2,0 % отн. Из них наиболее удобны для использования источники P₁₋₂, C₄₁ с массой Ra соответственно 1,0 и 0,1 мг, также ЕР-1 и ЕР-14.

Расчетная мощность дозы (пА/кг) γ -излучения источника массой M_{Ra} (мг) на расстоянии R (м) описывается соотношением

$$I_D(R) = 60,2 \frac{M_{Ra}}{R^2}. \quad (1.58)$$

Мощность дозы в микрорентгенах в час (мкР/ч):

$$I_D(R) = 840 \frac{M_{Ra}}{R^2}. \quad (1.59)$$

Сопоставляя между собою (1.58) и (1.59), видно, что $1 \text{ пА/кг} \cong 14 \text{ мкР/ч}$.

1.6.3. Средства измерения и их метрология

В качестве средств измерения в радиометрической разведке используют радиометры, эманометры, γ -спектрометры разного назначения (табл. 1.5). Измерения этими приборами физических величин относятся к разделу косвенных. Для перехода к их действительным значениям выполняют градуирование аппаратуры с помощью эталонов и образцовых мер.

При измерениях часто говорят о *пороге чувствительности*, под которым принято понимать наименьшее значение измеряемой величины, которое может быть обнаружено прибором в превышении над флуктуацией фонового излучения с заданной доверительной вероятностью.

Значение порога чувствительности L оценивают по формуле

$$L = k\sigma_{\phi}, \quad (1.60)$$

где σ_{ϕ} - среднеквадратическое отклонение измеряемых значений фона;

k - коэффициент, соответствующий значению доверительной вероятности (обычно $k = 3$).

1.6.4. Погрешности измерений

Разность Δ между результатом измерения x и истинным значением x_0 измеряемой величины называется *погрешностью измерений*:

$$\Delta = x - x_0.$$

По своей структуре погрешности измерений подразделяются на систематические, случайные, грубые, аппаратные, методические, абсолютные и относительные.

Систематическая погрешность представляет собою составляющую погрешности Δ , остающуюся постоянной или закономерно изменяющуюся при повторных измерениях одной и той же величины.

Случайная погрешность — это составляющая погрешности Δ , изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях.

Грубая погрешность – отклонение измеряемой величины от истинной вследствие грубого нарушения методики измерений оператором или вследствие неисправности аппаратуры.

Таблица 1.5

Радиометрическая аппаратура и ее характеристики

Прибор	Область применения	М, кг	Питание	Детектор	Регистратор	Порог чувствительности	Верхний предел регистрации
СРП-68-01, радиометр	Пешеходная γ -съемка	3,6	А-343 (9 шт.)	NaI(Tl) 30×25 ФЭУ-85	Стрелочный, телефон	0,07 при фоне 0,35 пА/кг	215 пА/кг
СРП-88Н, радиометр	Пешеходная γ -съемка	2,2	А-343 (4 шт.)	NaI(Tl) 25×40 ФЭУ-85	Цифровой индикатор	0,1 пА/кг	600 пА/кг
СРП-88Н1, радиометр	Шпуровая γ -съемка	4,1	А-343 (4 шт.)	NaI(Tl) 10×40 ФЭУ-60	Цифровой индикатор	0,2 пА/кг	600 пА/кг
СП-4, переносной γ -спектрометр	Пешеходная γ -съемка	6,8	Рубин (5 шт.)	NaI(Tl) 80×80 ФЭУ-110	Стрелочный, цифровой	U, Th – 1 г/т; К – 0,2 %	U, Th – 0,03 %; К – 25 %
РКП-305, «Карат», концентрометр	Пешеходная и шпуровая γ -съемка	9,2	А-343 (9 шт.)	NaI(Tl) 80×80 ФЭУ-110	Цифровая индикация U, Th, К	U, Th – 0,4 г/т; К – 0,1 %	U, Th – 0,05 %; К – 50 %
СКАТ-77, комплексная аэрогеофизическая станция	γ -спектрометр, магнитная, электрическая аэросъемка	430	Бортовая сеть 27 В	NaI(Tl) 200×100 (2-12 шт.) ФЭУ-110	Аналоговый, цифровой магнитный (РУМС-2000)	U – 0,2 г/т; Th – 0,5 г/т; К – 0,05 %	U – 0,025 %; Th – 0,1 %; К – 32 %
РСС-006, скважинный γ -спектрометр	γ -спектрометр. каротаж	20	11-16 В; 5 Вт	CsI(Tl) 25×80 ФЭУ-67Б	Цифро-аналоговый	U, Th – 5 г/т; К – 1 %	U, Th – 3 %; К – 50 %
«Гамма-01С», лабораторный γ -спектрометрический комплекс	Измерения и обработка спектров γ -излучения	20, 320 Pb	Сеть ~220 В	NaI(Tl) 75×40, энергетич. разрешение – 8 % (662 кэВ)	Встроенный в ПЭВМ АЦП с ПГ обеспечением	0,03 пА/кг	2000 пА/кг
РГА-01, «Глициния», α -радиометр, эманометр	Эманиационная съемка	9	Марс-373 (6 шт.)	ZnS(Ag), пластмасса	Цифровое табло	0,3 Бк/л	10 ⁵ Бк/л

Абсолютная погрешность – это погрешность измерений Δ , выраженная в единицах измеряемой величины.

Относительная погрешность δ – это абсолютная погрешность в нормировке к истинному значению измеряемой величины, выраженная в %:

$$\delta = \frac{x - x_0}{x_0} 100 \%. \quad (1.60)$$

Основным параметром, характеризующим рассеяние измеряемой величины, является среднеквадратическое отклонение результата измерений:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2}. \quad (1.61)$$

Поскольку в эксперименте вместо истинного (заранее неизвестного) значения x_0 используют среднее арифметическое из n измерений:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (1.62)$$

то параметр рассеяния многократно измеряемой величины

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (1.63)$$

а параметр рассеяния среднего арифметического значения

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (1.64)$$

В метрологии, кроме того, существуют понятия точности, правильности, сходимости и воспроизводимости измерений (ГОСТ 16263-70).

Точность отражает близость результатов измерений к истинному значению измеряемой величины.

Правильность – качество измерений, отражающее близость к нулю систематической погрешности.

Сходимость – близость друг к другу результатов повторных измерений в одинаковых условиях.

Воспроизводимость – близость друг к другу результатов измерений в различных условиях (в разное время, в различных местах, разными методами и средствами).

1.6.5. Корреляционный анализ в радиометрии

В практике геологоразведочных работ нередко приходится иметь дело со статистическими связями между сопоставляемыми величинами, когда каждому

значению некоторой величины x соответствует статистический ряд значений y , и наоборот. Типичным примером статистической связи может служить зависимость между содержанием радиоактивных и нерадиоактивных элементов в некоторых рудах. Выявление и изучение таких связей выполняется с помощью корреляционного анализа.

В зависимости от типа связи различают *линейную* корреляционную связь, когда зависимость между связанными друг с другом величинами выражается линейным уравнением вида

$$y = ax + b, \quad (1.65)$$

и нелинейные статистические связи, когда зависимость между переменными выражается уравнением степени выше первой. Уравнение (1.65) носит название уравнения линейной регрессии y на x .

Допустим, что в результате измерений получен набор точек, через которые требуется провести прямую линию и записать (1.65) с учетом численных значений коэффициентов a и b . Прямую обычно пытаются провести таким образом, чтобы точки на плоскости распределялись по возможности одинаково по обе стороны от проведенной прямой. Для этого необходимо подобрать коэффициенты a и b (и следовательно, построить прямую) с наименьшим среднеквадратичным отклонением от экспериментальных точек, что и осуществляется в *методе наименьших квадратов*.

Построение прямой линейной регрессии разбивается на этапы:

1. Составление перечня (таблицы) всех экспериментальных точек.
2. Вычисление величин Σx , Σy , Σx^2 , Σy^2 , $\Sigma(xy)$.
3. Вычисление коэффициентов a и b по формулам:

$$a = \frac{\sum(xy) - \frac{1}{n} \sum x \sum y}{\sum x^2 - \frac{1}{n} (\sum x)^2} = \frac{\overline{xy} - \bar{x}\bar{y}}{\overline{x^2} - (\bar{x})^2}, \quad (1.66)$$

$$b = \frac{\sum y}{n} - a \frac{\sum x}{n} = \bar{y} - a\bar{x}, \quad (1.67)$$

где символ верхней черты означает среднее значение.

4. Вычисление коэффициента корреляции выполняется по формуле:

$$r = \left\{ \frac{\left[\sum(xy) - \frac{1}{n} \sum x \sum y \right]^2}{\left[\sum x^2 - \frac{1}{n} (\sum x)^2 \right] \left[\sum y^2 - \frac{1}{n} (\sum y)^2 \right]} \right\}^{1/2}. \quad (1.68)$$

В табл. 1.6 показан пример обработки результатов наблюдений, вычисления a , b и коэффициента корреляции r по пяти точкам.

Таблица 1.6

Результаты статистической обработки результатов наблюдений

i	x	y	x^2	y^2	xy
1	5,0	13,7	25,0	187,7	68,5
2	7,2	18,8	51,8	353,4	135,4
3	11,3	26,4	127,7	697,0	298,3
4	23,8	53,1	566,4	2819,6	1263,8
5	45,4	98,2	2061,2	9643,2	4458,3
$n = 5$	$\Sigma x = 92,7$	$\Sigma y = 210,2$	$\Sigma x^2 = 2832,1$	$\Sigma y^2 = 13700,9$	$\Sigma(xy) = 6224,3$

Подставив полученные значения в формулы (1.66) - (1.68), получим параметры уравнения регрессии для нашего примера: $y = 2,1x + 3,1$ при коэффициенте корреляции $r \cong 1$, что указывает на тесную линейную связь между переменными y и x .

Экспоненциальная функция – пример нелинейного вида связи переменных y и x , которую тем не менее можно *линеаризировать*, т. е. после специальных математических преобразований представить в виде линейного уравнения. Вычислим коэффициенты регрессии для уравнения

$$y = be^{ax}. \quad (1.69)$$

Логарифмируя (1.69), имеем: $\ln y = ax + \ln b$; тогда:

$$a = \frac{\sum (x \ln y) - \frac{1}{n} \sum x \sum \ln y}{\sum x^2 - \frac{1}{n} (\sum x)^2}, \quad (1.70)$$

$$b = \exp \left[\frac{\sum \ln y}{n} - a \frac{\sum x}{n} \right]. \quad (1.71)$$

1.6.6. Статистический способ получения уравнения линейной регрессии

Выше был рассмотрен случай установления функциональной зависимости между линейно-связанными величинами y и x на основе так называемого *совместных* измерений. На практике нередко приходится иметь дело с результатами *несовместных* измерений, когда сопоставляемые величины

регистрируются автономно. В этом случае оказывается невозможным получить координатную $x_1, y_1; \dots x_n, y_n$ функцию и ее графическое представление.

Для установления аналитической зависимости в случае несовместных измерений возможно применение способа, основанного на использовании главных параметров (кривых) распределения сопоставляемых величин x и y – средних значений $\bar{x}$, $\bar{y}$ (или модальных для кривых) и стандартных отклонений σ_x , σ_y . Сущность этого способа заключается в следующем [14].

Допустим, что между сопоставляемыми величинами x и y существует линейная зависимость (1.65). Если при этом известны средние значения $\bar{x}$, $\bar{y}$ и стандартные отклонения σ_x , σ_y , то оказывается, что коэффициенты a и b в (1.65) могут быть найдены следующим образом.

Из теории вероятности и математической статистики известны свойства математического ожидания M (среднего значения) и дисперсии D :

$$\begin{aligned}\bar{y} &= M(ax + b) = aM(x) + b = a\bar{x} + b; \\ D(y) &= D(ax + b) = a^2D(x), \text{ откуда:} \\ a^2 &= D(y)/D(x).\end{aligned}\tag{1.72}$$

Учитывая, что $\sigma = \pm\sqrt{D}$, имеем:

$$\begin{cases} \bar{y} = a\bar{x} + b \\ a = \sigma_y / \sigma_x \end{cases}\tag{1.73}$$

Из (1.73) можно найти коэффициент b :

$$b = \bar{y} - \bar{x} \sigma_y / \sigma_x.\tag{1.74}$$

Подставляя выражения для коэффициентов a и b в (1.65), получим следующую формулу для линейной функции $y(x)$ применительно к случаю несовместных измерений:

$$y_i = \left(x_i - \bar{x} + \bar{y} \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \right) \frac{\sigma_y}{\sigma_x}.\tag{1.75}$$

Расчет величин $\bar{x}$, $\bar{y}$, σ_x , σ_y выполняется на основе рядовых измерений сопоставляемых величин по формулам (1.62) и (1.63).

Обозначим через Δy и Δx разности $y_i - \bar{y}$ и $x_i - \bar{x}$ соответственно. Тогда, имея в виду (1.75), получим следующее выражение, которое можно использовать для оценки чувствительности метода в случае несовместных измерений:

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\sigma_y}{\sigma_x}.\tag{1.76}$$

Следует подчеркнуть, что в случае несовместных измерений оказывается принципиально невозможным нахождение коэффициента корреляции между

величинами y и x . Также имеется неоднозначность в выборе знака для коэффициента a (вследствие $\sigma = \pm\sqrt{D}$). Следовательно, этот метод не позволяет получить информацию о *тесноте* связи y и x и может давать неоднозначные предсказания значений одной величины по другой. Данный способ нахождения коэффициентов регрессии (1.65) можно рекомендовать лишь в том случае, когда априорно (заранее) известно:

- между x и y связь *существует*;
- связь *линейная*;
- можно установить *вид связи* – прямая или обратная пропорциональность ($a > 0$ или $a < 0$ соответственно).

Как правило, для выполнения этих двух условий необходимо и достаточно провести несколько совместных измерений (наблюдений) величин x_i и y_i . Количество измерений выбирают из соображений статистической значимости получаемых результатов. Например, для ответа на вопрос о существовании тесной линейной связи ($r > 0,9$) достаточно выполнить 5-7 измерений, а установление наличия слабой нелинейной связи потребует, как минимум, 30-40 измерений.

Рассмотренный метод очень удобен для градуирования геофизической аппаратуры (особенно нескольких приборов и в разное время), когда между аппаратурным параметром и измеряемой величиной существует линейная связь. В этом случае стандартным способом достаточно выполнить градуировку лишь одного прибора, а градуировку остальных выполнить с использованием формул (1.75) – (1.76).

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

КОМПЛЕКСУ



Екатеринбург
2022

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ФИЗИКО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ»

Для выполнения контрольной работы необходимо проработать рекомендуемую литературу по геологическому строению района проектируемых работ, физическим свойствам горных пород и руд построить физико-геологическую модель объекта исследований.

ВВЕДЕНИЕ

Во введении должна быть дана четкая формулировка задания: местоположение участка работ (административная, географическая и геологическая привязка), цель, задачи для составления физико-геологической модели исследования.

1. ГЕОГРАФО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЙОНА РАБОТ

Указывается административное положение района работ. Приводится краткая характеристика рельефа, климата, растительного и животного мира, населенности и путей сообщения, возможности найма рабочей силы на месте или их найма в другом районе. Приводится обзорная карта района работ. Этот раздел составляется по литературным источникам.

2. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА

Указывается геолого-структурное положение района работ.

Данный раздел содержит подразделы: “Стратиграфия”, “Магматизм”, “Тектоника”, “Геоморфология и гидрогеология”, “Полезные ископаемые”. В них приводятся краткие сведения по стратиграфии с указанием состава пород и их мощности, сведения об интрузивных образованиях, тектонике. Подробно описываются рудовмещающие комплексы, гидротермальные и метасоматические процессы, отмечаются рудоконтролирующие факторы. Особо отмечаются процессы метаморфизма, которые обуславливают изменение физических свойств горных пород.

В подразделе «Полезные ископаемые» приводится характеристика месторождений и рудопроявлений всех полезных ископаемых, встреченных в данном районе работ, отмечается их приуроченность к определенным комплексам пород, структурно-тектоническим и металлогеническим зонам. Выделяются полезные ископаемые, на которые площадь проектируемых работ является наиболее перспективной, и более подробно описываются месторождения, типичные для этого полезного ископаемого.

Необходимо уделить особое внимание анализу поверхностных рыхлых отложений, поскольку они могут иметь переменную мощность, неоднородны по составу и часто вносят существенные искажения в геофизические поля.

Текст необходимо иллюстрировать обзорной картой. На карте следует указать положение участка работ. Так же в данной главе необходимо привести один геологический разрез, который берется за основу составления Физико-геологической модели исследования.

3. ПЕТРОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА РАБОТ

На основании геологических/геофизических отчетов прошлых лет, основываясь на справочные материалы дается характеристика по физическим свойствам горных пород.

Составляется упрощенная модель петрофизического разреза объекта исследований.

Физические свойства горных пород и полезных ископаемых района лучше описывать по их генетическим группам (осадочные, вулканогенно-осадочные, магматические и т. п.) Обязательно указываются источники, по которым приводятся данные по физическим свойствам, способы определения, представительность. Эти данные обычно приводят в виде таблицы. Если есть возможность, надо построить гистограммы или вариационные кривые и выполнить статистическую обработку. Наиболее наглядное представление о физических свойствах горных пород и полезных ископаемых дает диаграмма, которую надо обязательно построить. Для ее построения строится колонка, в которую включаются все горные породы района, и около нее – графики всех физических свойств.

Наличие различия физических свойств объекта и вмещающей среды еще не гарантирует возможности его обнаружения соответствующим геофизическим методом. Важное значение имеют и его геометрические параметры – форма, глубина от поверхности, элементы залегания, наличие мешающих геологических факторов (мощный слой приповерхностных рыхлых отложений, экраны из пород высокого сопротивления и т. д.). Поэтому для получения представления о возможностях геофизических методов необходимо дать комплексную **геолого-геофизическую характеристику объектов поисков**, включая их геометрические параметры, физические свойства и возможное влияние геологических помех.

4. ФИЗИКО ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной главе должна быть построена **физико-геологическая модель объекта поисков** и для нее выполнено решение прямой задачи. Для оценки глубинности методов в условиях района прямую задачу следует решить для нескольких положений эрозионного среза. Для характеристики возможностей методов хорошо также привести результаты наблюдений над реальными объектами. Желательно также построить физико-геологические модели для объектов, которые будут затруднять интерпретацию результатов (вызывать искажения, похожие на аномалии от объектов поисков или, маскировать их).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итогом контрольной работы являются выводы о возможностях каждого геофизического метода

ЛИТЕРАТУРА

В данной главе описывается список использованной литературы при выполнении работы.

ПЕРЕЧЕНЬ ВОЗМОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Модель месторождений железа
2. Модель месторождений алмазов
3. Модель месторождений золота
4. Модель месторождений серебра

5. Модель месторождений медно-колчеданных руд
6. Модель месторождений каменного угля
7. Модель месторождений мезозойских бокситов
8. Модель месторождений огнеупорных глин
9. Модель месторождений кварцевых песков
10. Модель месторождений россыпного золота
11. Модель месторождений диатомитов
12. Модель месторождений мергелей
13. Модель месторождений глауконитов
14. Модель железорудных месторождений алапаевского типа месторождений
15. Объемные модели сложных геологических обстановок

ОСОБЫЕ УКАЗАНИЯ

По мере написания контрольной работы расставляются ссылки на литературу (в квадратных скобках в конце цитируемого текста [1], что соответствует номеру в списке литературы)

В конце каждой главы должна быть дана самостоятельная оценка приведенной в главе информации.

В работе обязательно излагается цель проекта, задачи (введение), описывается теория, приведена характеристика, рассматриваются примеры, если нужно приводится сравнительная характеристика, излагается самостоятельный анализ материала, сделаны выводы (заключение)

Работа выполняется шрифтом Times New Roman (12 ил 14) отступы с каждой стороны по 2 см, 1 см на “красную строку”.

Рисунки располагаются после упоминания в тексте (рис.1):



Рис.1. Название рисунка

Таблицы располагаются после упоминания в тексте (табл.2)

Таблица 2

Название таблицы

Министерство образования и науки РФ
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»



В. М. Сапожников

ФИЗИКО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Учебное пособие
по дисциплине «Физико-геологическое моделирование»
для студентов специальности
21.05.03 Технология геологической разведки
специализации «Геофизические методы поиска и разведки
месторождений полезных ископаемых»

УТВЕРЖДАЮ:

Одобрена на заседании кафедры

Геофизики

(название кафедры)

Зав.кафедрой

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'А. Г. Талай', is written over a horizontal line.

Талай А. Г.

(Фамилия И.О.)

Протокол № 8 от 17.04.2019 г.

(Дата)

Екатеринбург – 2019

Введение

Представленный курс лекций в основном ориентирован на изложение методик выявления и изучения месторождений твердых полезных ископаемых. Именно эти объекты являются главными для специальности 21.05.03 Технология геологической разведки.

1. НОРМАЛЬНОЕ ПОЛЕ И ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ. НЕКОТОРЫЕ СПОСОБЫ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

При проведении геофизических работ приходится оперировать понятиями нормального поля и геофизической аномалии. И хотя способы их определения в различных методах могут существенно различаться, основные принципы в этих способах являются общими. Это связано с тем, что задачей геофизических исследований является выявление и классификация неоднородностей в геологической среде.

Нормальное поле

Это такое физическое поле условно однородной геологической среды, которое существовало бы в случае отсутствия объектов, нарушающих однородность этой среды. Например, за нормальное в гравиразведке принимают поле силы тяжести условно однородного сфероида Земли, поверхность которого совпадает с уровнем океанов. Это поле определяют исходя из координат точки наблюдения по широте и долготе с учетом значения поля на экваторе. Для уточнения в это поле вносят поправку Буге, учитывающую влияние толщины и плотности промежуточного (между точкой наблюдения и уровнем океана) слоя.

В магниторазведке также рассчитаны карты нормального поля Земли, которое на ограниченной площади принимают за постоянное значение. Его определяют в соответствии с географическим положением этой площади на материке или в море. В методе радиоволнового просвечивания (РВП) нормальное электромагнитное поле вычисляют с учетом паспортной для передатчика начальной напряженности, геометрии (взаимного расположения элементов) установки и коэффициента поглощения поля (α_k) условно однородной среды (рис. 2).

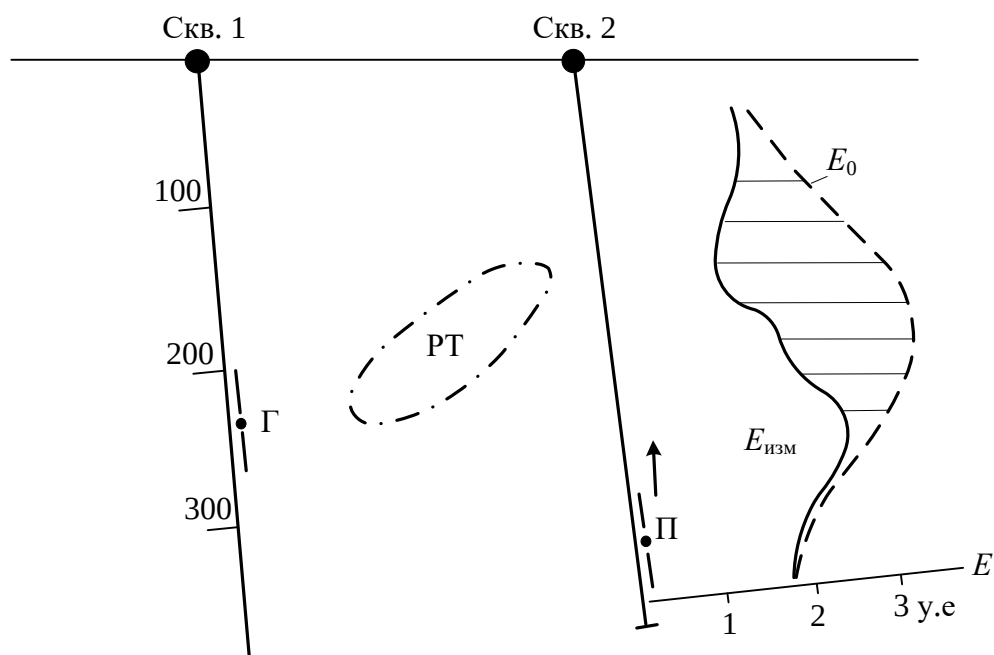


Рис. 2. Пример сопоставления напряженности измеренного ($E_{изм}$) и вычисленного нормального (E_0) поля в методе радиоволнового просвечивания

Г – генераторная антенна; П – приемная антенна; РТ – рудное тело

Похожий подход к определению нормального поля применяют в методе заряда, выражая это поле в виде функции от расстояния точки наблюдения до эпицентра погруженного источника тока. Эту функцию рассчитывают аналитически или определяют стохастическим способом по измеренному полю [13].

В методах, изучающих искусственно возбуждаемые поля, в качестве нормального иногда принимают некоторые обоснованные постоянные значения поля или в виде некоторого диапазона значений с верхним и нижним пределами.

В общем случае нормальным считается поле, обусловленное однородной по конкретному физическому параметру геологической средой. В некоторых случаях условно однородная среда может представлять какую-то структуру, например, горизонтально-слоистое полупространство, измеряемая характеристика поля над которым остается постоянной или изменяется по установленному закону. Принимаемая однородность среды зависит от масштаба исследований. При средне- и крупномасштабных съемках используют понятие о местном нормальном поле, отражающем стохастический подход к его определению.

Стохастический способ определения нормального поля

В методах, изучающих на ограниченной площади естественные физические поля или искусственно возбуждаемые поля при постоянном размере установки (магниторазведка, радиометрия, электропрофилирование и др.), в качестве фона (местного нормального поля) принимают некоторые постоянные значения, характерные для условно однородной геологической среды, которая рассматривается в качестве фоновых объекта. Это может быть массив горных пород, горизонтально-слоистая толща или другая структура, характеристики поля для которой по показаниям применяемой установки в идеале должны сохраняться постоянными.

В реальной геологической обстановке в случае наличия такой структуры на результаты геофизических наблюдений влияет масса случайных факторов: мелкая неоднородность физических свойств фоновых объекта, изменения геометрии его элементов, рельеф местности и т.п. В этих условиях перспективно использовать стохастический (вероятностно-статистический) подход к определению фона.

Простейшим примером служит статистическое определение коэффициента поглощения в методе РВП, который определяется по нескольким значениям, вычисленным на участках трассы измерений, не имеющих признаков экранирования поля генератора проводниками в межскважинном пространстве. Этот коэффициент для изучаемого разреза принимается как постоянная величина и используется при вычислении нормального поля.

Профильная съемка. В более общем случае, как это показано на рис. 3, а на примере профилирования методом вызванной поляризации (ВП) с установкой постоянного размера, исходными являются данные измерений на участке, для которого имеются основания отнести поле на нем к условному фону. Как видно из рис. 3, а, значения кажущейся поляризуемости (η_k) на профиле изменяются в определенных пределах. Для объективного отражения изменчивости поля строится дифференциальная кривая распределения анализируемой характеристики с учетом закона, принимаемого для статистически однородной совокупности этой характеристики. В случае η_k распределение хорошо описывается нормальным законом Гаусса. Построение распределения ведется с применением линейной шкалы с разбивкой диапазона измеренных значений на равные интервалы (классы). Ось ординат отражает частоту появления при измерениях значений поля

для каждого из классов (соответствует середине класса) и принимается в штуках или процентах (рис. 3, б). Для характеристики фона желательно иметь не менее 30 измерений.

При ограниченном объеме выборки для построения детальной кривой распределения в статистике применяют прием, предусматривающий использование второй шкалы значений поля. Ширина классов остается прежней, но их границы смещаются относительно первой шкалы на половину класса. Использование дополнительной шкалы позволяет в 2 раза увеличить число точек, по которым строится распределение, не уменьшая ширину класса.

Значение поля A , встречающееся с максимальной частотой (мода), которое при нормальном законе распределения совпадает со средним и медианой, принимают в качестве центрального значения – $\bar{A}_0$ (в рассматриваемом примере изучения поляризуемости $\bar{\eta}_{k0} = 2.5\%$).

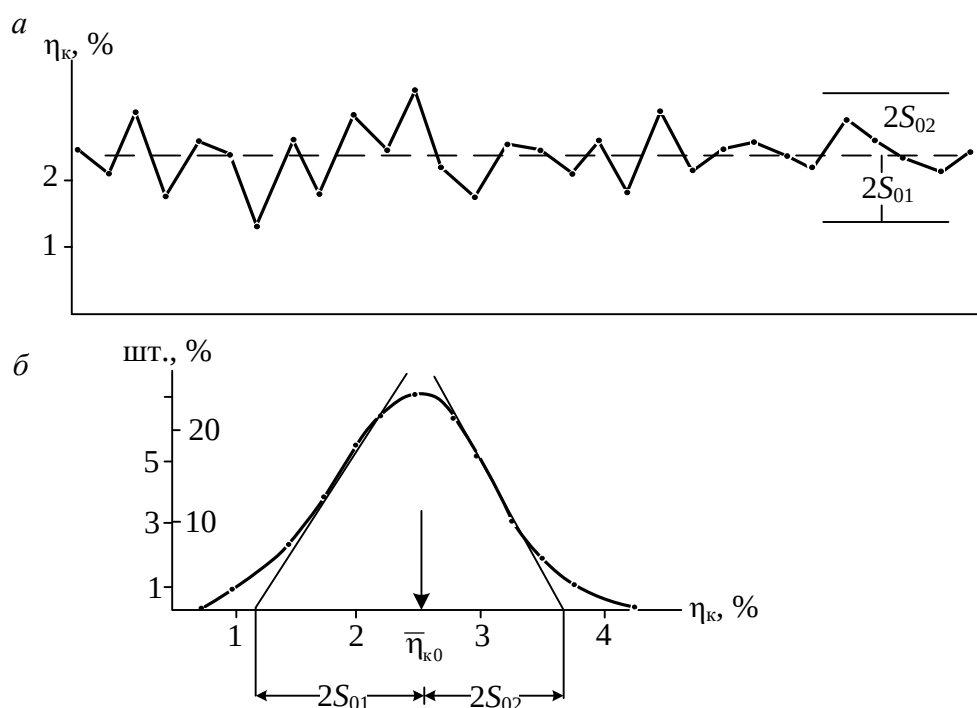


Рис. 3. Графики измеренных значений кажущейся поляризуемости (η_k) методом ВП по профилю в пределах фонового объекта (а) и дифференциальная кривая распределения значений η_k для этого профиля, по которой определяют стохастические характеристики фона (б)

Для характеристики рассеивания значений относительно центрального используют среднеквадратичное отклонение – S_0 . В теории вероятности ему соответствует стандартное отклонение (стандарт). Для его определения к ветвям кривой распределения проводятся две наклонных касательных (рис. 3, б). Согласно теории точки пересечения касательных с осью абсцисс смещены от центрального значения на величины $\pm 2S_0$, а расстояние между точками пересечения равно $4S_0$. В рассматриваемом примере $S_0=0,63\%$.

При упрощенном способе искомые характеристики определяют графически по графикам измеренного поля на фоновом объекте. Осредняющая график прямая соответствует значению $\bar{A}_0$, а величина S_0 определяется по диапазону изменения фона, который приблизительно равен $4S_0$. На рис. 3, а этот диапазон отмечен ограничивающими линиями (в правой части рисунка).

Статистические характеристики нормального поля с распределением по закону Гаусса могут быть вычислены и аналитическим путем. Центральное значение вычисляется как среднее для n рядовых (i) измерений: $\bar{A}_0 = \sum A_{0i}/n$, а величина S_0 определяется по формуле

$$S_0 = \left[\sum_{i=1}^n (A_{0i} - \bar{A}_0)^2 / n \right]^{1/2} \quad (1)$$

По результатам оценки статистических характеристик нормального поля его диапазон с надежностью 95 % принимают равным:

$$A_0 = \bar{A}_0 \pm 2 S_0. \quad (2)$$

Очевидно, что все величины поля, попадающие в этот диапазон, могут рассматриваться как значения фона. По результатам измерений, приводимых на рис. 3, значения в интервале 1.24-3.74 относятся к фоновым характеристикам поля.

При известной величине S_0 к аномальным с надежностью 95 % относятся значения поля, отвечающие условиям: меньше $(\bar{A}_0 - 2S_0)$ или больше $(\bar{A}_0 + 2S_0)$.

Метод заряда. Исходными данными являются значения относительного потенциала, измеренные по некоторой сети, причем для нее известны координаты точек наблюдения, позволяющие определить расстояние от каждой точки до эпицентра заряда. В примере (рис. 4), иллюстрирующем применение способа, результаты съемки поля за-

ряда в рудное пересечение скважины 1 представлены в виде плана изолиний потенциала.

Наиболее распространенной моделью вмещающей среды в этом методе является однородное изотропное или горизонтально-слоистое полупространство. Для реализации способа определения нормального поля на планшете съемки намечаются 6-8 радиальных профилей с началом в эпицентре заряда O . На одном чертеже строят графики измеренного потенциала (U) для этих радиальных профилей как функции расстояния (r) от точки O и проводят осредняющую их кривую $U_{\text{ср}}$. Кривая $U_{\text{ср}}$ и рассматривается в качестве функции нормального потенциала $U_0(r)$. Естественно эту процедуру можно выполнить аналитически по простейшей программе осреднения.

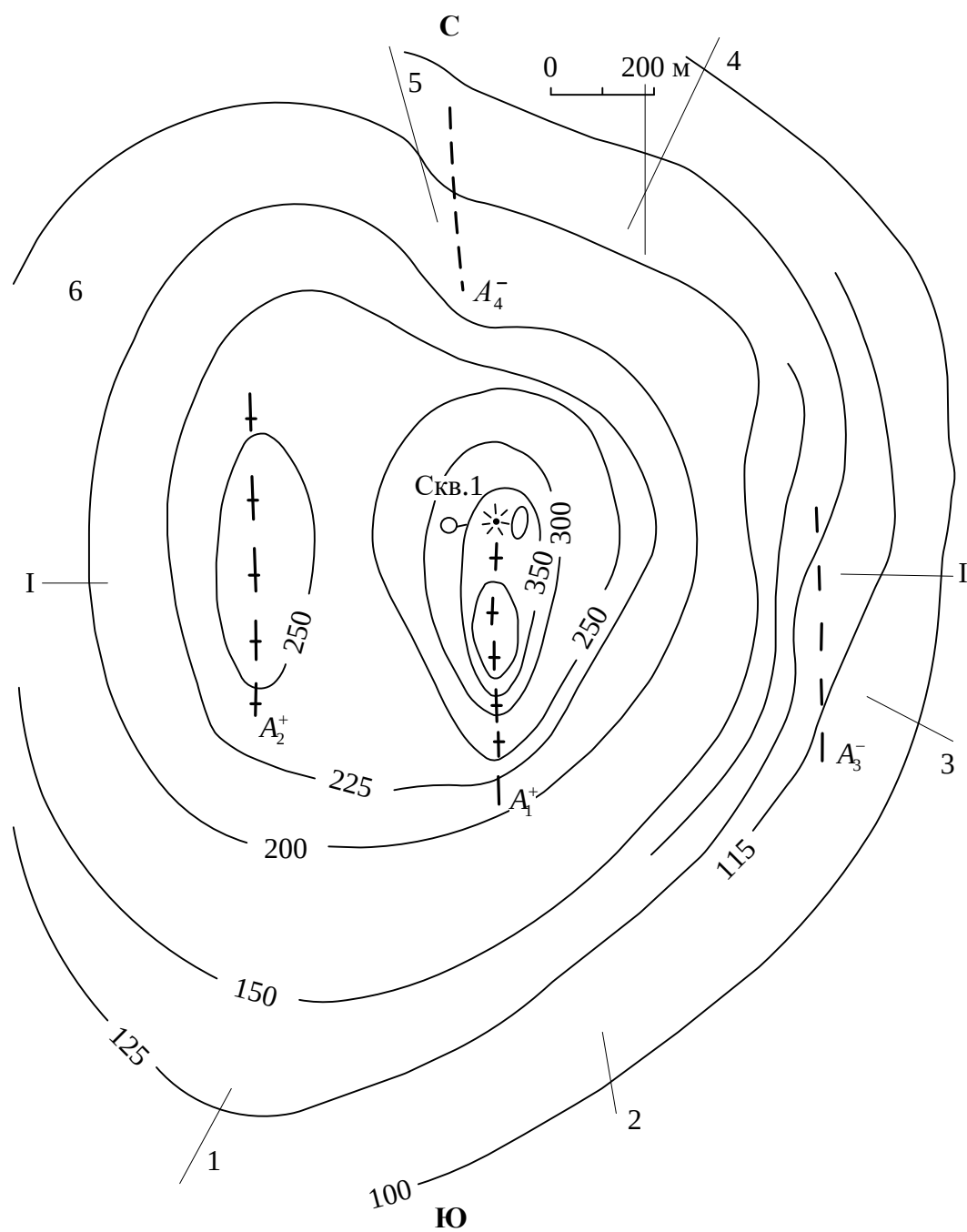


Рис. 4. План изолиний потенциала (в мВ) поля заряда, сделанного в рудное пересечение скв.1:

A^+ , A^- - оси положительных и отрицательных аномалий, 1-6 – радиальные профили, O – эпицентр заряда; I – I – линия геологического разреза

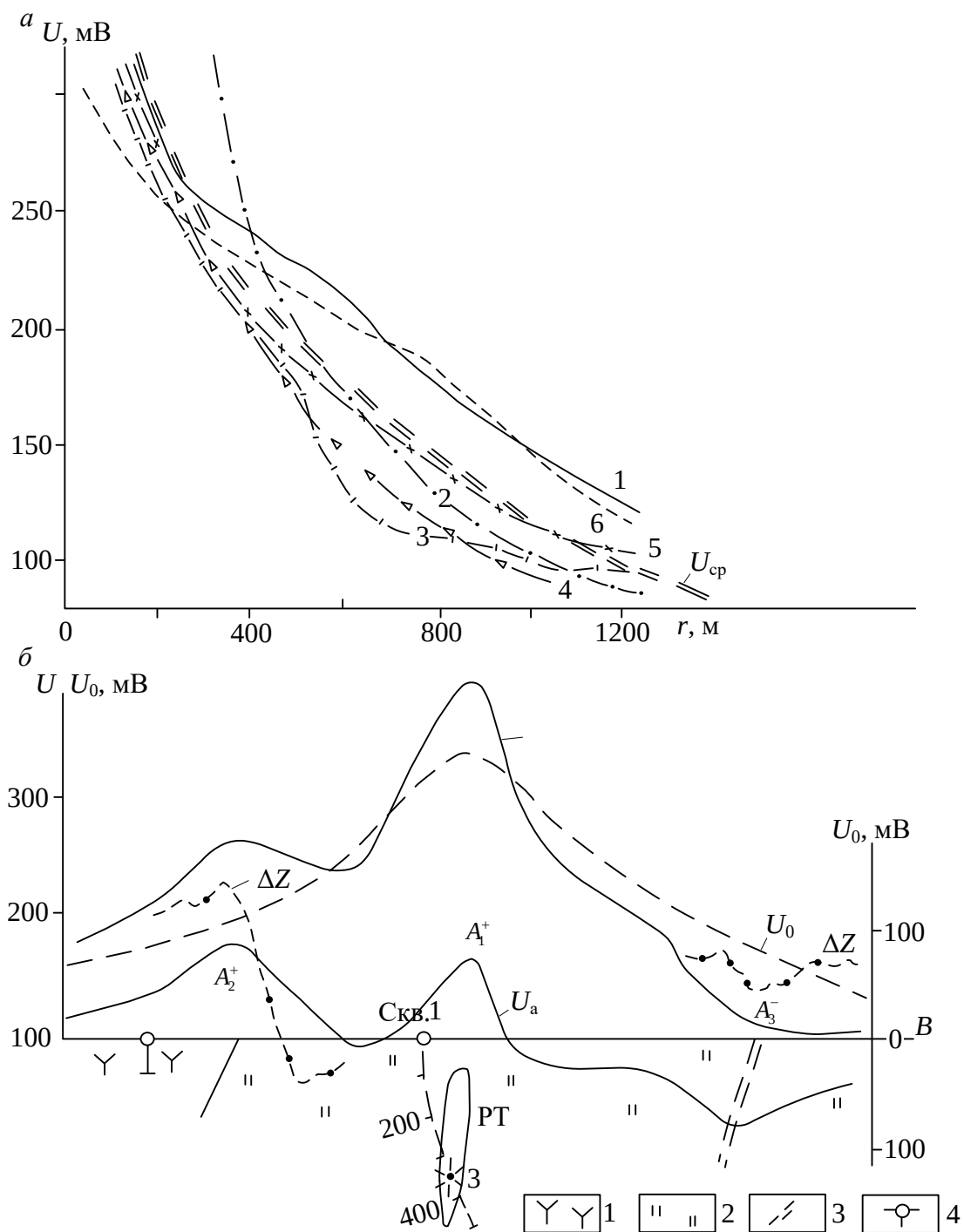


Рис. 5. Результаты обработки и интерпретации поля заряда в скважину 1 (исходные данные на рис. 4):

a – графики потенциала по системе радиальных профилей и осредняющая их кривая ($U_{cp} = U_0(r)$); b – графики измеренного, нормального и аномального потенциала (U , U_0 , U_a), фрагменты измерений магнитного поля (ΔZ) и геологический разрез по профилю I–I.

1 – субвулканические липарито-дациты; 2 – гидротермально измененные породы; 3 – разрывные нарушения; 4 – скважины; 3 – заряд; PT – рудное тело (проекция на плоскость разреза)

В случае наличия признаков проявления анизотропной вмещающей среды стохастический способ определения нормального потенциала в методе заряда применяют с учетом схемы перехода от анизотропной к изотропной среде [13].

По результатам определения нормального потенциала можно при любой ориентировке профилей съемки вычислить нормальный потенциал по профилю. Пример определения в методе заряда по плану изолиний (рис. 4) нормального потенциала по одному из поперечных профилей показан на рис. 5, а.

Геофизические аномалии

Геофизическая аномалия характеризует отклонение физического поля от его нормальных значений. По геофизическим аномалиям изучают неоднородности геологической среды различного масштаба, что позволяет получить представление о самой структуре земных недр. В общем случае, при анализе результатов геофизических измерений в качестве аномальной составляющей рассматривают величину разности между измеренным значением поля в i -ой точке (A_i) и местным нормальным полем (A_0): $A_{ai} = \Delta A_i = A_i - A_0$. Нормальное поле может быть постоянным или плавно меняющимся, задаваться некоторыми средними величинами или, при учете его дисперсии, в виде предельных значений. В общем случае к аномальным относятся значения, превышающие верхний предел нормального поля или оказывающиеся ниже его нижнего предела. В первом случае наблюдается положительная аномалия, а во втором случае отрицательная аномалия.

Например, на рис. 2 аномальная составляющая изображена заштрихованной областью и отражает появление отрицательной аномалии, связанной с экраным влиянием сульфидного рудного тела.

В качестве примера определения аномальной составляющей изучаемого поля могут служить результаты, полученные при обработке и интерпретации данных метода заряда, приводимые на рис. 4 и 5. Данные о распределении нормального потенциала $U_0(r)$ используются для выделения в рядовой точке аномальной составляющей U_a измеренного потенциала U , равной

$$U_a = U - U_0(r). \quad (3)$$

По результатам определения нормального потенциала можно при любой ориентировке профилей съемки вычислить нормальный, а

затем и аномальный потенциал по профилю. Результаты подобных вычислений нормального потенциала, сопоставления его с измеренным полем и график аномального потенциала по одному из поперечных профилей с элементами геологической интерпретации показан на рис. 5, б.

В рассматриваемом примере аномалия A^+_1 связана с приподнятой относительно заряда частью заряженного рудного тела, имеющего северное склонение. Другая положительная аномалия A^+_2 обусловлена контактом гидротермально измененных пород, вмещающих заряженное тело, с менее электропроводной субинтрузией. Отрицательные аномалии фиксируют субвертикальные плоскости разрывных нарушений относительно повышенной электропроводности.

Безразмерные характеристики геофизических аномалий. В ряде случаев для характеристики аномального объекта целесообразно использовать нормирование аномалий относительно каких-то стандартных величин, при котором учитывается уровень фона, снижается зависимость от точности измерений, типа измеряемой аппаратуры, условий наблюдений, вида изучаемого поля. Появляется возможность сопоставлять аномальные эффекты, зафиксированные от одного и того же объекта различными методами или одним методом, но с применением различных технологий, и в других случаях.

В промысловой геофизике при оценке аномалий широко применяется двойной разностный параметр α . Он представляет отношение

$$\alpha = \Delta A_i / \Delta A_0 = (A_i - A_0) / (A_0 - A_0), \quad (5)$$

где ΔA_i – аномалия на рядовом объекте, ΔA_0 – максимальная аномалия на объекте принятом за эталон (может быть и любым объектом с которым производится сравнение). Например, при проведении измерений поля ПС в скважине на изучаемом пласте-коллекторе потенциал равен 20 мВ, на пласте с самыми высокими фильтрационно-емкостными свойствами потенциал равен 10 мВ, на глинах, рассматриваемых в качестве фона, зафиксированы значения 60 мВ. Следовательно, для изучаемого пласта имеем $\alpha_{\text{ПС}} = -40 / -50 = 0,8$.

Применение безразмерного двойного разностного параметра удобно для установления корреляционной зависимости $\alpha_{\text{ПС}}$ от некоторых промысловых параметров, например, от коэффициента пористости K_p , определенного по данным лабораторных исследований. Подобные зависимости часто имеют достаточно универсальное значение и широко используются на производстве.

При геофизических поисковых и разведочных работах на твердые полезные ископаемые для характеристики аномальности i -го объекта при применении j -го метода используется показатель контрастности γ_{ij} , равный [1]:

$$\gamma_{ij} = \Delta A_i / S_0. \quad (6)$$

В этом параметре учитывается не только аномальность поля относительно уровня фона, но и дисперсия самого фона. Показатель контрастности удобен для сравнения эффективности методов при оценке их конкурентности, а также для вычисления аномальности объекта в случае применения комплекса методов. Для успешного применения метода необходимо условие $\gamma_i > |2|$.

Использование безразмерных величин γ_i позволяет учитывать результаты нескольких методов путем вычисления функции комплексного показателя θ , представляющую алгебраическую сумму показателей контрастности отдельных методов. Знак у показателей контрастности при суммировании устанавливается в соответствии с решаемой задачей, обеспечивая подчеркивание аномальности искомым объектов по комплексу методов. Подробнее этот вопрос рассмотрен ниже в разделах 3 и 5.

2. ФИЗИКО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

Геофизические методы применяются для изучения разнообразных геологических и технических объектов. Это могут быть геологические структуры, благоприятные на содержание ценного сырья, месторождения и отдельные тела полезных ископаемых. К типовым объектам также относятся земельные основания для строительства или прокладки автомобильных и железных дорог, скважины или другие горные выработки на разведываемых или эксплуатируемых месторождениях и др. При организации и проведении геофизических работ на любых объектах необходимо четко сформулировать цели исследований по выявлению и изучению в типовых условиях геологических образований. Следует также рассмотреть возможные варианты их параметров, физические предпосылки для успешного решения поставленных задач. Результаты, получаемые в процессе исследований, часто требуют оперативного и обоснованного внесения корректив в их технологию. Ответственным моментом является представление ито-

говых данных исследований в форме понятной и удобной для специалистов, организующих комплексные геологоразведочные или изыскательские работы.

Решение всех этих вопросов осуществляется с помощью сформированной для соответствующей стадии работ физико-геологической модели (ФГМ) объекта геофизических исследований. Существенный вклад в теорию и методику комплексирования геофизических методов, включая принципы формирования ФГМ, внес выпускник Свердловского горного института профессор Гелий Сергеевич Вахромеев [1].

ФГМ отражает упрощенно-обобщенное представление об изучаемом геофизическими методами объекте, предполагающее наличие системы геолого-геофизических сведений, имеющихся на данной стадии работ. ФГМ создают в период проектирования геофизических работ, в процессе их проведения по мере поступления получаемых данных, а также по завершению работ в виде итогового документа.

Обобщенную ФГМ можно представлять в виде совокупности частных моделей: геологической, петрофизической и физических полей в профильном, плоскостном или объемном варианте.

Геологическая модель.

Примеры геологических моделей рудных полей

Геологическая модель отражает представление об объекте исследований как системе геологических тел и проявлений геологических процессов с изображением соответствующих разрезов, карт, блок-схем и т. п.

Представляет интерес рассмотреть обобщенные морфогенетические геологические модели постмагматогенных рудных полей, которые являются предметом изучения при поисках рудных месторождений. Под рудным полем понимают геологический объект, состоящий из генетически родственных сближенных рудных скоплений, гидротермально измененных минерализованных пород и малых магматических образований, представляющих собой фазы отщепления из общего материнского очага и использовавших в своем движении общие каналы. Поэтому при поисках рудных месторождений интерес представляет выявление всех этих структурных элементов рудных полей.

Наиболее отчетливо модели рудных полей продемонстрированы в работах П. Ф. Иванкина на основе детального изучения более 50

глубокозалегающих месторождений руд самого различного состава. Достоинство типизации рудных полей, выполненное П. Ф. Иванкиным, состоит в том, что сформированные им геологические модели отражают в наглядной форме главные их структурные элементы, к выявлению которых могут успешно привлекаться геофизические методы. Об этом свидетельствует опыт успешных поисково-разведочных работ, отраженный в частности в монографии [13]. Большой набор примеров рудных месторождений, изученных в пределах разнотипных рудных полей, часть из которых приведена ниже, рассмотрен в справочнике [9].

Постмагматогенные рудные поля формируются выше или на периферии материнских интрузий, которые являются источником постмагматических растворов, создающих ореолы гидротермальных изменений горных пород и рудные скопления. По характеру взаимоотношений гидротермального оруденения с материнскими интрузиями можно выделить три рода рудных полей.

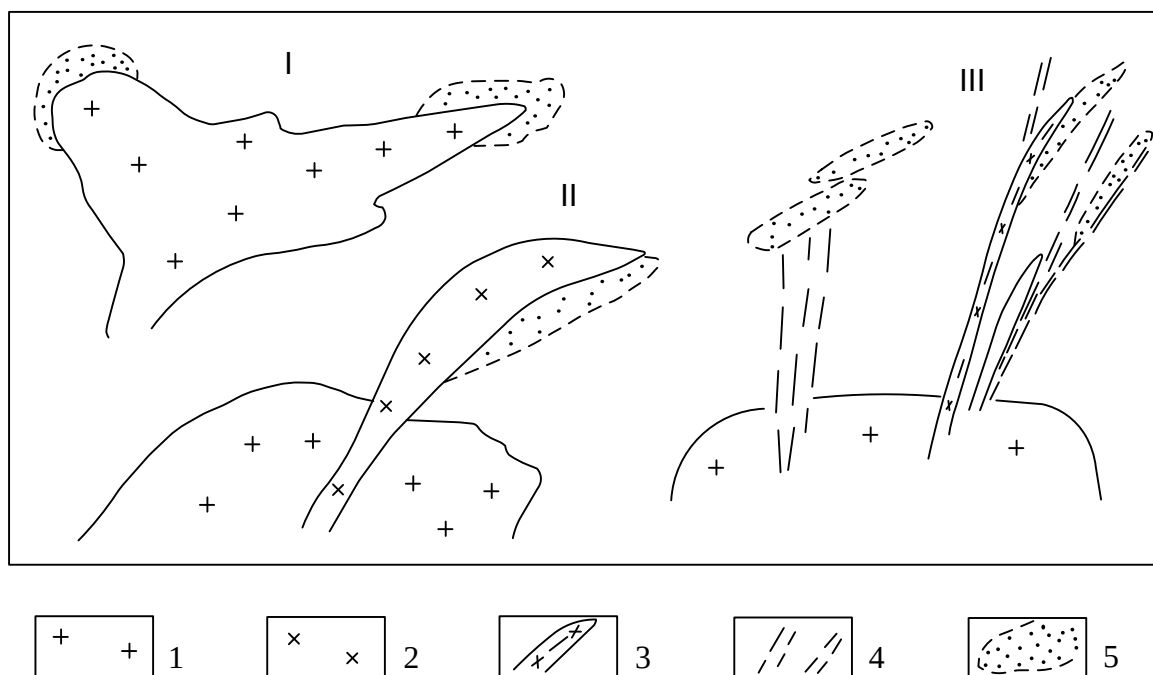


Рис. 6. Морфологические типы (геологические модели) постмагматических рудных полей разного рода (I, II, III) (по П. Ф. Иванкину):

1 – материнский плутон; 2 – тела поздних магматических отщеплений; 3 – лентовидные тела малых интрузий; 4 – разрывные нарушения; 5 – рудоносный комплекс, включающий гидротермально измененные породы и руды

Рудные поля I рода являются ореольными или бескорневыми (рис. 6). Они формируются на ранних стадиях остывания внедривше-

гося магматического тела в условиях широкого фронта отделения растворов по всей или части поверхности материнского интрузива. Растворы обычно обогащены водой, летучими и рудными компонентами. Минерализация вмещающих пород происходит вблизи места отделения растворов от остывающей магмы. В результате образуются широкие ореолы измененных пород с рассеянной или прожилковой минерализацией без богатых локальных скоплений. На поверхности они проявляются в виде полей измененных пород и рассеянной минерализации на достаточно обширных пространствах над погребенными интрузиями или вдоль границ вскрытых эрозией магматических тел. Примеры геологических разрезов месторождений типичных для ореольных рудных полей I рода приведены на рис. 7. Эти разрезы могут рассматриваться как геологические модели этих объектов. Главными структурными элементами их являются интрузии и ореолы рассеянной или прожилковой минерализации.

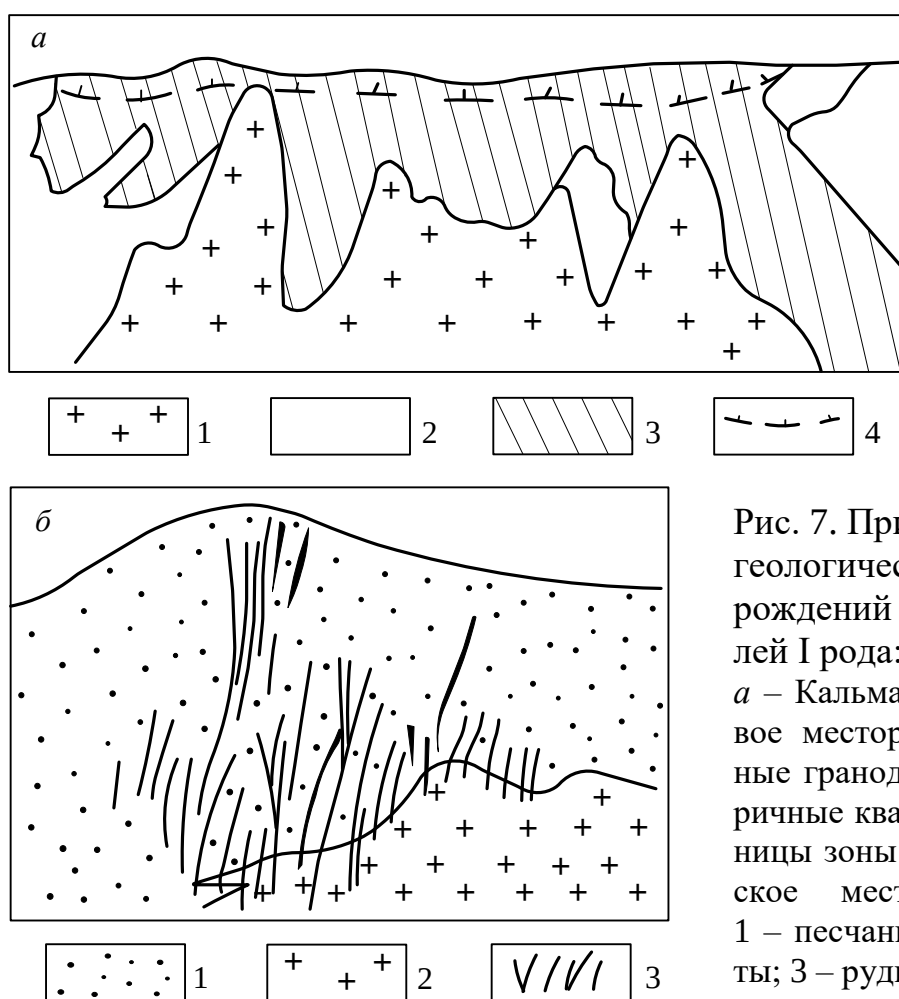


Рис. 7. Примеры схематических геологических разрезов месторождений ореольных рудных полей I рода:

а – Кальмакырское медно-порфировое месторождение: 1 – интрузивные гранодиорит-порфиры; 2 – вторичные кварциты; 3 – руды; 4 – границы зоны окисления; *б* – Иультинское месторождение вольфрама: 1 – песчаники и сланцы; 2 – граниты; 3 – рудные жилы

Рудные поля II рода – это системы рудных тел, окружающих их зон гидротермально измененных пород и поздних магматических от-

щеплений, имеющих общие корни (или рудно- и магмоподводящие каналы), уходящие внутрь крупного интрузива, производными которого все они являются (рис. 6.) Считается, что растворы поступали из верхних частей интрузива и проникали в их кровлю в виде потоков, двигавшихся по нарушениям, контактам или другим проницаемым каналам, что обусловило структурный контроль оруденения. Фигура рудного поля и свойства преобразованных в его пределах пород отражают направленность рудоносных растворов от корней к фронту поля. Рудные поля II рода характерны для гипабиссальных интрузий, часто приурочены к вулканическим постройкам, сформировавшимся над ними, имеют пологие и крутопадающие ветви. Примеры месторождений, типичных для корневых рудных полей II рода, приведены на рис. 8.

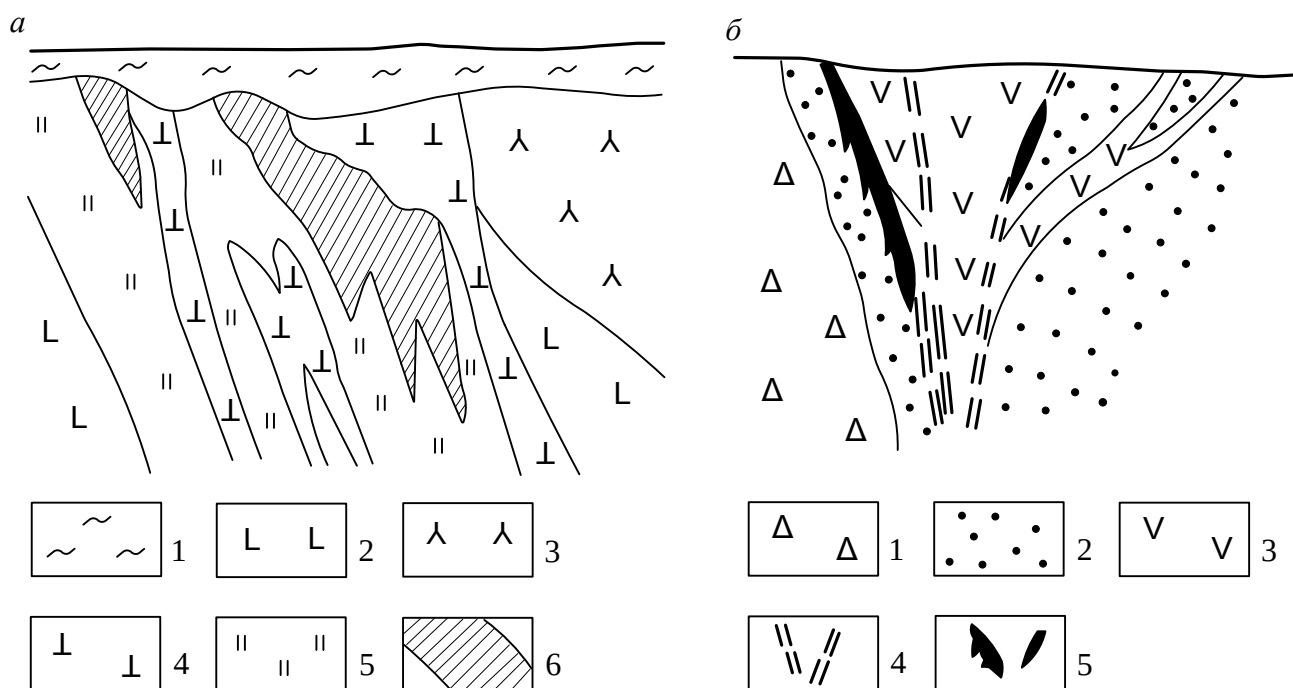


Рис. 8. Схематические геологические разрезы месторождений рудных полей II рода:

а – южная часть Гайского медноколчеданного месторождения: 1 – рыхлые отложения; 2 – туфы; 3 – диабазовые порфириты; 4 – субвулканические липарит-дациты (малая интрузия); 5 – метасоматиты; 6 – руды; б – молибден-урановое месторождение: 1 – диабазы и спилиты докембрия; 2 – переслаивающиеся осадочные и вулканогенно-осадочные породы; 3 – субвулканические андезиты (малая интрузия); 4 – разрывные нарушения; 5 – рудные тела

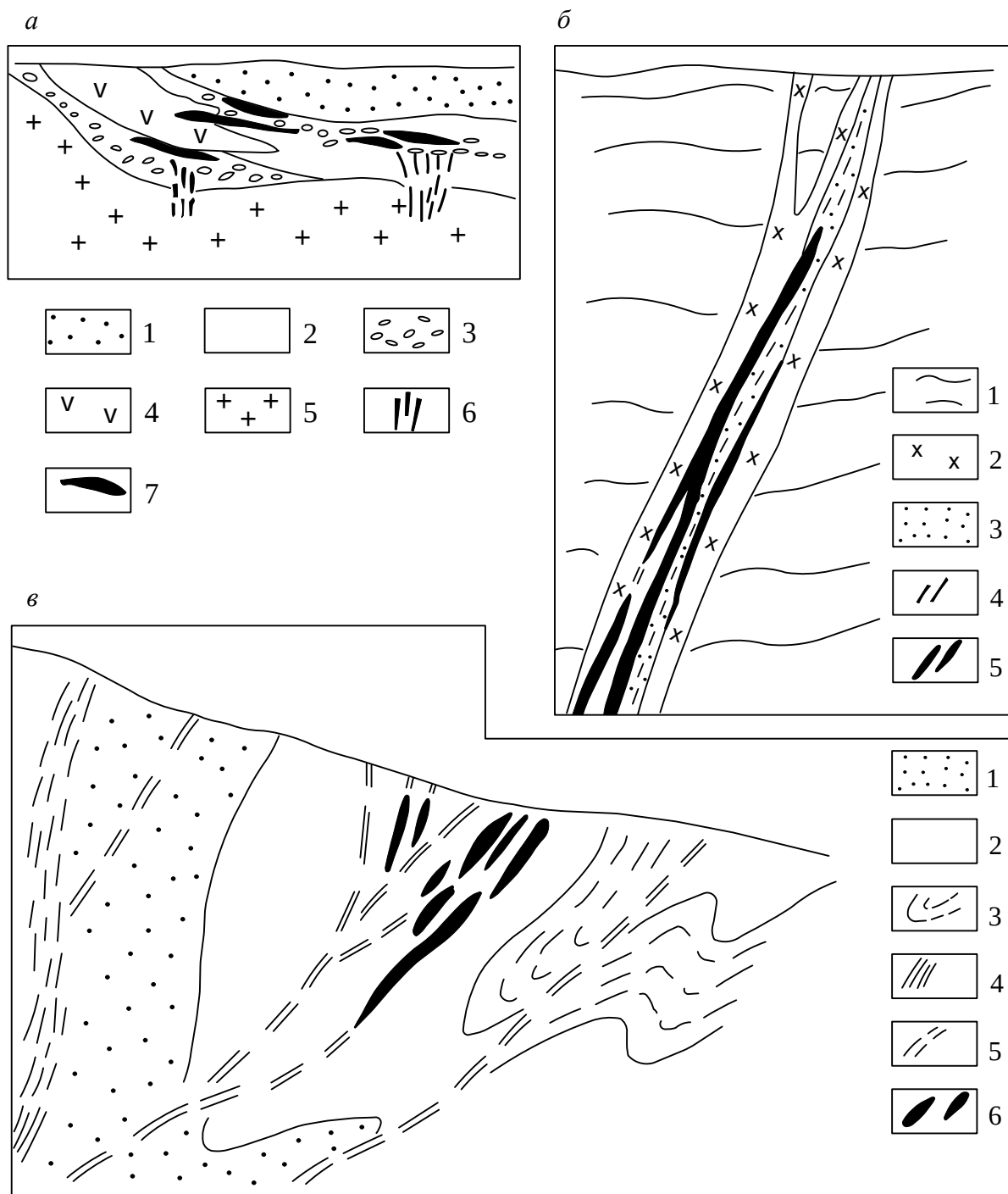


Рис. 9. Примеры геологических разрезов месторождений корневых рудных полей III рода:

а – мышьяково-урановое месторождение: 1 – алевролиты с прослоями песчаников; 2 – песчаники; 3 – конгломераты и гравелиты; 4 – туфолавы; 5 – граниты; 6 – разрывные нарушения; 7 – рудные тела; *б* – уран-титановое месторождение: 1 – кристаллические сланцы и гнейсы; 2 – пегматитовые жилы; 3 – гидротермально измененные породы; 4 – бластомилониты тектонических швов; 5 – рудные тела; *в* – Сахалинское месторождение киновари: 1 – песчаники, конгломераты, алевролиты; 2 – глинистые алевролиты; 3 – пачки глин; 4 – главный разлом; 5 – оперяющиеся трещины; 6 – рудные тела

К рудным полям III рода относят систему рудных тел, окружающих их измененных пород и иногда сопровождающих их серии малых интрузий, значительно оторванных от глубинных интрузий (рис. 6). Образовавшие их потоки гидротерм приурочены к самостоятельным тектоническим зонам, уходящих на глубину, или к ветвям крупных разломов. Последние являлись открытыми системами и, хотя могут нести следы гидротермальных изменений и минерализации, но промышленных скоплений руды не содержат. В ответвлениях, выклинивающихся к дневной поверхности, или в локальных проницаемых геологических телах, игравшими роль экранированных для растворов резервуаров, с которыми контактировали тектонические нарушения, образуются рудные скопления. Поэтому рудные залежи в рудных полях этого рода залегают согласно со слоистыми толщами или разрывными нарушениями в породах с повышенной пустотностью. Примеры месторождений, характерных для рудных полей III рода, приведены на рис. 9.

Таким образом, как следует из геологических моделей, при поисках рудных месторождений главными объектами выявления геофизическими методами являются рудные залежи, включающие их ореолы окolorудных изменений, рудоконтролирующие тектонические нарушения, крупные и малые интрузии. Все эти объекты имеют аномальные петрофизические свойства и благоприятные предпосылки для обнаружения при геофизических съемках.

Модели петрофизические и физических полей

Петрофизическая модель отражает сведения о распределении в геологическом пространстве физических свойств, характеризующих геологические тела, как объекты, имеющие предпосылки для выявления и изучения их геофизическими методами. При этом возможны случаи объединения нескольких геологических образований в структурно-вещественные комплексы (СВК) с одинаковыми или близкими физическими свойствами. В этом случае происходит упрощение петрофизической модели по сравнению с геологической моделью. Однако не исключены случаи, когда внутри условно единого геологического тела существуют участки изменений свойств за счет проявления процессов локального преобразования горных пород, которые отличаются по физическим свойствам и могут фиксироваться геофизическими методами. Такая картина наблюдается при локальном ме-

таморфизме, околорудных изменениях, развитии трещиноватости и др. процессах. В этих случаях петрофизическая модель может отражать результаты действия этих процессов и выглядеть сложнее, чем геологическая модель.

Петрофизическая модель может быть представлена в виде таблиц, типовых физико-геологических колонок, сводных геолого-геофизических разрезов, петрофизических карт или разрезов: самостоятельных или совмещенных с геологическими картографическими материалами. Желательно дополнять традиционно принятые в геологии мелкомасштабные литолого-стратиграфические разрезы (колонки) данными о физических свойствах, представленных на них толщ.

Исходные данные о физических свойствах горных пород для формирования петрофизической модели получают в результате лабораторных измерений на образцах, по данным интерпретации результатов каротажа или параметрических наблюдений физических полей на отдельных участках, а также путем использования справочной литературы. Помимо данных по изучаемой территории обязательно приводятся необходимые сведения об объектах-аналогах, что позволяет учесть опыт предшественников. Примером петрофизической модели месторождения может служить упрощенная типовая физико-геологическая колонка, изображенная на рис.11.

Физические поля или результаты их трансформации отражают данные, получаемые при решении прямой задачи на основе геологической и петрофизической моделей, или же отражают данные реальных наблюдений. Они необходимы для обоснования возможностей геофизических методов. На стадии проектирования это могут быть геофизические поля на объектах-аналогах, ранее изученных в схожих геологических условиях. Физические поля также приводятся как исходный материал, использованный при геологической интерпретации уже выполненных измерений, когда с помощью ФГМ представляются итоговые документы геофизических работ.

Пример физико-геологической модели

В качестве примера на рис. 10, 11 приводится ФГМ уранового месторождения, приуроченного к разрывным дислокациям в метаморфизованных породах протерозоя. По классификации П. Ф. Иванкина оно относится к корневым рудным полям III рода, оторванных от материнского глубинного плутона и приуроченных к тектониче-

ским зонам. На геологической модели (рис. 10, а) видно, что разрывные нарушения тяготеют к крыльям антиклинальной структуры, представленной вулканогенно-карбонатными отложениями. Оруденение локализуется в зонах проявления разрывной тектоники преимущественно в сланцевых толщах на участках с повышенной пористостью, появившихся вследствие разуплотнения пород. Рудоносные растворы помимо урана привнесли в зону их разгрузки вещества, сформировавшие ореолы гематитизации и сульфидизации. Эпигнетические изменения вмещающих пород сопровождались образованием в верхней части разреза зоны окисления.

Петрофизическая модель месторождения (рис. 11) отражает развитие аномальных проявлений в физических свойствах, как в контуре рудных тел, так и в околорудно-измененных породах. В рудах помимо высокой радиоактивности (J_γ) отмечается увеличение плотности (σ), магнитной восприимчивости (χ), поляризуемости (η_k) и понижение сопротивления (ρ_k). Вмещающие породы достаточно дифференцированы по физическим свойствам, что позволяет ожидать появление аномалий от складчатых структур. Анализируя петрофизическую модель, можно полагать, что зоны околорудно-измененных пород, характеризующиеся разуплотнением, повышением магнитной восприимчивости, электропроводности и поляризуемости, должны проявиться в магнитном поле, а также по данным методов электротометрии. Следует ожидать наложение на структурную составляющую полей проявлений, связанных с телами рудных тел и сопровождающих их ореолов минерализации.

Действительно, на графиках полей, измеренных комплексом методов по профилю, проходящему через рудоносную структуру (рис. 10, б), отражаются главнейшие ее элементы. Так отрицательной локальной аномалией силы тяжести отмечается ядро антиклинали (выход к поверхности карбонатов среди магматических пород). Расширение этой аномалии связано с проявлением зон разуплотнения и трещиноватости, обусловленных существованием здесь разрывных нарушений, как одного из признаков благоприятных условий для проникновения рудоносных растворов.

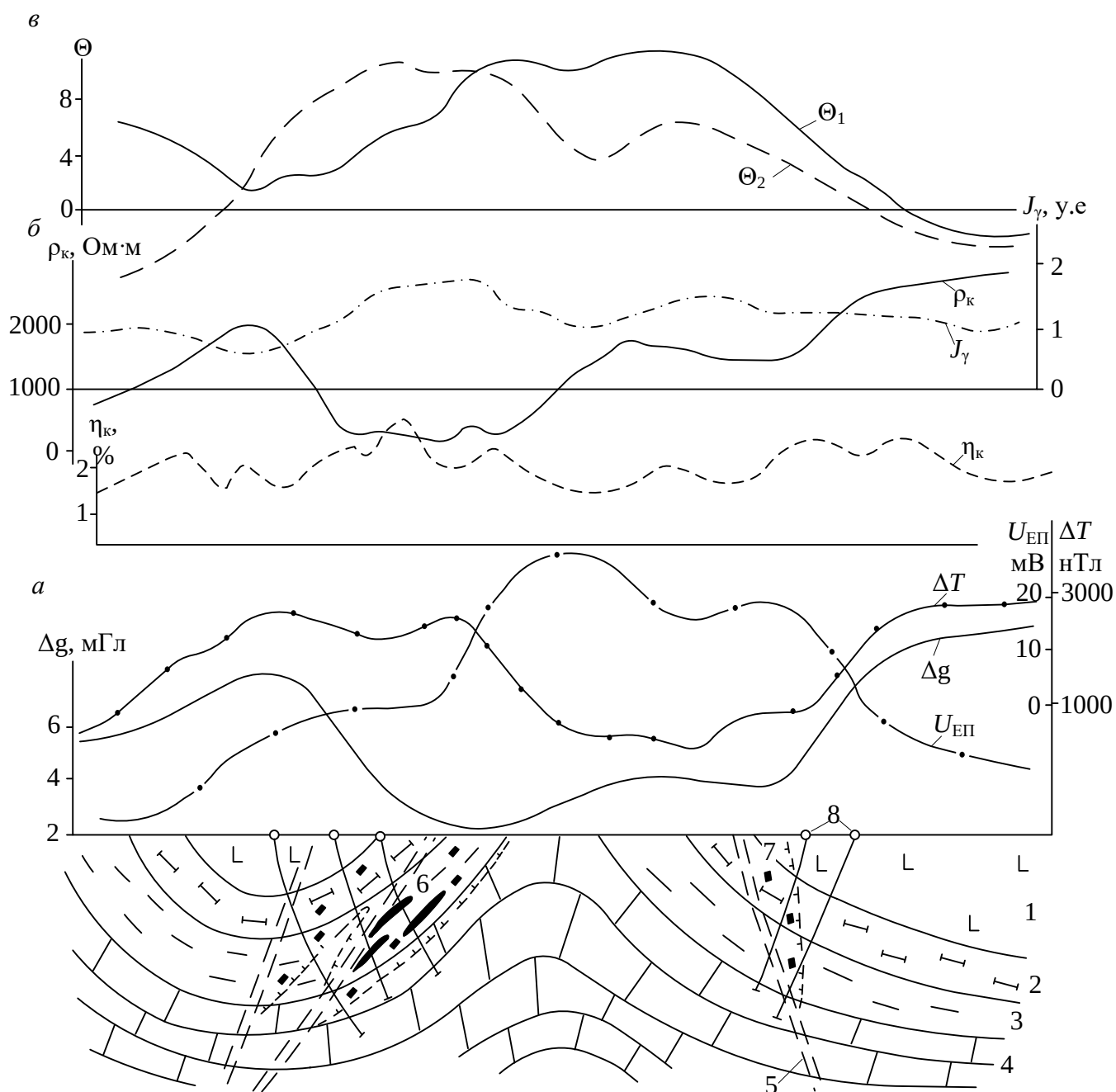


Рис. 10. ФГМ месторождения урана (по В. Е. Голомолзину, В. А. Титовой, А. В. Денисову):

a – геологический разрез (геологическая модель) месторождения: 1 – габбро-диабазы; 2 – пестроцветные слюдистые сланцы; 3 – слюдисто-карбонатные шунгитсодержащие сланцы; 4 – доломиты; 5 – тектонические нарушения; 6 – урановые руды; 7 – зоны гидротермально метасоматических изменений и минерализации; 8 – скважины; *б* – графики геофизических полей; *в* – функции комплексного показателя аномалий гравитационного и магнитного полей (θ_1), полей электрометрии и радиометрии (θ_2)

Отрицательная локальная аномалия магнитного поля, связанная с ядром антиклинали, явно уже гравитационной аномалии, то есть заметно повышение магнитного поля в районе ослабления поля силы

тяжести (над выходом к дневной поверхности рудоносных пород). Такое несоответствие двух полей является признаком отражения развития вторичных процессов, связанных с проявлением рассеянного ожелезнения, что характерно для фронтальной части ореола поступавших из недр рудоносных растворов. Это весьма благоприятный поисковый признак.

Для месторождения характерны участки профиля, на которых отмечается заметное уменьшение удельного сопротивления, хотя и слабое, но заметно повышение поляризуемости среды по данным срединного градиента с размером установки 1000 м. Так как над этим участком также наблюдается заметное повышение гамма-поля, то эти важные признаки следует также рассматривать как благоприятные для обнаружения оруденения.

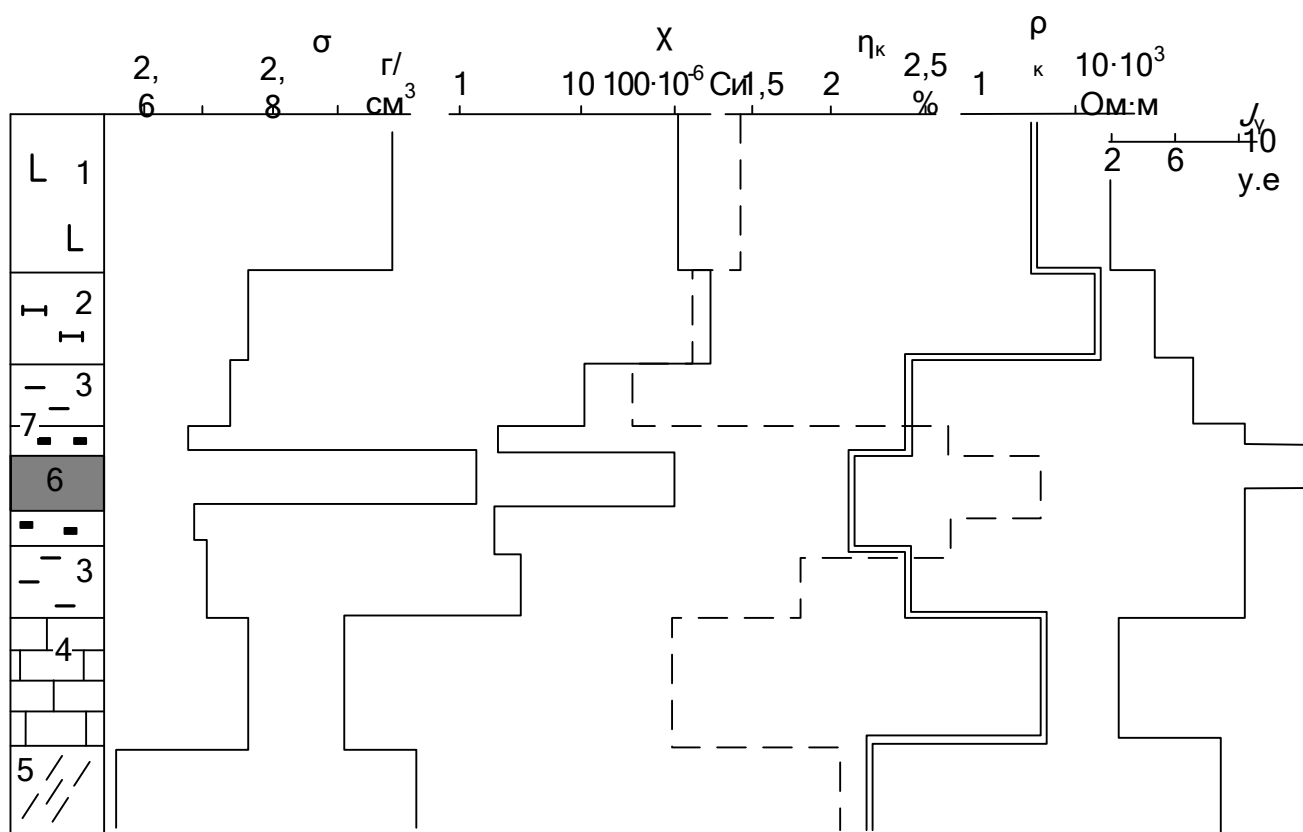


Рис. 11. Типовая физико-геологическая колонка (петрофизическая модель) месторождения урана (см. рис.10):
 графики плотности (σ), магнитной восприимчивости (χ), кажущихся поляризуемости (η_k) и удельного сопротивления (ρ_k), радиоактивности (J_γ) горных пород разреза (1-7 см. подрисуночные надписи к рис.10, а)

Весьма отчетливо влияние рудоносных пород проявляется в виде четкой положительной аномалии естественного электрического

поля. И хотя аномалия несколько смещена по восстанию относительно самого оруденения и наблюдается еще над участком с рассеянной минерализацией, однако, при наличии других признаков район, наиболее перспективный на оруденение, по аномалии естественного поля фиксируется достаточно надежно.

Представление о возможности совместного учета результатов нескольких методов показано на примере двух вариантов функции комплексного показателя (рис. 10, в). При вычислениях в качестве нормального поля использовались значения, типичные для участков профиля, проходящих над магматическими породами. Вычислительные формулы для Θ составлялись с таким расчетом, чтобы подчеркнуть положительными аномалиями присутствие объектов, представляющих первоочередной интерес.

Функция Θ_1 вычислялась по формуле $\Theta_1 = -\gamma_{ГР} - \gamma_{м}$ и отражает совместное проявление аномальности полей гравиметрии и магнитометрии. При структурных исследованиях интерес представляют выходы к дневной поверхности потенциально рудоносной толщи сланцев, и соответствующие им отрицательные аномалии этих полей являются положительными факторами контроля этих искомых объектов. Это обстоятельство учтено в формуле Θ_1 . График функции Θ_1 имеет картировочное значение и положительная аномалия Θ_{A1} хорошо соответствует выходам сланцев совместно с толщиной карбонатных пород среди тел магматитов.

Функция Θ_2 отражает аномальность методов электроразведки (КС, ВП и ЕП) и радиометрии, связанных с самим месторождением урана и близрасположенного рудопроявления, и вычислялась по формуле $\Theta_2 = \gamma_{ВП} + \gamma_{ЕП} - \gamma_{КС} + \gamma_{р}$. Результирующая аномалия этих методов подтверждает возможность применения данного комплекса методов для поисков урановых руд в геологических условиях близких тем, которые отражены на представленной ФГМ.

Таким образом, сформированная по данным геологии, измерений физических свойств в скважинах и полей на дневной поверхности ФГМ, позволяет расшифровать природу геофизических аномалий наземных методов, выявить те признаки, по совокупности которых можно обнаруживать урановые месторождения в районе с подобными геологическими условиями. Появляется возможность обосновать комплекс геофизических методов, при применении которого можно рассчитывать на успешные результаты поисков.

3. ФОРМИРОВАНИЕ ПЕТРОФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПО ДАННЫМ РУДНОГО КАРОТАЖА

В настоящее время сведения о физических свойствах при проектировании, поисках и разведке месторождений полезных ископаемых в основном получают по данным геофизических методов исследования скважин (ГИС). Одним из вариантов представления петрофизической модели объекта исследований является типовая геолого-геофизическая колонка разреза изучаемой геологической среды. В промысловой геофизике она получила название сводный геолого-геофизический разрез. Поскольку физические свойства осадочной толщи, изучаемой методами промысловой геофизики, достаточно стабильны по латерали, для формирования модели разреза используют диаграммы 2-3 скважин, имеющих пересечения всех структурных элементов разреза.

В рудных районах, характеризующихся высокой изменчивостью разнообразных признаков геологических образований, представление об их физических свойствах можно получить с помощью стохастической модели разреза.

Основными элементами структуры рудного поля являются геологические тела и зоны развития геологических процессов, мощности которых измеряются десятками метров. Отдельный элемент, исходя из опыта ГИС, представляет образование с включениями и его можно с некоторым приближением рассматривать как двухкомпонентную среду. Размеры включений обычно составляют первые метры. Роль включений играют мелкие чередующиеся пропластки пород иного состава по сравнению с вмещающей их средой. К включениям относят также локальные участки проявления выборочного эпигенетического преобразования в геологическом теле, останцы материнской породы, подвергшейся метаморфическим изменениям, и др.

Кодирование диаграмм ГИС

Рассматривая пересечение геологического тела в скважине как двухкомпонентную смесь, предложено выполнять кодирование диаграмм каротажа, позволяющее представить информацию о пересечении в виде характеристик изучаемого свойства (поля) A и долей содержания для каждого из компонентов [8]. Естественно полагать, что для одного из компонентов макросмеси присущи высокие значения

свойства A_B , а для другого – низкие значения этого свойства A_H . Коэффициенты, отражающие содержание каждого из компонентов, соответственно равны K_B и K_H .

Для реализации простейшего способа определения характеристик такой макросмеси необходимо провести в пределах пересечения три линии, осредняющие значения измеряемого свойства для каждого из компонентов (средние значения A_B и A_H) и диаграммы в целом (значение A_{cp}) (рис. 12). Первые два значения определяют свойства компонентов, а коэффициенты содержания каждого из компонентов находят по формулам:

$$K_B = (A_{cp} - A_H)/(A_B - A_H), K_H = (A_B - A_{cp})/(A_B - A_H) = 1 - K_B. \quad (4)$$

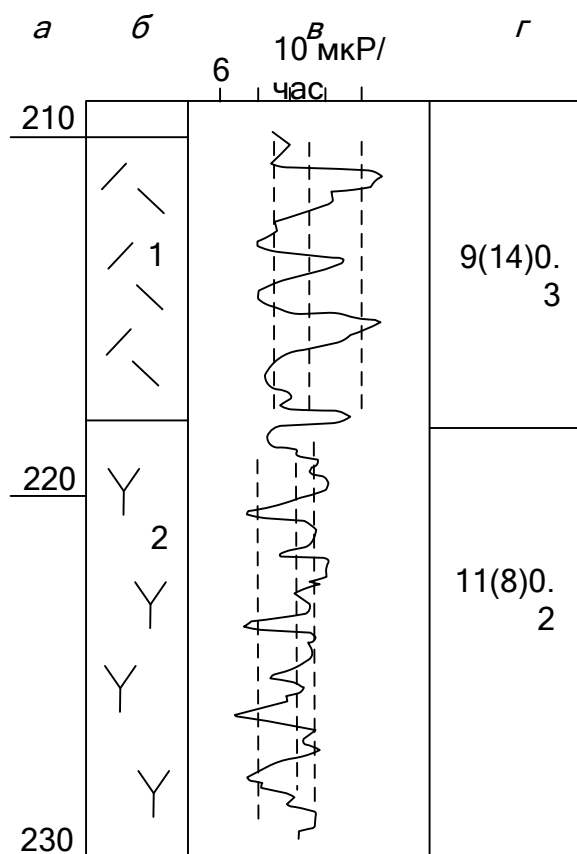


Рис. 12. Пример кодирования диаграммы ГК для двух интервалов участка скважины:
а – глубины; *б* – геологическая колонка; *в* – диаграмма; *г* – результаты кодирования; 1 – туфы; 2 – липариты

Очевидно, что, если мощность рассматриваемого пересечения составляет H метров, то доли компонентов в метрах равны: $H_B = HK_B$ и $H_H = HK_H$.

Информацию об измеренном физическом признаке для каждого пересечения геологического образования можно представить в виде кода следующего вида: $A_{ок}(A_{вкл})K_{вкл}$. Первое значение соответствует средней величине физического свойства основного компонента, доля

которого в макросмеси выше. Значение в скобках отражает среднее значение физического свойства компонента, рассматриваемого как включение, а последнее значение соответствует его доле в макросмеси. Следует заметить, что основной компонент также как и включения могут характеризоваться относительно высокими или низкими значениями свойства. Например, при кодировании данных измерений методом ГК естественной радиоактивности в мкР/час (рис. 12) для интервала 210-218 м (туфы) с помощью набора значений 9(14)0,3 фиксируется наличие среди основной части пласта мощностью 8 м включений (пропластков с повышенным содержанием кислой фации), на долю которых приходится 2,4 м. Основная масса туфов имеет радиоактивность 9 мкР/час, а более радиоактивные пропластки характеризуются значениями около 14 мкР/ч. Для липаритов, залегающих ниже туфов, пересечение которых зафиксировано в интервале 218-230 м, характерны средние значения для основного компонента 11 мкР/час, а для включений 8 мкР/час. Доля включений составляет 0,2, и поэтому результаты кодирования для этого интервала выражаются набором значений 11(8)0,2.

Имеется программа автоматического кодирования диаграмм методов ГИС, созданная В. А. Серковым при участии автора.

Результаты кодирования позволяют представить данные измерения физического свойства (поля) по скважине в компактной форме, удобной для хранения, трансляции, применения разнообразных способов обработки, построения петрофизических разрезов без потери информации о неоднородной структуре геологических образований, отражающей проявление определенных процессов. Например, имея данные кодирования диаграммы электрометрии с измерениями удельного сопротивления ρ в Ом·м, можно вычислить коэффициент электрической анизотропии λ . Для среды с двухосной анизотропией, характеризующейся удельным сопротивлением вкrest слоистости – ρ_n , по слоистости – ρ_t , справедливы следующие формулы:

$$\rho_n = K_v \rho_v + K_h \rho_h, \quad \rho_t = \rho_v \rho_h / (K_h \rho_v + K_v \rho_h), \quad \lambda = (\rho_n / \rho_t)^{1/2} \quad (5)$$

Статистическая обработка результатов кодирования

Данные кодирования диаграмм методов ГИС, зарегистрированных по нескольким скважинам изучаемого участка на стадии поисков или разведки, позволяют сформировать петрофизические модели каждого элемента структуры этого участка. Задача практически сво-

дится к получению представления о типичных горных породах и рудах участка, как объектах исследования геофизическими методами. При этом следует отразить те изменения в свойствах этих пород, которые вызывают процессы тектоники, метаморфизма и минерализации.

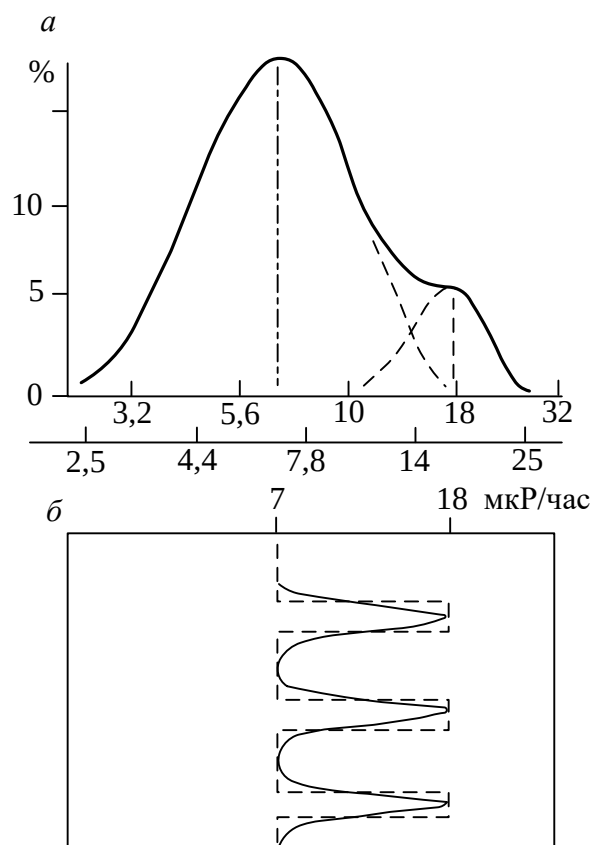
Петрофизические модели, присущих изучаемому разрезу литотипов горных пород, формируются на основе статистических исследований по выборкам для каждого из них путем построения кривых распределения изучаемых физических характеристик. В выборку для конкретного литотипа включаются все его пересечения, которые на геологических колонках классифицированы приблизительно одинаково. Статистика проводится для каждого изучаемого геофизического свойства отдельно, подобно тому, как это делается при оценке уровня нормального поля стохастическим способом (см. раздел 2). Поскольку распределение для большинства физических свойств статистически однородных совокупностей горных пород подчиняется логнормальному закону, рассмотрим этот случай детально.

Для построения дифференциальной кривой распределения признака (физического поля или свойства) A необходимо выполнить группирование данных о нем по классам (интервалам равной ширины на оси абсцисс), применяя логарифмическую шкалу. Для достаточно представительных (репрезентативных) выборок удобно разбивать один порядок на 4 класса. Например, границы классов могут соответствовать значениям: 1-1,8-3,2-5,6-10-18-32 и т. д. В случае применения второй смещенной шкалы границы классов: 1,4-2,5-4,4-7,8-14-25 ит. д. При таком подходе отпадает необходимость применять бланки с логарифмической шкалой.

В таблицу группирования заносятся значения мощности в метрах. Для двухкомпонентных макросмесей в таблицу заносятся мощности компонентов H_H и H_B в классы в соответствии с характерными для компонентов значениями A_H и A_B . В большинстве случаев они разносятся по разным классам, но при близких значениях измеряемого признака мощности компонентов могут попасть в один класс. Дифференциальная кривая распределения (функция частоты) строится по данным о суммарной мощности (ординаты) каждого класса (на оси абсцисс это середины классов). Пример дифференциальной функции распределения приведен на рис. 13, а.

Рис. 13. Пример построения статистической диаграммы для туфов смешанного состава:

а – дифференциальная кривая распределения естественной радиоактивности (выборка по 5 скважинам); *б* – статистическая диаграмма ГК (поле в логарифмическом масштабе)



В большинстве случаев кривые распределения отражают статистическую неоднородность изучаемых образований, которая проявляется в двухгорбности кривых, или они имеют другие особенности, также позволяющие сделать вывод о двухкомпонентной структуре этих образований. Пользуясь известными приемами статистики сложную кривую распределения можно представить в виде двух элементарных кривых, соответствующих логнормальному закону. По ним легко определить центральные значения признака для каждого компонента, а также долю каждого компонента в выборке (по соотношению площадей элементарных кривых). Эти данные и используют для статистической характеристики изучаемых объектов по геофизическим признакам путем построения прямоугольных диаграмм, которые затем могут быть скорректированы с учетом специфики вида аномалий измеряемого в скважинах поля. Так для метода ГК аномальными являются пропластки (включения) с максимумом аномалии в середине пропластков и полумаксимумом на их границах.

Рис. 13, *б* иллюстрирует принцип построения статистической диаграммы для объекта по данным, получаемым при использовании распределения естественной радиоактивности туфов смешанного состава (измерения по 5 скважинам на периферии медноколчеданного

месторождения). О соотношении долей основного компонента и включений можно судить по ширине площадок значений радиоактивности основного компонента и включений. В рассматриваемом примере это соотношение 1:3 и, следовательно, на статистической диаграмме $K_{\text{вкл}} = 0,25$.

Построение типовой физико-геологической колонки

Построение начинается с формирования типовой геологической колонки, которая отражает в разрезе весь комплекс геологических тел, участвующих в создании структуры изучаемого участка с отражением последовательности их залегания. При мелкомасштабных исследованиях можно использовать литолого-стратиграфическую колонку, которая создается геологической службой в каждом районе геологоразведочных работ. Такие колонки обычно не имеют масштаба, а сведения о мощностях толщ или геологических тел приводятся на колонке в виде диапазонов их мощностей. На геологических колонках отдельно выделяются объекты, которые развиты в районе не повсеместно, то есть появляются в виде локальных тел. В первую очередь это относится к малым интрузиям, рудным телам и зонам метаморфизма. Подобные объекты изображаются в виде включений в толще вмещающих пород.

На основе дифференциальных кривых распределения геофизических признаков для каждого литотипа формируются статистические диаграммы по изученным признакам для всего разреза в соответствии с геологической колонкой. В большинстве случаев все геологические тела представляются на статистических геофизических диаграммах как образования с включениями. Неоднородность объектов показывают путем изображения прямоугольных или скорректированных с учетом типичной формы диаграмм, подобных той, которая представлена на рис. 13, б. Пример типовой физико-геологической колонки (упрощенный вариант без отражения компонентов в горных породах) приведен на рис. 10.

Типовая физико-геологическая колонка дает представление о физических свойствах всего комплекса геологических образований в изучаемом районе и на ее основе могут решаться разнообразные задачи в период проведения геологоразведочных работ. Полученные данные используют при формировании петрофизической модели при исследовании участков с условиями близкими тем, которые учтены

при формировании типовой колонки, как на стадии проектирования работ, так при интерпретации измеренных полей. В период разведки типовая колонка помогает правильно классифицировать объекты, изученные методами ГИС.

4. ТОЧНОСТЬ НАБЛЮДЕНИЙ

Вопрос о точности наблюдений возникает как в период проектирования геофизических работ, так и по их завершении. При планировании точности наблюдений необходимо знать уровень аномалий от объектов, представляющих интерес для решения стоящих задач, погрешности измерений, которые возникают при применении имеющейся аппаратуры и планируемой технологии измерений, а также вероятный диапазон геологических помех, типичный для фоновых образований из-за их неоднородности.

Сведения об интенсивности аномалий, подлежащих обнаружению, получают исходя из анализа сформированной ФГМ и опыта предшественников. Обычно ориентируются на некоторую минимальную по интенсивности аномалию, которая характерна для объекта, представляющего интерес при решении поисковой задачи.

Необходимо учитывать, что искомую аномалию придется обнаруживать на фоне нормального поля, присущего среде, вмещающей искомый аномалиеобразующий объект. Нормальное поле всегда имеет некоторую дисперсию D_0 , которую можно охарактеризовать через среднеквадратичную погрешность измерения нормального поля S_0 , поскольку $D_0 = S_0^2$. Как уже отмечалось в разделе 2, величину S_0 можно оценить несколькими способами. К стандартным относится аналитический способ, основанный на использовании данных n измерений поля A в пределах фоновой среды и формулы (1). В случае малой выборки вместо n применяют значение $n-1$.

Дисперсия значений в пределах нормального поля складывается из дисперсии геологических помех S_Γ , вызванных неоднородностью фонового объекта, и дисперсии показаний, связанных с аппаратурно-методическими (условно приборными) погрешностями измерений S_Π . Поэтому общая дисперсия измерений фона равна: $S_0^2 = S_\Gamma^2 + S_\Pi^2$.

Приборная погрешность оценивается по результатам независимых контрольных n измерений поля по формуле

$$S_\Pi = \pm \sqrt{\sum_1^n (A_1 - A_2)^2 / (2n - 1)},$$

A_1 и A_2 – соответственно первичное и контрольное измерение на i -ой точке.

По величине составляющей S_{Γ} , которая равна $S_{\Gamma} = (S_0^2 - S_{\Pi}^2)^{1/2}$, получают представление о влиянии геологических помех.

Для успешного выделения аномальных значений A_a , как это уже отмечалось в разделе 2, необходимо чтобы выполнялись условия: $A_a < (\bar{A}_0 - 2 S_0)$ или $A_a > (\bar{A}_0 + 2 S_0)$. В первом случае выделяется отрицательная, а во втором случае положительная аномалии.

Для снижения общей погрешности измерений S_0 руководствуются следующими положениями [1,3].

1. Если $S_{\Gamma} > S_{\Pi}$, то для снижения S_{Γ} полезным оказывается применение специальных методов обработки данных съемки с целью подавления геологических помех, носящих часто случайный характер. Например, простое сглаживание измеренного поля по N точкам уменьшает S_{Γ} почти в N раз.

2. Если $S_{\Pi} > S_{\Gamma}$, то есть смысл применить более точную аппаратуру или усовершенствовать технологию измерений. Например, за счет многократного (N кратного) измерения поля на одной точке и использования осредненного его значения удастся уменьшить величину S_{Π} приблизительно в $\sqrt{N}$ раз.

Среднеквадратичная приборная погрешность S_{Π} вычисляется по результатам каждой съемки. Обычно планируется для выполненного объема наблюдений провести приблизительно в 5 % точках контрольные измерения.

5. ОБОСНОВАНИЕ СЕТИ НАБЛЮДЕНИЙ

Как правило, сеть наблюдений представляет систему параллельных профилей, на которых намечаются с определенным шагом точки наблюдения. Условно принимают, что профили параллельны оси x и перпендикулярны оси y . Тогда расстояния между профилями – Δy , а между точками – Δx .

Обычно геофизическая съемка проводится в помощь геологическому картированию определенного масштаба. Исходя из этого масштаба расстояние между профилями должна составлять на отчетной карте съемки 1 см. Например, при масштабе 1:50000 необходимо иметь $\Delta y = 500$ м. Шаг наблюдений обычно в 2 раза меньше межпрофильного расстояния. В рассматриваемом примере $\Delta x = 250$ м.

При непрерывной регистрации характеристик физического поля (на борту самолета, вертолета, судна, автомобиля) в силу инерционности регистрирующей аппаратуры условным шагом съемки можно считать величину $\Delta x = V \cdot \tau$, учитывающую скорость и постоянную времени движущегося измерителя.

В условиях резкой изменчивости свойств геологической среды масштаб геофизической съемки может быть принят вдвое крупнее, чем для геологического картирования.

При проектировании поисковых геофизических работ, проводимых, как правило, в масштабах 1:10000 и 1:5000, необходимо предвидеть вид и величину ожидаемых аномалий от объектов, представляющих первоочередной интерес для решения поисковой задачи. Этими объектами могут быть не только тела полезных ископаемых, но и связанные с ними генетически и пространственно малые интрузии, разрывные нарушения, ореолы окolorудных изменений и др., имеющие обычно меньшую контрастность по аномальным признакам. Представления о форме и размерах аномальных зон искомых геологических объектов формируются на основе анализа ФГМ.

Сеть наблюдений выбирают такой, чтобы в контур аномальной зоны попал хотя бы один профиль с двумя точками наблюдений, на которых аномальный объект будет зафиксирован.

Существует возможность теоретически оценить вероятность P обнаружения объекта [1, 6]. Обычно форму аномальной зоны объекта отождествляют с эллипсом, оси которого равны L (длина зоны) и B (ширина зоны). В наиболее простом случае вероятность пересечения аномальной зоны одним из профилей, ориентированных перпендикулярно большей оси (т.е. вкрест простирания), когда $L \leq \Delta y$, выражается простой дробью: $P = L / \Delta y$. При неизвестной ориентировке такого объекта вероятность его пересечения определяется классическим решением «задачи об игле», сформулированной монахом Ж. Бюффеном еще в 18 веке:

$$P = 2L / \pi \Delta y. \quad (7)$$

Можно отметить, что только за счет неизвестной ориентировки объекта поисков по отношению к направлению съемочных профилей при $L = \Delta y$ вероятность его обнаружения снижается с 1 до $P = 2/\pi = 0,637$.

Если известен угол β отклонения профилей от нормали к простиранию объекта в радианах, то при $L \leq \Delta y$ вероятность обнаружения объекта равна:

$$P = L \sin \beta / (\beta \Delta y). \quad (8)$$

Полезно заметить, что для значения $\beta = \pm \pi/6$ величина $\frac{\sin \beta}{\beta} = 0,955$, т.е. мало отличается от 1. Поэтому на практике достаточно чтобы сеть профилей была ориентирована только приближенно правильно. Если это условие соблюдается, то при $\Delta y = 0,9 L$ пересечение аномальной зоны профилем гарантировано.

Общее решение задачи о вероятности пересечения контура аномалии профилем при произвольном значении угла β , когда $L / \Delta y \geq 1$, приводит к выражению:

$$P = \frac{2}{\pi} \left[\frac{L}{\Delta y} + \cos^{-1} \frac{\Delta y}{L} - \sqrt{\left(\frac{L}{\Delta y} \right)^2 - 1} \right]. \quad (9)$$

При $L = \Delta y$ снова получаем $P = 2/\pi = 0,637$.

Общее выражение для вероятности пересечения аномальной зоны эллиптического вида с осями L , B и периметром Π при произвольной ориентировке профилей съемки имеет вид:

$$P = \Pi / \pi \Delta y, \quad (10)$$

$$\Pi = \frac{\pi}{2} [1,5(L + B) - \sqrt{L \cdot B}]. \quad (11)$$

Две точки профиля, пересекающего аномальную зону, окажутся внутри ее контура, если $\Delta x \leq B/2$.

Для более скупуплезной оценки вероятности P имеется серия номограмм, учитывающих возможные варианты соотношения размеров контура аномалии, параметров сети и углов β [1, 3].

Оценим для примера вероятность обнаружения аномальной зоны размером 200×50 м сетью с ячейкой 100×25 м при неизвестном простирании оси зоны. В этом случае $L = 200$ м, $\Delta y = 100$ м. и по формуле (9) получим $P = 0,83$. С использованием специальных номограмм можно установить, что объект будет обнаружен с вероятностью $P = 1$, если отклонение профилей от нормали к простиранию объекта будет меньше 60° .

Следующая задача может быть сформулирована в виде задания. Необходимо определить какого минимального размера аномальная

зона с неизвестным простиранием может быть обнаружена с помощью сети размером в м 250×50 . Для решения найдем величину периметра зоны П из формулы (10) для случая $P = 1$, полагая $B = 100$ м и $\Delta y = 250$ м. Эта величина равна $\Pi = 785$ м. Решая уравнение для П относительно L (методом подбора или составив квадратное уравнение относительно $\sqrt{L}$), получим искомую величину: $L = 360$ м.

На стадиях детальных поисков и разведки сеть наблюдений бывает самой разнообразной. Помимо прямоугольной сети при детальных съемках возможно проложение радиальных и криволинейных профилей, допустимо отклонения от равномерности изучения площади съемки. Повышенная детальность принята для интерпретационных профилей, шаг наблюдений на которых допустимо устанавливать таким, чтобы выявить характерные точки измеряемого физического поля (экстремумы, точки перегиба, перехода через ноль и т. п.). Обычно пункты наблюдения сгущают в районе эпицентра аномалий и разряжают на участках выхода в нормальное поле. В результате детальных работ необходимо установить конфигурацию, размеры аномалии, ее амплитуду и другие особенности, которые затем используют в процессе интерпретации.

Шаг наблюдений подбирают с таким расчетом, чтобы при аппроксимации поля между двумя фиксированными точками прямой линией отклонение фактических его значений от этой прямой не превышало 5 % средней величины значений поля. Например, при съемке естественного поля с шагом 20 м амплитуда аномалии составила 58 мВ, откуда следует, что среднее значение аномалии на профиле приблизительно равно 29 мВ. Между двумя рядовыми точками съемки, на которых получены значения 27 и 39 мВ, выполнено промежуточное измерение с результатом 36 мВ. Разница между последним значением и средней величиной рядовых измерений равна 3 мВ, что составляет 10,3 % от среднего значения аномалии. Следовательно, необходимо сгустить сеть, уменьшив шаг наблюдений по крайней мере в 2 раза.

7. ВЫДЕЛЕНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ И ИХ КОМПЛЕКСНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Конечным результатом геофизических съемок является выявление и геологическое истолкование тех неоднородностей геологиче-

ской среды, которые по размерам и контрастности свойств способны создавать ощутимые аномалии.

Важнейшими проблемами анализа измеренных полей являются исключение или ослабление их составляющих, связанных с влиянием геологических помех, разделение выделенных на фоне помех аномалий на региональные и локальные (возможно нескольких порядков). Необходимы классификация выделенных аномалий на перспективные (отвечающие целевым задачам) и неперспективные, выполнение качественной и количественной интерпретация аномалий и определение их геологической природы.

Выделение аномалий

При анализе поля A принимается аддитивная (суммирующая) его модель, согласно которой существующая в рядовой точке функциональная величина аномалии A_a имеет региональную A_{ap} , локальную $A_{ал}$ и случайную $A_{ас}$ (помеха) составляющие:

$$A_a = A_{ap} + A_{ал} + A_{ас}. \quad (12)$$

Помехи обычно отождествляют со случайными функциями и эта их особенность позволяет применять специальные методы математической фильтрации, основанные на исключении составляющих поля с высокочастотным спектром и некоррелируемостью характеристик поля по площади. Простейшей операцией по ослаблению случайной составляющей является сглаживание в окне из нескольких точек. Если взять 5 точек и применить полином третьей степени, то формула для сглаживания измеренных значений A в рядовой точке с номером i с использованием данных по соседним точкам имеет вид:

$$A_{сгл}(i) = 0,486A(i) + 0,343\{A(i+1) + A(i-1)\} - 0,086\{A(i+2) + A(i-2)\}. \quad (13)$$

Процедура сглаживания приводит к уменьшению дисперсии фона главным образом за счет снижения геологической погрешности при незначительном изменении неслучайной аномалии. В результате уменьшения общей среднеквадратической погрешности наблюдений увеличивается контрастность аномалии и, следовательно, улучшаются условия для ее выделения.

Примером могут служить результаты выделения слабой аномалии кажущейся поляризуемости, приводимые на рис. 21. Согласно исходным измерениям (график *a*), диапазон колебаний фоновых значений η_k составляет 0,5-2,5 %, а среднее значение равно 1,5 %. Выше верхнего предела фона зафиксированы 2 точки со значениями около

3 %. Полагая, что аномальные значения в этих точках равны 1,5 %, а среднеквадратичное отклонение для фона составляет 0,5 %, вычисленный показатель контрастности аномалии (см. (6)) для данных условий равен 3.

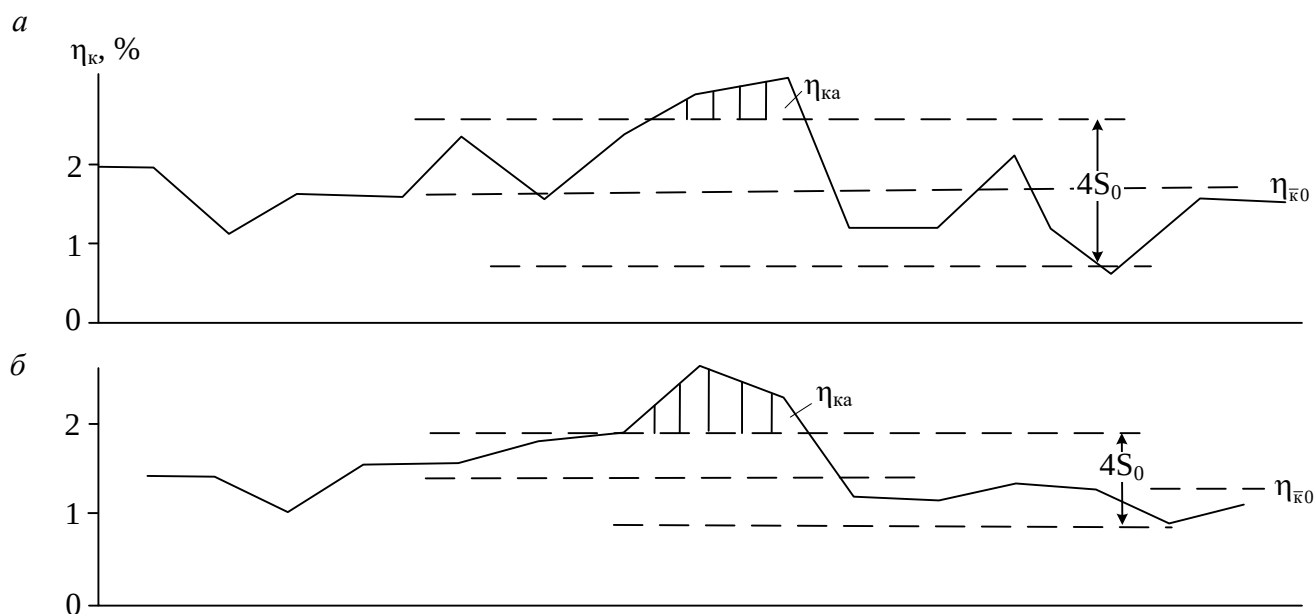


Рис. 21. Результаты выделения слабой аномалии кажущейся поляризуемости η_k по данным измеренного поля (график *а*) и после его сглаживания (график *б*)

После сглаживания исходного графика η_k по 5 точкам (график *б*), фоновые значения находятся в пределах 1-2 % при среднем 1,5 %, а аномальные значения остаются близкими к 3 %. Заметно, что на сглаженном графике аномалия проявляется более отчетливо. Этот эффект подтверждается и вычислением показателя контрастности, который становится близким к 6, то есть увеличивается в 2 раза относительно первоначального значения.

В инструкциях по ряду полевых методов к достоверной (надежность 99,5 %) аномалии относятся такие совокупности значений в не менее чем 3 точках, для каждого из которых выполняется условие: $A_a/S_0 \geq 3$. Если за аномалию принимать значения в 2 раза превышающее среднеквадратическую погрешность фона, то есть $A_a/S_0 \geq 2$, то надежность выделения такой аномалии согласно теории вероятности составляет 95 %. Оценивая надежность с точки зрения энергетического отношения аномалия/помеха, получим для последнего условия 82 %.

При выделении геофизических аномалий в общем случае проводится разделение региональных и локальных аномалий, отличающихся

ся областью их проявления. Наилучшие условия разделения этих аномалий существуют в случае резкого их различия по размерам и интенсивности. В зависимости от целевой задачи подавляется либо одна либо другая составляющая геофизического поля. Нередко интерес представляют как региональные аномалии, отражающие крупные структурные особенности геологической среды, так и локальные аномалии, которые связаны с влиянием мелких геологических тел, например рудных залежей.

Выделение региональных аномалий проводится на основе сглаживания наблюдаемого поля, предполагающего существенное ослабление влияния помех и локальных объектов. К основным способам выделения региональных аномалий относятся следующие.

1. Усреднение поля вдоль профилей или по площади. Часто используют поточечное усреднение в пределах круга определенного радиуса.

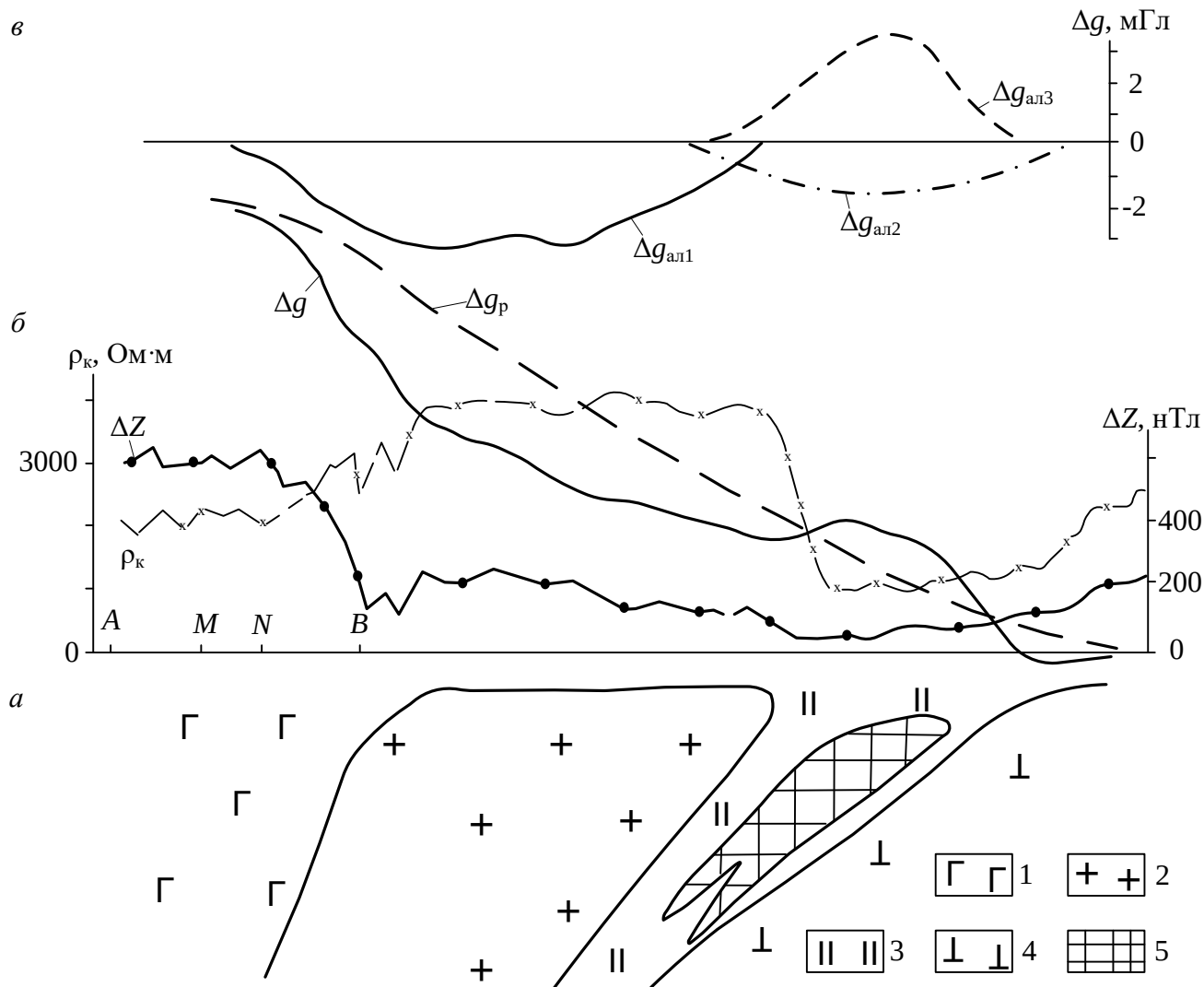
2. Тренд-анализ, под которым понимается процедура аппроксимации эмпирических данных вполне определенными функциями, аргументами которых являются координаты точек наблюдения. Аппроксимация может осуществляться с помощью алгебраических полиномов, как правило, невысоких степеней. При кусочно-полиномиальной аппроксимации применяют сплайн-функции, представляющие кубические полиномы для ограниченных участков площади.

3. Пересчет в верхнее полупространство позволяет существенно ослабить влияние небольших геологических неоднородностей и упростить процесс интерпретации региональной аномалии, которая проявляется более отчетливо.

Локальные аномалии определяют после исключения из измеренного поля региональной составляющей. Для того чтобы подчеркнуть существование локальной аномалии осуществляют пересчет измеренного поля в нижнее полупространство и вычисляют производные высшего порядка. Это позволяет усилить высокочастотную составляющую, связанную с геологическими телами небольших размеров.

Пример совместного проявления региональной и локальных аномалий в поле силы тяжести в районе медноколчеданного месторождения показан на рис. 22. На фоне плавного почти линейного уменьшения поля Δg в краевой части крупного массива базальтов

(основные породы с повышенной плотностью) фиксируется локальная отрицательная аномалия (условно первого порядка), связанная с субинтрузией гранитоидов (породы кислого состава менее плотные по сравнению с базальтами). Региональная аномалия от массива базальтов показана на рис. 22, б штриховой линией (Δg_p). Висячем боку субинтрузии гранитоидов внутри зоны гидротермально измененных пород (метасоматиты с минимальной для разреза плотностью) находится рудная залежь (с максимальной для разреза плотностью). Ореол метасоматитов создает отрицательную аномалию (условно второго порядка), на фоне которой проявляется локальная положительная аномалия (условно третьего порядка) от рудной залежи. Для наглядности все три локальные аномалии (1, 2, 3) изображены отдельно на рис. 22, в.



a – геологический разрез: 1 – базальты; 2 – гранитоиды; 3 – гидротермально измененные породы; 4 – туфы; 5 – руды; *б* – графики измеренного поля силы тяжести (Δg) и его регионального фона (Δg_p), магнитного поля (ΔZ), удельного сопротивления (ρ_k); *в* – графики локальных аномалий поля силы тяжести, отражающие присутствие в разрезе субинтрузии ($\Delta g_{ал1}$), зоны гидротермально измененных пород ($\Delta g_{ал2}$), рудной залежи ($\Delta g_{ал3}$)

О существовании нескольких локальных аномалий поля силы тяжести можно предположить по данным других геофизических методов. Так присутствие субинтрузии гранитоидов, которым соответствует обширная отрицательная локальная аномалия гравитационного поля (1), отчетливо фиксируется ступенчатым понижением магнитного поля относительно уровня, характерного для базальтов, и увеличением в этом районе кажущегося сопротивления. Выход к дневной поверхности зоны гидротермально измененных пород, которому соответствует локальная отрицательная аномалия (2), совпадает с областью минимальных значений магнитного поля и кажущегося сопротивления, что является довольно типичным признаком для ореолов околорудных изменений. Существование в этой же области слабой локальной положительной аномалии силы тяжести (3) является следствием влияния рудных масс с аномально высокой плотностью. Слабость влияния рудной залежи связано с тем, что над ее верхней кромкой залегают низкоплотные породы (метасоматиты и кора выветривания), а также эффектом наложения положительной аномалии от руды на более обширную отрицательную аномалию от зоны гидротермалитов.

Необходимо подчеркнуть важность разделения аномалий силы тяжести, поскольку результаты их количественной интерпретации позволяют сформировать представления о пространственных контурах геологических тел, создающих эти аномалии. Данные же большинства других методов имеют значение для картирования неоднородностей в верхней части разреза.

Принципы комплексной интерпретации геофизических аномалий

Цель комплексной интерпретации данных различных методов состоит в том, чтобы выполнить классификацию геологических объектов, создающих достоверные аномалии, уделяя первоочередное внимание перспективным аномалиям.

Использование эталонных аномалий. Комплексная интерпретация может осуществляться с помощью как аналитических, так и вероятностно-статистических методов. Первым этапом интерпретации

является построение рабочих (интерпретационных) физико-геологических моделей, которые позволяют задать некоторые априорные рамки и сузить неопределенность решения обратной задачи, выбрав наиболее вероятные варианты. В аналитических способах комплексной интерпретации геологические объекты и их параметры для ФГМ задаются в виде начальных приближений итерационного цикла решения обратной задачи. Интерпретатор должен представлять вид типичных аномалий, характерных для некоторого класса моделей геологических тел, подходящих для условий изучаемой среды. При этом учитываются ограничения, которые вытекают из представлений об априорной ФГМ и данных, полученных применявшимися геологическими (результаты проходки канав, шурфов, скважин), геохимическими и геофизическими методами.

Примером приемов решения обратных задач на участке проведения съемки методом заряда служит геологический разрез, построенный на основе комплексной интерпретации аномального поля заряда с учетом данных измерений магнитного поля и проходки скважин глубокого и картировочного бурения (рис. 5, б). При интерпретации аномального поля заряда использован набор некоторых теоретических аномалий электрического потенциала над типовыми объектами геологических разрезов рудных полей, приведенный на рис. 23.

Пособием по интерпретации локальных аномалий комплекса геофизических методов может служить таблица-схема, представляющая подборку аномалий от тел простейшей геометрической формы с аналитическими выражениями для вычислений полей в некоторых характерных точках (приложение 1).

Традиционными являются приемы визуального сопоставления аномалий, выделяемых по различным измеренным физическим полям. При анализе аномалий ориентируются по совпадению определенных признаков на установлении меры аналогии исследуемых и эталонных объектов. В качестве эталонов используют геологические тела, детально изученные как геофизическими, так и геологическими методами, подтвержденные бурением и горными выработками.

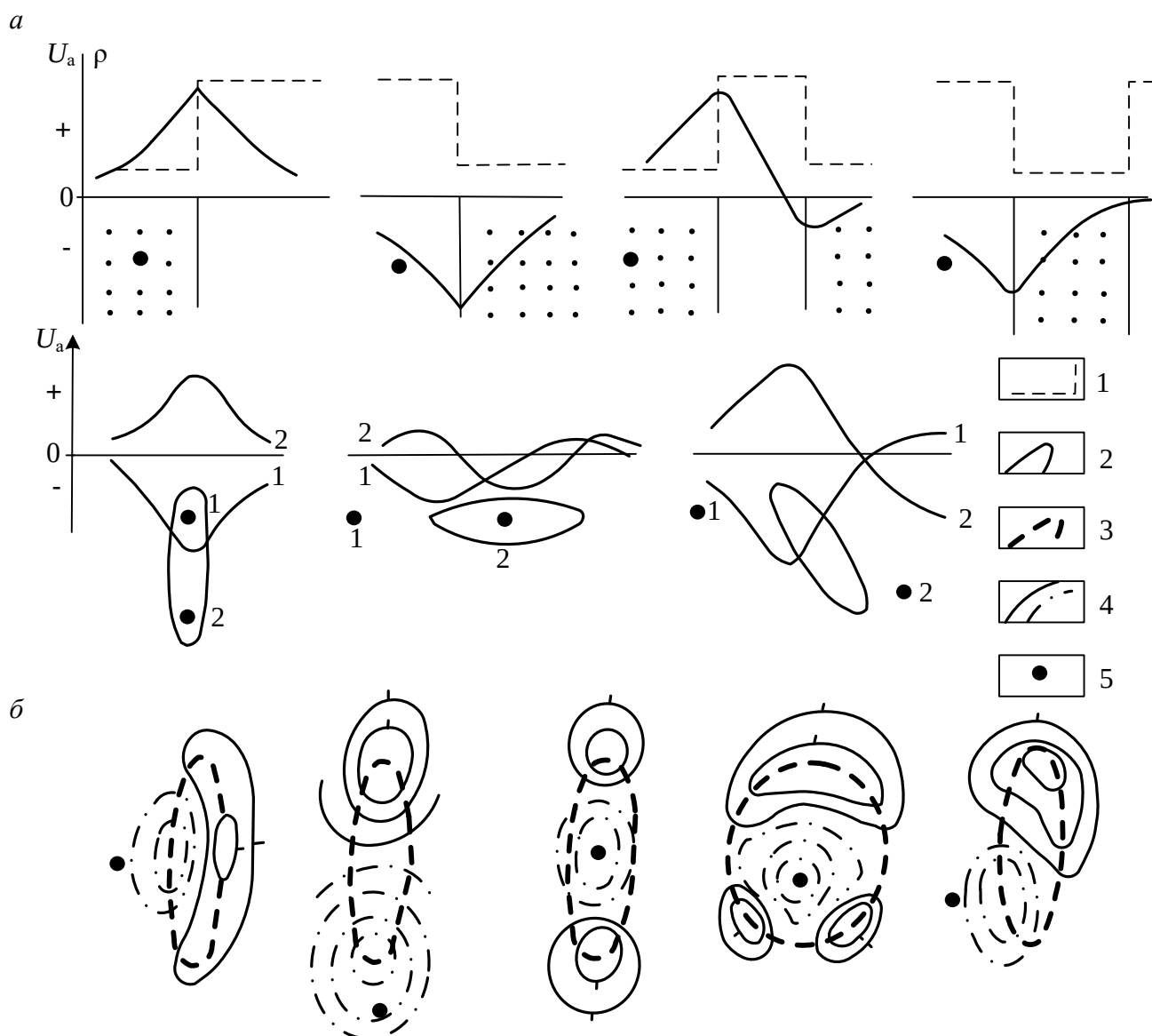


Рис. 23. Графики (а) и планы изолиний (б) аномального электрического потенциала (U_a) поля заряда в присутствии пластовых и сфероидальных тел:

1 – графики удельного сопротивления (ρ) слоистых сред; 2, 3 – погруженный сфероидальный проводник в разрезе (2) и плане (3); 4 – изолинии положительного (сплошные линии) и отрицательного (штрихпунктирные линии) аномального потенциала; 5 – заряд

Фактически задача подготовки к комплексной интерпретации сводится к созданию физико-геологических моделей типовых объектов-эталонов. Например, составляется сводка признаков, по которым могут быть откартированы тектонические нарушения. К их признакам обычно относят: отрицательные аномалии гравитационного, магнитного полей, кажущегося сопротивления, связанные с разрыхлением пород в зоне нарушения, увеличением над ним коры выветривания. В ряде случаев нарушениям в плане соответствуют узкие полосы

резкого изменения поля, связанного с различием свойств двух блоков, разделенных разрывом. Для тектонических нарушений характерна линейность в проявлении отмеченных признаков. В качестве эталонных аномалий гравитационных и магнитных полей, фиксирующих проявления разрывной тектоники, может служить подборка, приведенная на рис. 24. Признаки разрывов выражаются в сгущении изолиний, смене ориентировки большой группы локальных аномалий, повторяющимся изломом аномалий, наличием линейно вытянутых аномалий большой протяженности, смещении осей локальных аномалий или характерные деформации изолиний в определенном направлении. Все эти особенности аномальных полей можно видеть на рис. 24.

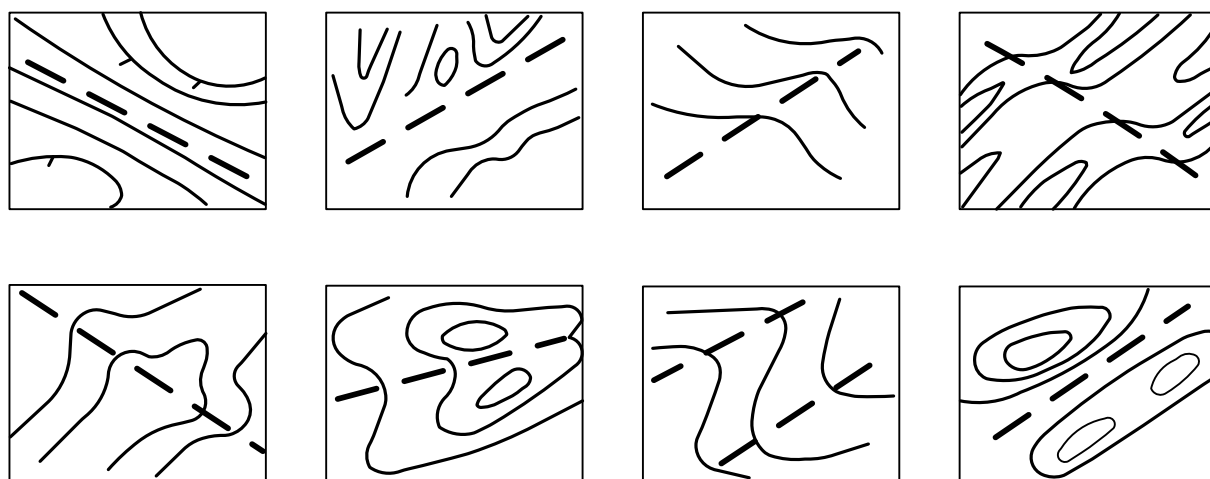


Рис.24. Примеры проявления тектонических нарушений (штриховые линии) в аномальных гравитационном и магнитном полях (по Г. Г. Кассину)

Разработаны специальные программы, позволяющие выделять и классифицировать комплексные аномалии в автоматическом режиме на основе некоторого набора эталонных образов типовых объектов. Результатом компьютерных способов распознавания образов являются прогнозные карты изученной территории с разбиением на несколько классов, характеризующихся различным набором признаков и имеющие определенное геологическое значение [2].

Одним из путей решения задачи диагноза геофизических аномалий является вычисление функций комплексного показателя (ФКП) θ , интегрировано обобщающих результаты измерений несколькими методами одновременно. Они служат для: 1) свертывания информации, полученной несколькими методами исследования; 2) приведения

наблюдений к уровню нормального поля; 3) выделения слабых аномалий; 4) разделения выявленных комплексных аномалий на перспективные и неперспективные [1].

Техника вычисления ФКП рассмотрена в разделах 3 и 5, а пример ее использования рассмотрен на материалах, послуживших основой при построении ФГМ для поисков месторождений урана (см. раздел 3, рис. 6). Полезность определения ФКП продемонстрирована также на рис 19.

Приводимое на рис. 6 отдельное вычисление ФКП для данных гравимагнитных исследований и поисковых методов электроразведки и радиометрии связано с различием задач, которые ставятся перед этими комплексами. С помощью первых методов можно картировать выходы к дневной поверхности потенциально рудоносных сланцев и подстилающих карбонатных отложений. Как показано на рис.6, эта задача решается успешно и выявляемые аномалии ФКП (Θ_1) являются перспективными и локализуют участки для детальных поисков.

В случае применения поискового комплекса обнаружение аномалий ФКП для этого комплекса (Θ_2), подобной той, которая изображена на рис. 6, позволяет отнести ее к перспективным и рассматривать как признак присутствия уранового оруденения.

Количественная комплексная интерпретация наиболее эффективна для сильных аномалий, то есть при больших значениях показателей контрастности. Данные совокупности методов позволяют более надежно установить возможные ограничения, которые необходимо учитывать при применении интерпретационного аппарата математической физики. Наиболее успешным является метод подбора параметров аномалиеобразующих объектов, позволяющий получить решение прямой задачи, соответствующее эмпирическим данным об изучаемых полях.

Прежде чем перейти к построению детальной ФГМ осуществляется экспресс-интерпретация полей путем оценочных вычислений ожидаемых для модели аномалий и их сопоставления с реально измеренными полями на участке работ. Для этих целей можно воспользоваться уже упоминавшейся выше таблицей-схемой аномалий для тел правильной геометрической формы. Таблица дает представление о виде геофизических аномалий и их амплитуде при известных форме, размерах, условиях залегания и аномальности физических (плотност-

ных, магнитных, электрических) свойств большой группы объектов, моделирующих геологические тела.

Способ подбора. Для уточнения форм аномалиеобразующих геологических тел используется способ подбора, который предполагает отыскание их границ по полям для отдельных методов с учетом ограничений, вытекающих из данных других методов. Например, при интерпретации сложных гравиметровых аномалий по профилю необходимо предварительно определиться с уровнем региональной аномалии и создающей ее неоднородностью, а также с количеством и видом локальных аномалий, подлежащих количественной интерпретации. Существенную помощь при этом могут оказать данные других геофизических методов. Например, как это показано по материалам рис. 22, можно обосновать возможность выделения локальных аномалий от нескольких объектов и высказать предположения об их геологической природе.

По данным электрозондирования часто удается установить положение кровли коренных горных пород и вероятные физические характеристики скрытых под наносами геологических тел (на основе корреляционных зависимостей между электрическими и другими физическими свойствами). Часто по аномалиям методов естественного электрического поля и вызванной поляризации проявляются участки рассеянной сульфидной минерализации, типичные для оклорудно-измененных пород. Пример подобных аномалий приведен в разделе 3 на рис. 10. Естественно, что имеет смысл геометризовать в пространстве эти участки, данные о выходах к дневной поверхности которых устанавливаются электроразведкой. Особый интерес представляет задача определить положение в пространстве рудных залежей, признаки существования которых заметны в аномальном поле силы тяжести и могут проявиться по данным специальных методов, например метода переходных процессов.

Для реализации способа подбора в рамках каждого метода разработаны разнообразные программы. Например, применительно к методу ВЭЗ разработан набор программ, как для ручной, так и машинной (компьютерной) интерпретации. Подбор сводится к сопоставлению наблюдаемых кривых с теоретически рассчитанными графиками для горизонтально-слоистой среды с известными параметрами (удельное сопротивление и мощность) слоев. Для снижения неоднозначности интерпретации используют данные о сопротивлении не-

которых опорных слоев или точно установленных границах на отдельных участках работ. Наиболее достоверные данные получают при наличии скважин.

Классификация геологических объектов на принципе самообучения

Этот принцип позволяет по совокупности геофизических данных разделить площадь исследований на некоторое число однородных (по совокупности признаков) классов (объектов), причем их геологическая природа может до определенного времени оставаться неясной. Для установления природы таких классов требуется выполнить геологические исследования (анализ проб, проходка скважин и др.), однако объем заверочных исследований невелик. Достаточно проанализировать данные по типичным представителям классов.

Примером реализации такого подхода могут служить материалы петрофизической классификации и картирования горных пород по данным измерений физических полей в скважинах [10]. Так при разведке медноколчеданного месторождения Осеннее на Южном Урале было установлено, что рудовмещающая структура представляет сложно построенную вулкано-тектоническую депрессию, осложненную крутопадающими и межслоевыми нарушениями. Всего в разрезе месторождения выделялось около десятка разновидностей литотипов [11], представлявших сложный комплекс геологических тел. Определенные сложности возникали с установлением наименования пород, подвергшихся гидротермальному метасоматозу, а также с определением роли субвулканических липарито-дацитов в формировании месторождения.

Для классификации геологических объектов на месторождении были привлечены данные каротажа естественной радиоактивности (ГК), которые, как известно, наиболее тесно связаны с литологическими особенностями горных пород. По этому свойству легче всего определить тип породы, подвергшейся эпигенетическим преобразованиям и принявшей черты метаморфизованной разновидности. Построенная по результатам статистической обработки диаграмм ГК, по методике изложенной в разделе 3, дифференциальная кривая распределения радиоактивности изображена на рис. 25. Из этой кривой следует, что все рудовмещающие породы можно разделить на три статистически однородные совокупности (А, Б, В) и определить границы

между ними (9 и 25 мкР/час) для построения петрорадиоактивных разрезов.

Результаты анализа химического состава показали, что радиоактивность рудовмещающих пород возрастает пропорционально увеличению кремнезема (47,6, 57,3, 65,7 %) и калия (1,9, 3,3, 4,8 % K_2O) и положительно коррелируется с повышением кислотности пород, которая в свою очередь отражает последовательность поступления в изучаемый массив магматических инъекций. Построенные петрофизические разрезы значительно проще геологических разрезов и наглядно отражают структурные особенности и историю формирования месторождения. Для этого на петрорадиоактивный разрез наложены контуры зон, отражающие степень сульфидной минерализации пород, установленные в результате статистической обработки диаграмм метода электродных потенциалов (МЭП). Данные метода фиксируют степень рудной концентрации ($>0,65$, $0,65-0,3$, $<0,3$), соответствующей уровню сплошных руд (класс Р), сильно измененных и сульфидизированных пород (класс С) и слабо измененных окolorудными процессами участков разреза.

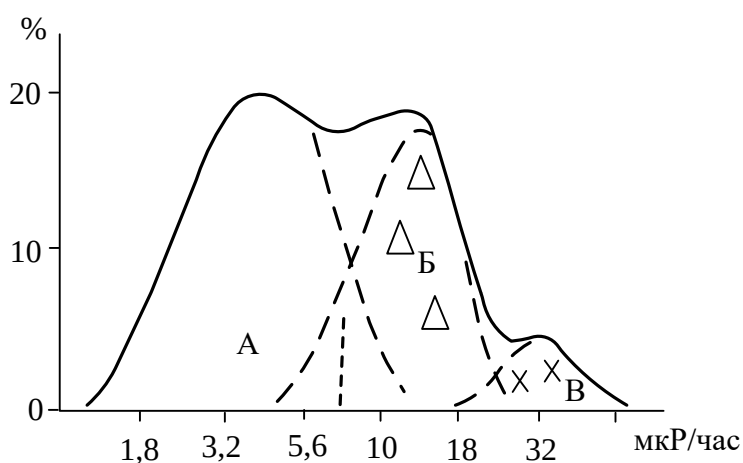


Рис. 25. Дифференциальная кривая распределения гамма-активности рудовмещающих пород медноколчеданного месторождения Осеннее

Результаты классификации геологических объектов по данным измерений двух геофизических полей на принципах самообучения с помощью статистического способа позволили построить петрофизические разрезы, на которых породы разделены на обоснованное огра-

ниченное число классов, отражающих главные черты рудоносной структуры.

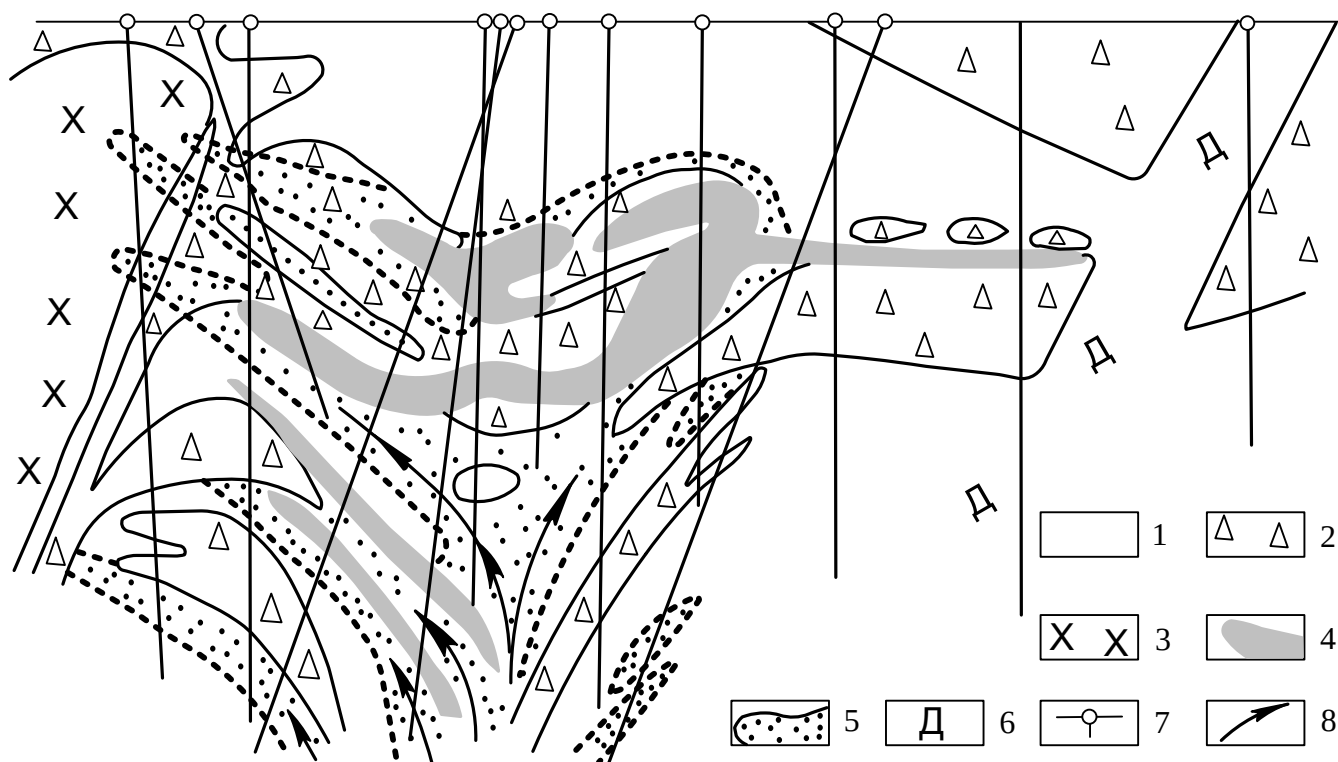


Рис. 26. Петрофизический разрез (классификация по двум геофизическим полям: ГК и МЭП) медноколчеданного месторождения Осеннее:

1, 2, 3 – петрорадиоактивные группы пород А, Б и В, соответственно; 4 – сплошные руды (класс Р); 5 – богатая сульфидная минерализация (класс С); 6 – дайка основных пород; 7 – скважины; 8 – предполагаемые пути движения рудоносных растворов

Один из таких разрезов приведен на рис. 26. Из него видно, что в массив, сложенный комплексом вулканогенных пород основного состава (комплекс пород класса А с низкой радиоактивностью) на завершающей стадии активного вулканизма по субвертикальной тектонической зоне внедрились субинтрузии кислых пород (липарито-дацитовые порфиры – класса Б по радиоактивности). Эти породы имеют силлобразную форму с корнями, уходящими на глубину. На заключительной стадии вулканизма ранее сформированная толща была прорвана интрузией (сиенит-диориты класса В с наибольшей радиоактивностью). Поступление рудоносных растворов происходило по каналу уже пройденному субинтрузиями липарит-дацитов, кото-

рые перекрыли сквозную тектоническую зону, образовав экранированную структуру с участками повышенной проницаемости на контактах кислых и основных пород. Эти участки брекчирования и явились теми самыми резервуарами, в которых накапливались руообразующие смеси.

Контуры зон, отражающих классы пород с высокой и умеренной степенью сульфидной минерализации (классы Р и С, соответственно) фиксируют картину проникновения рудных растворов с глубоких горизонтов вверх по узкому субвертикальному каналу. Очевидно, что в верхней части разреза происходило распределение этих растворов по экранированным пологим участкам брекчирования на контактах вулканогенных и субинтрузивных пород, где увеличивалась концентрация рудного вещества. По данным комплексной интерпретации геофизических полей медноколчеданное месторождение Осеннее является типичным представителем корневых рудных полей II рода, геологические модели которых рассмотрены в разделе 3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основной

1. *Вахромеев Г. С.* Основы методологии комплексирования геофизических исследований при поисках рудных месторождений. М.: Недра, 1978. 152 с.

2. *Комплексирование методов разведочной геофизики: Справочник геофизика* / под ред. В. В. Бродового, А. А. Никитина М.: Недра, 1984, 384 с.

3. *Никитин А. А., Хмелевской В. К.* Комплексирование геофизических методов: учебник для вузов. Тверь: ООО Изд. «ГЕРС», 2004, 294 с.

Дополнительной

4. *Виноградов А. М.* Геополя и колчеданы Южного Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 2004, 187 с.

5. *Геофизические методы разведки рудных месторождений.* / В. В. Бродовой, В. Д. Борцов, Л. Е. Подгорная и др. под ред. В. В. Бродового. М.: Недра, 1990, 296 с.

6. *Геофизические методы поисков и разведки неметаллических полезных ископаемых* / под ред. П. В. Вишневого, Г. С. Вахромеева, И. Л. Шаманского. М.: Недра, 1984, 223 с.

7. *Геофизические поиски рудных месторождений* / под ред. В. А. Кличникова. Алма-Ата: Каз.ФВИРГ, 1970, 610 с.

8. *Кассин Г. Г.* Геофизические методы на региональном этапе геологоразведочного процесса. Екатеринбург: УГГА, 1996, 104 с.

9. *Рудные месторождения СССР* / под ред. В. И. Смирнова. Том 3. М.: Недра, 1974, 392 с.

10. *Сапожников В. М.* Использование диаграмм каротажа для петрофизического картирования рудовмещающих горных пород. / Методика поисков и разведки глубокозалегающих рудных месторождений. Вып.1. Межвуз. науч. темат. сб. Свердловск: изд. УПИ, 1977, с. 11-19.

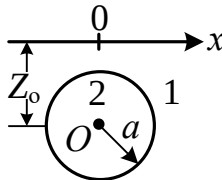
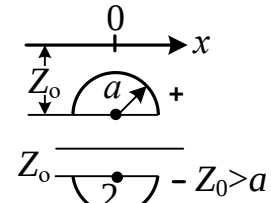
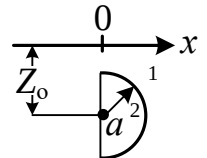
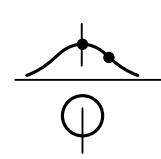
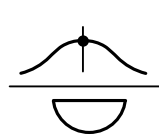
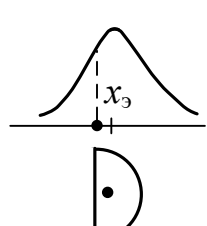
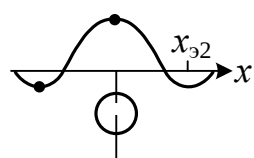
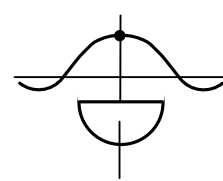
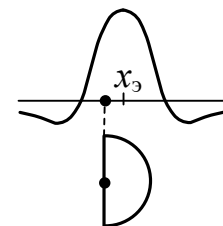
11. *Сапожников В. М., Голиков Ю. В., Берг Л. Я.* Опыт объемного петрофизического картирования рудовмещающих пород месторождения Осеннее / Методика поисков и разведки глубокозалегаю-

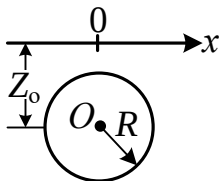
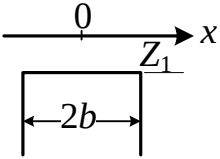
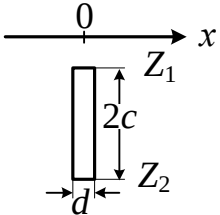
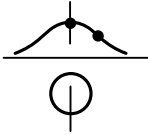
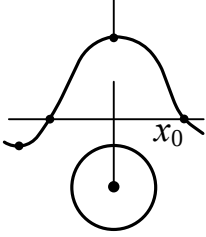
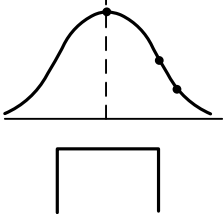
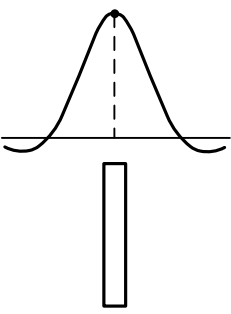
щих рудных месторождений. Вып.1. Межвуз. науч. темат. сб. Свердловск: изд. УПИ, 1977, с. 20-27.

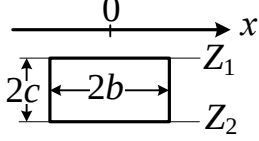
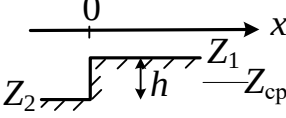
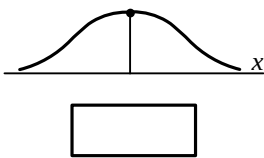
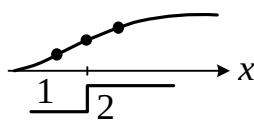
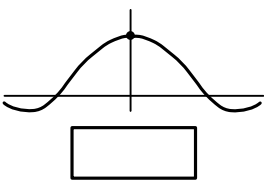
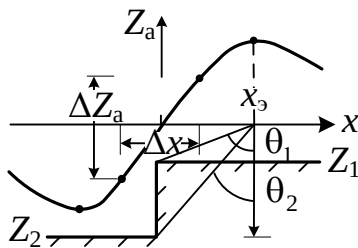
12. Сапожников В. М., Шевченко В. Г. Теория и методика электроразведки в градиентных средах. Л.: Недра, 1992, 135 с.

13. *Электроразведка рудных полей методом заряда* / М. В. Семенов, В. М. Сапожников, М. М. Авдевич, Ю. В. Голиков. Л.: Недра, 1984, 216 с.

**Сводка формул для вычисления значений
аномальных полей в характерных точках**

1		III	III _Г	III _В
2	разрез			
3	Δg_a^3	$\frac{4G\pi a^3 \Delta \sigma}{3Z_0^2}$ $x_{1/2} = 0,77Z_0$ 	$\frac{2G\pi a^3 \Delta \sigma}{3Z_0^2} \left(1 \pm \frac{3a}{4Z_0} \right)$ 	$\frac{2G\pi a^3 \Delta \sigma}{3Z_0^2}$ $x_3 = \frac{3}{8}a$ 
4	Z_a^3	$\frac{8\pi a^3 J}{3Z_0^3}$ $x_0 = \pm Z_0 \sqrt{2}$ $x_{32} = \pm 2Z_0$ $Z_{a2}^3 = -0,036Z_a^3$ 	$\frac{4\pi a^3 J}{3Z_0^3} \left(1 \pm \frac{9a}{8Z_0} \right)$ 	$\frac{4\pi a^3 J}{3Z_0^3}$ $x_3 = \frac{3}{8}a$ 
5	ρ_k^3 η_k^3	$\frac{2\kappa_1 \rho_1 a^3}{Z_0^3}$	$\frac{2\rho_1(\mu-1)a^3}{5\mu+1} \times$ $\times \left(\frac{1}{Z_0^3} \pm \frac{9a}{8Z_0^4} \right)$	$\frac{\rho_1(\mu-1)a^3}{(\mu+2)Z_0^3}$

1		Ц	МП	ТП
2	разрез			
3	Δg_a^3	$\frac{2G\pi R^2 \Delta \sigma}{Z_0^2}$ $x_{1/2} = \pm Z_0$ 	$\pm \infty$	$2Gd\Delta\sigma \ln \frac{Z_2}{Z_1}$ $x_{1/2} = \pm \sqrt{Z_1 Z_2}$ 
4	Z_a^3	$\frac{2\pi R^2 J}{Z_0^2}$ $x_{\min} = \pm Z_0 \sqrt{3}$ $x_0 = \pm Z_0$ 	$4J \operatorname{arctg} \frac{b}{Z_1}$ $x_{1/2} = \pm \sqrt{b^2 + Z_1^2}$ $x_{1/4} = \pm \sqrt{x_{1/2}^2 + 2Z_1 x_{1/2} }$ 	$2J d \left(\frac{1}{Z_1} - \frac{1}{Z_2} \right)$ 
5	ρ_k^3 η_k^3	$\frac{2\kappa \rho_1 R^2}{Z_0^2}$	$\frac{2\rho_1(\mu-1)}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{b}{Z_1}$	$\frac{\rho_1 d}{\pi m} \left(\frac{1}{Z_1} - \frac{1}{Z_2} \right)$ $m = \frac{\mu}{\mu-1} - \frac{c}{b+c}$ $d = 2b$

1		Пр	У
2	разрез		
3	Δg_a^3	$2G\Delta\sigma\left\{b\ln\frac{Z_2^2+b^2}{Z_1^2+b^2}+2(f_2-f_1)\right\}$ $f_i = Z_i \operatorname{arctg}\frac{b}{Z_i}$ 	$2\pi Gh\Delta\sigma$ $x_3 \rightarrow \infty$ $x_{1/2} = 0$ $x_0 \rightarrow -\infty$ $x_{1/4} = -Z_{cp}$ $x_{3/4} = Z_{cp}$ 
4	Z_a^3	$4J\left(\operatorname{arctg}\frac{Z_2}{b}-\operatorname{arctg}\frac{Z_1}{b}\right)$ 	$Z_a = 2J(\theta_1 - \theta_2)$ $\theta_{1,2} = \operatorname{arctg}\frac{x}{Z_{1,2}}$ $x_0 = 0$ $x_3 = \pm\sqrt{Z_1 Z_2}$ $x = 0 \quad \Delta Z_a / \Delta x = \frac{2J}{Z_1}$ 
5	ρ_K^3 η_K^3	$\frac{2\rho_1}{\pi m}\left(\operatorname{arctg}\frac{Z_2}{b}-\operatorname{arctg}\frac{Z_1}{b}\right)$ $m = \frac{\mu}{\mu-1} - \frac{c}{b+c}$	$\rho_{ка} = \rho_1 \frac{(\mu-1)(\theta_1 - \theta_2)}{\mu\pi}$ при $\rho_2 = \rho_1$ $\eta_{ка} = (\eta_2 - \eta_1) \frac{\theta_1 - \theta_2}{\pi}$

Пояснения

Аномальные геофизические поля: гравитационное (Δg_a), магнитное (Z_a), удельное сопротивление ($\rho_{ка}$) и поляризуемость ($\eta_{ка}$).

Тела: шар (Ш), полушары вертикальный (ПШВ) и горизонтальный (ПШГ), цилиндр (Ц), мощный пласт (МП), тонкий пласт (ТП), прямоугольная прямая призма (ПР), вертикальный уступ (У).

Размерности: линейные величины в м, $\Delta\sigma$ -избыточная плотность в г/см³; $G=6.67\cdot 10^3$ внесистемный вариант гравитационной постоянной, позволяющий получать Δg_a в мГл.; $\Delta\chi$ -избыточная магнитная восприимчивость в системе СГС ($\Delta\chi_{СГС}=4\pi\cdot\Delta\chi_{СИ}$); J_i -интенсивность вертикального намагничивания: $J_i=\Delta\chi\cdot Z_n$; Z_n – нормальное поле Земли: $Z_n\approx 0.5$ Э; 1 Эрстед=10⁵ нТл.; $\text{artg } x$ в радианах; ρ_1 и ρ_2 – удельное сопротивление вмещающей среды и тела, соответственно; $\mu=\rho_2/\rho_1$; $K=(\mu-1)/(\mu+1)$; $K_1=(\mu-1)/(2\mu+1)$; $\rho_k=\rho_1+\rho_{ка}$; $\eta_k=1-\rho_k/\rho_k^*$; $\rho_1^*=\rho_1/(1-\eta_1)$; $\rho_2^*=\rho_2/(1-\eta_2)$; $\mu^*=\rho_2^*/\rho_1^*$; $\rho_k^*=\rho_1^*+\rho_{ка}^*$; $\eta_{ка}=\eta_k-\eta_1$; графики $\rho_{ка}$ и $\eta_{ка}$ подобны графикам Z_a ; $x_э=0$ (кроме уступа).

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебно-методическому

комитету
С.А. Уиоров



**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

Специальность:

21.05.03 Технология геологической разведки

форма обучения: очная, заочная

Автор: Александрова Ж. Н.

Екатеринбург

2020



ФГБОУ ВО

**«Уральский государственный горный
университет»**

Ж. Н. Александрова

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Учебно-методическое пособие
к практическим занятиям и самостоятельной работе
по дисциплине «Радиационная безопасность» для студентов
специализаций «Геофизические методы исследования скважин» и
«Геофизические методы поисков и разведки МПИ»
специальности 21.05.03 Технология геологической разведки
очной и заочной формы обучения

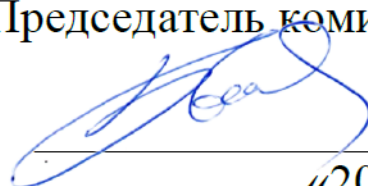
Часть 1

Расчет доз внешнего и внутреннего облучения

**Екатеринбург
2020**

ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

ОДОБРЕНО
методической комиссией
факультета геологии и геофизики
Председатель комиссии



В. И. Бондарев
«20» марта 2020 г.

Ж. Н. Александрова

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Учебно-методическое пособие
к практическим занятиям и самостоятельной работе
по дисциплине «Радиационная безопасность» для студентов
специализаций «Геофизические методы исследования скважин» и
«Геофизические методы поисков и разведки МПИ»
специальности 21.05.03 Технология геологической разведки
очной и заочной формы обучения

Часть 1
Расчет доз внешнего и внутреннего облучения

Рецензент: Шапов В.А., старший научный сотрудник
Института геофизики УрО РАН, д-р геол.-мин. наук

Александрова Ж.Н.

- А46 Лабораторный практикум по радиационной безопасности: учебно-методическое пособие к практическим занятиям и самостоятельной работе по дисциплине "Радиационная безопасность" для студентов специализаций «Геофизические методы исследования скважин» и «Геофизические методы поисков и разведки МПИ» специальности 21.05.03 – «Технология геологической разведки» очной и заочной формы обучения; Часть 1. Расчет доз внешнего и внутреннего облучения / Ж. Н. Александрова; Уральский гос. горный ун-т. – Екатеринбург: изд-во УГГУ, 2020. – 32 с.

В учебно-методическом пособии кратко изложены сведения об ионизирующих излучениях и их основных свойствах, рассмотрено воздействие ионизирующего излучения на ткани организма, приведены специальная терминология по вопросам радиационной безопасности и значения предельно допустимых уровней облучения, описана методика расчета доз при внешнем и внутреннем облучении. Пособие содержит руководства к выполнению трех лабораторных работ по расчету доз облучения в различных ситуациях.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся специализациям «Геофизические методы исследования скважин» и «Геофизические методы поисков и разведки МПИ» по специальности «Технология геологической разведки»

© Александрова Ж.Н., 2020
© Уральский государственный
горный университет, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	5
1.1. Ионизирующие излучения и их свойства	5
1.2. Специальная терминология по вопросам радиационной безопасности	9
1.3. Воздействие ионизирующего излучения на ткани организма	12
1.4. Расчет доз облучения	17
1.5. Предельно допустимые уровни облучения	21
2. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ	22
2.1. Определение предельно допустимого времени пребывания на различных расстояниях от источника гамма-излучения	22
Задание	22
Материалы и оборудование	22
Порядок выполнения работы	22
Контрольные вопросы	24
Содержание отчета	24
2.2. Определение дозы внутреннего облучения при попадании радиоактивного вещества внутрь организма	25
Задание	25
Материалы и оборудование	26
Порядок выполнения работы	26
Контрольные вопросы	27
Содержание отчета	27
2.3. Определение дозы внешнего облучения при работе на территориях с по- вышенной радиоактивностью	27
Задание	27
Материалы и оборудование	29
Порядок выполнения работы	29
Контрольные вопросы	31
Содержание отчета	31
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	32

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во многих отраслях практической деятельности человека применяются радиоактивные вещества и ионизирующие излучения. Расширяется применение радиоактивных изотопов и источников ионизирующих излучений в промышленности, медицине, науке, технике, геологоразведочной отрасли. В условиях роста количества работающих с ионизирующими излучениями вопросам радиационной безопасности должно придаваться большее значение.

Радиационная безопасность – это составная часть экологической безопасности человека. Обеспечение экологической безопасности при обращении с радиоактивными веществами предполагает такое обращение с ними, при котором наступление вредных последствий для здоровья и жизни человека было бы невозможно.

"Граждане Российской Федерации, иностранные граждане и лица без гражданства, проживающие на территории Российской Федерации, имеют право на радиационную безопасность. Это право обеспечивается за счет проведения комплекса мероприятий по предотвращению радиационного воздействия на организм человека ионизирующего излучения выше установленных норм, правил и нормативов, выполнения гражданами и организациями, осуществляющими деятельность с использованием источников ионизирующего излучения, требований к обеспечению радиационной безопасности" (статья 22 Федерального закона «О радиационной безопасности населения»).

Радиационная безопасность достигается совокупностью мер: правовых, технических, экономических, воспитательных и т.д. Ряд мер находится в ведении государства и специальных служб. Но многое зависит непосредственно от лиц, работающих с радиоактивными веществами – от их теоретических знаний и практических навыков при обращении с источниками ионизирующих излучений. Поэтому обучение персонала в области обеспечения радиационной безопасности приобретает важное значение.

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Ионизирующие излучения и их свойства

Ионизация. Ионизация – это процесс образования разделенных электрических зарядов. Процесс образования положительного иона состоит в вырывании электрона с электронной оболочки нейтрального атома, для чего необходимо затратить некоторую энергию. Для большинства атомов эта энергия лежит в пределах от 9 до 30 эВ. Если энергия, переданная атому, меньше энергии, необходимой для вырывания электрона, то ионизации не происходит. В этом случае может произойти возбуждение атома. Возбужденный атом обладает избытком энергии, которая освобождается в виде излучения (обычно ультрафиолетового) при возвращении атома в нормальное состояние.

Электрон, вырванный из атома в результате ионизации, как правило, не остается долго в свободном состоянии, он “прилипает” к нейтральному атому или нейтральной молекуле, образуя отрицательный ион. Таким образом, в обычных условиях ионы образуются парами. Возникшие ионы исчезают в результате их рекомбинации, т.е. процесса воссоединения отрицательных и положительных ионов, в котором образуются нейтральные атомы или молекулы.

Число ионов, исчезающих из единицы объема среды в единицу времени в результате рекомбинации q_α , пропорционально концентрации положительных и отрицательных ионов:

$$q_\alpha = \alpha n_1 n_2, \quad (1)$$

где n_1 – число положительных ионов в 1 см^3 , n_2 – число отрицательных ионов в 1 см^3 , α – коэффициент рекомбинации, $\text{см}^3/\text{с}$ (для малых ионов в воздухе при нормальных условиях $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$).

Ионизирующие излучения. Ионизирующими называются излучения, которые прямо или косвенно способны ионизировать среду. К ним относятся рентгеновское и γ -излучение, а также излучения, состоящие из потоков заряженных или нейтральных частиц, обладающих достаточными для ионизации энергиями.

Радиоактивные препараты обычно испускают ионизирующие α - и β -частицы, γ -лучи и нейтроны. Кроме перечисленных видов излучений могут быть использованы потоки протонов, тяжелых ядер, а также частицы, возникающие при различных ядерных реакциях.

Альфа-частицы — это положительно заряженные ядра атомов гелия. Обладают малой проникающей способностью. Оценить пробег α -частиц в воздухе можно с помощью следующей эмпирической формулы:

$$R_{\alpha}(E) = 0,316 \cdot E_{\alpha}^{3/2},$$

где $R_{\alpha}(E)$ - пробег α -частицы в воздухе в см; E_{α} - энергия α -частицы в МэВ.

Наиболее проникающие α -частицы могут пройти слой воздуха при нормальном атмосферном давлении не более 11 см. В твердом веществе пробег α -частиц составляет микроны и может быть найден с помощью эмпирической зависимости *Брегга-Климэна* :

$$L_{\alpha}(E) = 3,2 \cdot 10^{-4} \cdot R_{\alpha}(E) \cdot \frac{\sqrt{A}}{\rho},$$

где A - атомный вес, а ρ - плотность среды переноса α -частицы с начальной энергией E .

Например, в воде пробег α -частиц не превышает 150 микрон, а верхний слой отмерших клеток кожи человека (эпидермис) защищает его от внешнего α -излучения.

Альфа-частицы обладают большой ионизирующей способностью. Вследствие большой начальной энергии при столкновении с молекулами поглощающей среды α -частица на пути своего движения образует сотни тысяч пар ионов.

Бета-частицы — это поток электронов или позитронов. Их проникающая способность значительно выше, чем у α -частиц. Оценить пробег электронов в среде можно, используя следующую эмпирическую связь:

$$\begin{cases} R_m = 0,407 \cdot E_{\max}^{1.38} & \text{при } E_{\max} \leq 0,8 \text{ МэВ}, \\ R_m = 0,54 \cdot E_{\max} & \text{при } E_{\max} > 0,8 \text{ МэВ}, \end{cases}$$

где R_m - массовый пробег электронов в г/см^2 ; $E_{\max}$ - максимальная энергия электронов в МэВ.

Наиболее быстрые β -частицы могут пройти слой алюминия до 5 мм. Ионизирующая способность меньше, чем у α -частиц.

Рентгеновские и γ -лучи — это электромагнитное излучение высокой энергии. Обладают большой проникающей способностью, изменяющейся в широких пределах. Ионизирующая способность значительно меньше, чем у α - и β -частиц.

Нейтроны — нейтральные частицы, обладающие большой проникающей способностью. Ионизирующая способность меньше, чем у α - и β -частиц.

Протоны — положительно заряженные ядра водорода. При одинаковой энергии с α - и β -частицами протоны занимают промежуточное положение между ними по проникающей и ионизирующей способностям.

Космические лучи — лучи, приходящие на Землю из космического пространства. До поверхности Земли космические лучи доходят значительно преобразованными в результате их взаимодействия с атмосферой. Первичные космические лучи состоят в основном из протонов и ядер тяжелых элементов. В результате их взаимодействия с воздухом атмосферы возникают новые частицы: мезоны, электроны, нейтроны и т.д. В результате взаимодействия нейтронов космического излучения с ядрами атомов азота в атмосфере постоянно образуется радиоактивный изотоп углерода — C^{14} . Радиоактивный изотоп водорода — тритий также образуется в атмосфере под действием космического излучения. Космические лучи обладают очень большой проникающей способностью.

В таблицах 1 – 3 приведены данные по прохождению α - и β -частиц и протонов в некоторых средах.

Пробеги α -частиц и полная ионизация в ткани плотностью 1 г/см³ [4]

таблица 1

Энергия α -частиц, МэВ	В воздухе, см	В алюминии, мкм	В биологической ткани, мкм	Полная ионизация, число пар ионов $\times 10^5$
4,0	2,5	16	31	1,1
4,5	3,0	20	37	1,3
5,0	3,5	23	43	1,4
5,5	4,0	26	49	1,6
6,0	4,6	30	56	1,7
6,5	5,2	34	64	1,9
7,0	5,9	38	72	2,0
7,5	6,6	43	81	2,1
8,0	7,4	48	91	2,3
8,5	8,1	53	100	2,4
9,0	8,9	58	110	2,6
9,5	9,8	64	120	2,7
10,0	10,6	69	130	2,9

Средний пробег протонов и полная ионизация в воздухе и ткани плотностью 1 г/см³ [3]

таблица 2

Энергия протонов, МэВ	Воздух, см	Мягкие биологические ткани, мкм	Полная ионизация, число пар ионов
1	2,3	23	9154
2	7,3	73	15841
3	14,7	147	22344
4	24,1	241	28438
5	35,5	355	34293
6	48,6	486	39901
7	64,2	642	45967
8	81,3	813	51707
9	100,4	1004	57529
10	121,1	1211	63214
15	238,0	2380	-

Максимальный пробег β -частиц в различных средах [8]

таблица 3

Энергия β -частиц, МэВ	В воздухе, м	В алюминии, мм	В мягкой ткани, мм
0,01	0,00229	0,00127	0,00247
0,5	1,601	0,837	1,77
1,0	3,936	2,059	4,38
2,0	8,732	4,593	9,84
3,0	13,411	7,741	15,30
4,0	17,858	9,841	20,60
5,0	22,281	11,889	25,80
6,0	25,156	14,259	31,00
8,0	34,377	-	41,30

1.2. Специальная терминология по вопросам радиационной безопасности

Число распадов в секунду в радиоактивном образце называется его **активностью**. Единицу измерения активности (в системе СИ) называют беккерелем (*Бк*) в честь французского ученого Анри Беккереля, открывшего явление радиоактивности.

$$1 \text{ Бк} = 1 \text{ распад/с}$$

Кюри (внесистемная единица) - активность препарата данного изотопа, в котором в одну секунду происходит $3,7 \cdot 10^{10}$ актов распада.

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$$

Концентрация радиоактивного вещества обычно характеризуется концентрацией его активности. Концентрация активности выражается в единицах активности на единицу веса (удельная активность) или на единицу объема (активная концентрация). Единицы измерения концентрации радиоактивного вещества *Бк/кг* (внесистемная единица *Ки/кг*), *Бк/л* и *Бк/м³* (внесистемные единицы *Ки/л*, *Ки/м³*, *эман*).

$$1 \text{ эман} = 1 \cdot 10^{-10} \text{ Ки/л} = 3,7 \text{ Бк/л}$$

Повреждений, вызванных в живом организме излучением, будет тем больше, чем больше энергии оно передаст тканям. Количество переданной организму энергии называется **дозой**.

Дозу излучения организм может получить от любого радионуклида или их смеси независимо от того, находятся ли они вне организма или внутри его (в результате попадания с пищей, водой или воздухом).

Дозы можно рассчитывать по-разному, с учетом того, каков размер облученного участка и где он расположен, один ли человек подвергся облучению или группа людей и в течении какого времени это происходило.

Поглощенная доза - количество энергии излучения, поглощенное единицей массы облучаемого тела (тканями организма). Единица измерения в системе СИ - Грей (*Гр*).

$$1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$$

Но эта величина не учитывает того, что при одинаковой поглощенной дозе альфа излучение гораздо опаснее бета- или гамма-излучений. Если принять во внимание этот факт, то дозу следует умножить на коэффициент, отражающий способность излучения данного вида повреждать ткани организма. Альфа-излучение считается при этом в *20 раз* опаснее других видов излучений. Пересчитанную таким образом дозу называют **эквивалентной дозой**. Ее в системе СИ измеряют в зивертах (*Зв*). Для рентгеновского, гамма- и бета-излучений

$$1 \text{ Зв} = 1 \text{ Дж/кг}$$

Следует учитывать также, что одни части тела (органы, ткани) более чувствительны, чем другие: например при одинаковой эквивалентной дозе облучения возникновение рака в легких более вероятно, чем в щитовидной железе, а облучение половых желез особенно опасно из-за риска генетических повреждений. Поэтому дозы облучения органов и тканей также следует учитывать с разными коэффициентами (табл. 4). Умножив эквивалентные дозы на соответствующие коэффициенты и просуммировав по всем органам и тканям, получим **эффективную эквивалентную дозу**, отражающую суммарный эффект облучения для организма. Она также измеряется в зивертах.

Эти три понятия описывают только индивидуально получаемые дозы. Просуммировав индивидуальные эффективные эквивалентные дозы, получен-

ные группой людей, мы получим **коллективную эффективную эквивалентную дозу**, которая измеряется в человеко-зивертах (чел·Зв).

Коэффициенты радиационного риска [7]

таблица 4

Красный костный мозг	0,12
Костная ткань	0,03
Щитовидная железа	0,03
Молочная железа	0,15
Легкие	0,12
Половые железы	0,25
Другие ткани	0,30
Организм в целом	1,00

Соотношение между внесистемными единицами измерения активности и характеристик поля излучения и единицами СИ

таблица 5

Величина	Обозначения и наименования единиц		Связь между единицами
	Внесистемная	Единица СИ	
Активность	<i>Ku</i> (кюри)	<i>Bk</i> (беккерель)	$1 Ku = 3,7 \cdot 10^{10} c^{-1} = 3,7 \cdot 10^{10} Bk$ $1 Bk = 1 c^{-1} = 0,27 \cdot 10^{-10} Ku$
Удельная активность	<i>Ku/кг</i>	<i>Bk/кг</i>	$1 Ku/кг = 3,7 \cdot 10^{10} Bk/кг$ $1 Bk/кг = 0,27 \cdot 10^{-10} Ku/кг$
Объемная активность	<i>Ku/л, эман</i>	<i>Bk/м³</i>	$1 Ku/л = 3,7 \cdot 10^{13} Bk/м³$ $1 Bk/м³ = 0,27 \cdot 10^{-13} Ku/л$ $1 эман = 1 \cdot 10^{-10} Ku/л = 3,7 Bk/л$
Поглощенная доза	<i>рад</i>	<i>Гр</i> (грей)	$1 рад = 100 эрг/г = 0,01 Гр$ $1 Гр = 10^4 эрг/г = 100 рад$
Мощность поглощенной дозы	<i>рад/с</i>	<i>Гр/с</i>	$1 рад/с = 0,01 Гр/с$ $1 Гр/с = 100 рад/с$
Эквивалентная доза	<i>бэр</i> (биологический эквивалент <i>рада</i>)	<i>Зв</i> (зиверт)	$1 бэр = 1 рад/Q^* = 0,01 Гр/Q = 0,01 Зв$ $1 Зв = 1 Гр/Q = 100 рад/Q = 100 бэр$
Мощность эквивалентной дозы	<i>бэр/с</i>	<i>Зв/с</i>	$1 бэр/с = 0,01 Зв/с$ $1 Зв/с = 100 бэр/с$
Экспозиционная доза	<i>P</i> (рентген)	<i>Кл/кг</i>	$1 P = 2,58 \cdot 10^{-4} Кл/кг$ $1 P = 0,88 \cdot 10^{-2} Гр$ в воздухе $1 Кл/кг = 3,88 \cdot 10^3 P$
Мощность экспозиционной дозы	<i>P/с</i>	$\frac{Кл}{кг \cdot с}$	$1 P/с = 2,58 \cdot 10^{-4} Кл/кг \cdot с$ $1 P/с = 0,88 \cdot 10^{-2} Гр/с$ в воздухе $1 Кл/кг \cdot с = 3,88 \cdot 10^3 P/с$

* - коэффициент качества излучения

1.3. Воздействие ионизирующего излучения на ткани организма

Радиация по самой своей природе вредна для жизни. Малые дозы облучения могут "запустить" не до конца еще установленную цепь событий, приводящих к раку или к генетическим повреждениям. При больших дозах радиация может разрушать клетки, повреждать ткани органов и явиться причиной скорой гибели организма.

Повреждения, вызываемые большими дозами облучения, обыкновенно проявляются в течение нескольких часов или дней. Раковые заболевания, однако, проявляются спустя много лет после облучения - как правило, не ранее, чем через одно-два десятилетия. А врожденные пороки развития и другие наследственные болезни, вызываемые повреждением генетического аппарата, проявляются лишь в следующем или последующих поколениях: это дети, внуки и более отдаленные потомки человека, подвергшегося облучению.

Чтобы вызвать острое поражение организма, дозы облучения должны превышать определенный уровень, но нет никаких оснований считать, что это правило действует в случае таких последствий, как рак или повреждение генетического аппарата. По крайней мере, теоретически для этого достаточно самой малой дозы. Однако в то же самое время никакая доза облучения не приводит к этим последствиям во всех случаях. Даже при относительно больших дозах облучения далеко не все люди обречены на эти болезни: действующие в организме человека репарационные механизмы обычно ликвидируют все повреждения. Точно также любой человек, подвергшийся действию радиации, совсем не обязательно должен заболеть раком или стать носителем наследственных болезней; однако вероятность, или риск, наступления таких последствий у него больше, чем у человека, который не был облучен. И риск этот тем больше, чем больше доза облучения.

Механизм воздействия ионизирующего излучения на ткани организма следующий.

Заряженные частицы. Проникающие в ткани организма альфа- и бета-

частицы теряют энергию вследствие электрических взаимодействий с электронами тех атомов, близ которых они проходят. Гамма-излучение и рентгеновские лучи передают свою энергию веществу несколькими способами (фотоэффект, комптон-эффект, эффект образования электрон-позитронных пар), которые в конечном счете также приводят к электрическим взаимодействиям.

Электрические взаимодействия. За время порядка десяти триллионных секунды после того, как проникающее излучение достигнет соответствующего атома в ткани организма, от этого атома отрывается электрон. Последний заряжен отрицательно, поэтому остальная часть исходно нейтрального атома становится положительно заряженной. Этот процесс называется ионизацией. Оторвавшийся электрон может далее ионизировать другие атомы.

Физико-химические изменения. И свободный электрон, и ионизированный атом обычно не могут долго пребывать в таком состоянии и в течение следующих десяти миллиардных долей секунды участвуют в сложной цепи реакций, в результате которых образуются новые молекулы, включая и такие чрезвычайно реакционноспособные, как "свободные радикалы".

Химические изменения. В течение следующих миллионных долей секунды образовавшиеся "свободные радикалы" реагируют как друг с другом, так и с другими молекулами и через цепочку реакций, еще не изученных до конца, могут вызывать химическую модификацию важных в биологическом отношении молекул, необходимых для нормального функционирования клетки.

Биологические эффекты. Биохимические изменения могут произойти как через несколько секунд, так и через десятилетия после облучения и явиться причиной немедленной гибели клеток или таких изменений в них, которые могут привести к раку.

Основную часть облучения население земного шара получает от естественных источников радиации (рис. 1). Большинство из них таковы, что избежать облучения от них совершенно невозможно. На протяжении всей истории существования Земли разные виды излучения падают на поверхность Земли из

космоса и поступают от радиоактивных веществ, находящихся в земной коре, а также полученных человеком в результате его техногенной деятельности.

Человек подвергается облучению двумя способами. Радиоактивные вещества могут находиться вне организма и облучать его снаружи. В этом случае говорят о внешнем облучении. Или же они могут оказаться в воздухе, которым дышит человек, в пище или воде и попасть внутрь организма. Такой способ облучения называют внутренним.

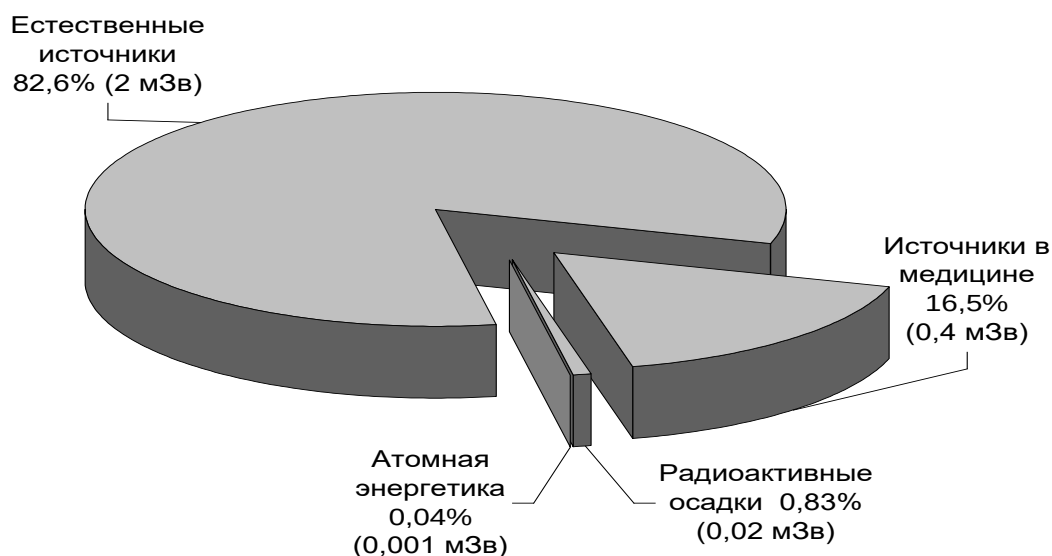


Рис. 1. Источники радиации [7]

Степень радиационного воздействия изотопов, содержащихся в организме человека, определяется создаваемой ими тканевой дозой облучения различных органов и тканей, избирательно накапливающих эти изотопы. Накопление изотопов в организме зависит от скорости их поступления в организм с пищевыми продуктами, водой и воздухом в желудочно-кишечный тракт или легкие, степени усвояемости изотопа из желудочно-кишечного тракта или легких, характера его распределения и времени удержания в организме (табл. 6).

Повреждений, вызванных в живом организме излучением, будет тем больше, чем больше энергии оно передаст тканям (табл. 7).

Биологические и физические константы для некоторых изотопов [5]

Таблица 6

Изотоп	Масса критического органа, г	Периоды полураспада и полу-выведения, дни			Доля изотопа, попадающая в рассматриваемый орган от общего его количества в организме	Доля изотопа, попадающая в рассматриваемый орган при	
		T _{физ}	T _{биол}	T _{эфф}		заглатывании	вдыхании
-1-	-2-	-3-	-4-	-5-	-6-	-7-	-8-
H ³	все тело, 7*10 ⁴	4,5*10 ³	12	12	1,0	0,75	1,0
C ¹⁴	все тело, 7*10 ⁴	2*10 ⁶	10	10	1,0	1,0	0,75
Na ²⁴	все тело, 7*10 ⁴	0,63	11	0,6	1,0	1,0	0,75
P ³²	все тело, 7*10 ⁴	14,3	257	13,5	1,0	0,75	0,63
	кости, 7*10 ³	14,3	1155	14,1	0,21	0,15	0,13
	гол. мозг, 1,5*10 ³	14,3	257	13,5	7·10 ⁻³	5,3·10 ⁻³	4,4·10 ⁻³
K ⁴²	все тело, 7*10 ⁴	0,52	58	0,52	1,0	1,0	0,75
	селезенка, 150	0,52	58	0,52	4·10 ⁻³	4·10 ⁻³	3·10 ⁻³
	гол. мозг, 1,5*10 ³	0,52	58	0,52	0,04	0,04	0,03
	печень, 1,7*10 ³	0,52	58	0,52	0,02	0,02	0,015
Ca ⁴⁵	все тело, 7*10 ⁴	164	16400	162	1,0	0,6	0,55
	кости, 7*10 ³	164	18000	162	0,9	0,54	0,5
Mn ⁵⁶	все тело, 7*10 ⁴	0,11	17	0,11	1,0	0,1	0,3
Fe ⁵⁵	все тело, 7*10 ⁴	1100	800	463	1,0	0,1	0,3
	селезенка, 150	1100	600	388	0,02	0,002	0,006
Fe ⁵⁹	все тело, 7*10 ⁴	45,1	800	42,7	1,0	0,1	0,3
	селезенка, 150	45,1	600	41,9	0,02	0,002	0,006
Co ⁶⁰	все тело, 7*10 ⁴	1900	9,5	9,5	1,0	0,3	0,4
	печень, 1,7*10 ³	1900	9,5	9,5	0,02	0,007	0,02
Ni ⁶⁵	все тело, 7*10 ⁴	0,11	667	0,11	1,0	0,3	0,4
	кости, 7*10 ³	0,11	800	0,11	0,5	0,15	0,2

-1-	-2-	-3-	-4-	-5-	-6-	-7-	-8-
Cu ⁶⁴	все тело, 7*10 ⁴	0,53	80	0,53	1,0	0,28	0,39
	печень, 1,7*10 ³	0,53	150	0,53	0,08	0,02	0,03
	гол. мозг, 1,5*10 ³	0,53	800	0,53	0,01	0,003	0,004
Zn ⁶⁵	все тело, 7*10 ⁴	245	933	194	1,0	0,1	0,3
	кости, 7*10 ³	245	0,001	206	0,16	0,015	0,045
	мышцы, 3*10 ⁴	245	1959	218	0,34	0,03	0,09
Sr ⁹⁰	все тело, 7*10 ⁴	10 ⁴	13000	5700	1,0	0,3	0,4
	кости, 7*10 ³	10 ⁴	18000	6400	0,99	0,09	0,12
Y ⁹⁰	все тело, 7*10 ⁴	2,68	14000	2,68	1,0	0,0001	0,25
	кости, 7*10 ³	2,68	18000	2,68	0,75	7,5·10 ⁻⁵	0,19
J ¹³¹	все тело, 7*10 ⁴	8	138	7,6	1,0	1,0	0,75
	щит. железа., 20	8	138	7,6	0,3	0,3	0,23
Cs ¹³⁷	все тело, 7*10 ⁴	1,1*10 ⁴	70	70	1,0	1,0	0,75
	мышцы, 3*10 ⁴	1,1*10 ⁴	140	138	0,79	0,4	0,3
Ba ¹⁴⁰	все тело, 7*10 ⁴	12,8	65	10,7	1,0	0,05	0,28
	кости, 7*10 ³	12,8	65	10,7	0,7	0,035	0,19
Po ²¹⁰	все тело, 7*10 ⁴	138,4	30	25	1,0	0,06	0,28
	печень, 1,7*10 ³	138,4	41	32	0,22	0,01	0,05
Ra ²²⁶	все тело, 7*10 ⁴	5,9*10 ⁵	8100	900	1,0	0,3	0,4
	кости, 7*10 ³	5,9*10 ⁵	16400	16000	0,99	0,04	0,03
Th ²³²	все тело, 7*10 ⁴	5,1*10 ¹²	57000	57000	1,0	0,0001	0,25
	кости, 7*10 ³	5,1*10 ¹²	73000	73000	0,9	7·10 ⁻⁵	0,18
Th ²³⁴	все тело, 7*10 ⁴	24,1	57000	24,1	1,0	0,0001	0,25
	кости, 7*10 ³	24,1	73000	24,1	0,7	7·10 ⁻⁵	0,18
U ²³⁸	все тело, 7*10 ⁴	1,6*10 ¹²	100	100	1,0	0,0001	0,25
	кости, 7*10 ³	1,6*10 ¹²	300	300	0,85	3,3·10 ⁻⁵	0,083
U ²³⁵	все тело, 7*10 ⁴	2,6*10 ¹¹	100	100	1,0	0,0001	0,25
	кости, 7*10 ³	2,6*10 ¹¹	300	300	0,85	3,3·10 ⁻⁵	0,083
Pu ²³⁹	все тело, 7*10 ⁴	8,9*10 ⁶	65000	64000	1,0	3·10 ⁻⁵	0,25
	кости, 7*10 ³	8,9*10 ⁶	73000	72000	0,9	2,4·10 ⁻⁵	0,2

Эффективная энергия основных радиоактивных изотопов,
передаваемая ткани при каждом акте их распада [5]

Таблица 7

Радиоактивный изотоп	Критический орган	$E_{\Sigma}, \text{МэВ}$
H^3	Все тело	0,01
C^{14}	Все тело, жировая ткань	0,054
	Кости	2,7
Na^{24}	Все тело	2,7
	Легкие	1,5
P^{32}	Все тело,	0,69
	Кости	3,5
Co^{60}	Все тело	1,5
	Легкие, печень	0,72
	Селезенка, почки	0,56
Zn^{65}	Все тело, мышцы	0,32
	Легкие, печень	0,15
	Почки	0,11
	Кости	0,094
Sr^{90}	Все тело, легкие	0,21
	Кости	1,1
Y^{90}	Все тело	0,89
	Легкие	0,87
	Кости	4,4
J^{131}	Все тело	1,6
	Щитовидная железа	0,69
Cs^{137}	Все тело, мышцы	0,59
Ba^{140}	Все тело, мышцы	2,3
	Кости	4,2
Po^{210}	Все тело, легкие, селезенка, почки, печень	55
Ra^{226}	Все тело, кости	110
Th^{232}	Все тело	62
	Кости	270
U^{235}	Все тело, почки, легкие	46
U^{238}	Все тело, легкие, почки	43
	Кости	220
Pu^{239}	Все тело, легкие, печень	53
	Кости	270

1.4. Расчет доз облучения

Тканевую дозу от внешнего γ -излучения радиоактивных изотопов можно определить по величине измеренной ионизации.

Хультковист [10] вывел соотношения для вычисления величины ионизации, создаваемой над поверхностью земли γ -излучением естественных радио-

активных изотопов Ra^{226} , U , Th (в случае равновесия с продуктами их распада) и K , содержащихся в почве (табл. 8).

Данные по ионизации над поверхностью земли [10]

таблица 8

Изотоп	Ионизация, пар ионов/ $см^3 \cdot с$	
	без учета рассеянного излучения *	с учетом многократного рассеяния γ -квантов
Радий-226	$0,6 \cdot 10^{12} C_{Ra}$	$1,26 \cdot 10^{12} C_{Ra}$
Природный уран	$0,2 \cdot 10^6 C_U$	$0,44 \cdot 10^6 C_U$
Торий-232	$0,104 \cdot 10^6 C_{Th}$	$0,21 \cdot 10^6 C_{Th}$
Калий	$48 \cdot C_K$	$91 \cdot C_K$

* C - концентрация радиоактивного изотопа, г/г почвы

Ионизация, создаваемая γ -излучением, и мощность дозы P в воздухе (в Гр/сутки) связаны между собой следующим соотношением:

$$P = \frac{n \cdot 34 \cdot 8,64 \cdot 10^4 \cdot 1,6 \cdot 10^{12} \cdot 770 \cdot 1,12}{10^4} = 4 \cdot 10^{-7} \cdot n \quad (2)$$

где n - число пар ионов, образованных в $1 см^3$ за $1 с$; 34 - величина средней работы ионизации в воздухе для γ -квантов средних энергий, эВ; $8,64 \cdot 10^4$ - число секунд в сутках; $1,6 \cdot 10^{12}$ - число эргов в 1 эВ; 770 - объем, занимаемый 1 г воздуха, $см^3$; 1,12 - множитель перехода от поглощенной дозы в воздухе к поглощенной дозе в ткани (для γ -квантов средних энергий одному рентгену соответствует поглощенная в 1 г воздуха доза $0,88 \cdot 10^{-2}$ Гр, а в 1 г мягких тканей - $0,98 \cdot 10^{-2}$ Гр).

Используя эту зависимость, Хультквист [10] вывел соотношения, позволяющие определить величину мощности поглощенной дозы на поверхности земли в зависимости от концентрации изотопов Ra^{226} , U , Th и K (с учетом рассеянного излучения в почве):

$$\begin{aligned}
P &= 5 \cdot 10^5 \cdot C_{Ra}, \\
P &= 0,176 \cdot C_U, \\
P &= 8,4 \cdot 10^{-2} \cdot C_{Th}, \\
P &= 3,64 \cdot 10^{-5} \cdot C_K,
\end{aligned}
\tag{3}$$

где C_{Ra} , C_U , C_{Th} и C_K - концентрация радиоактивного изотопа в г/г почвы; P - мощность поглощенной дозы в Гр/сут.

Для естественных радиоактивных изотопов Rn и Tn (и продуктов их распада), содержащихся в атмосферном воздухе, при условии их постоянной концентрации по высоте над поверхностью земли мощность поглощенной дозы можно рассчитать, используя соотношения (4), также полученные Хультквистом в предположении, что 60 % аэрозольных частиц, несущих радиоактивность продуктов распада Rn и Tn , задерживаются в легочной ткани. Объем легких принят 3000 см^3 , вес 800 г:

$$\begin{aligned}
P &= 1,05 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{Rn}, \\
P &= 1,03 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{Tn},
\end{aligned}
\tag{4}$$

где P - мощность поглощенной дозы в Гр/сут; Q_{Rn} , Q_{Tn} - концентрация радона и торона в атмосферном воздухе в Бк/л.

В атмосфере постоянно находятся естественные радиоактивные изотопы Rn , Tn и их дочерние продукты, которые непрерывно поступают в легкие человека с вдыхаемым воздухом; в легочной ткани накапливаются дочерние продукты распада Rn и Tn .

Дозы облучения легких, обусловленные излучением Rn и Tn и их дочерних продуктов, находящихся в состоянии радиоактивного равновесия в легких, могут быть вычислены с помощью соотношений [9]:

$$\begin{aligned}
P_{Rn} &= 1,35 \cdot 10^2 Q_{Rn}, \\
P_{Tn} &= 17,97 \cdot 10^2 Q_{Tn},
\end{aligned}
\tag{5}$$

где P_{Rn} , P_{Tn} - мощности доз, создаваемых соответственно радоном и тороном в

мЗв/год ; Q_{Rn} и Q_{Tn} - концентрации радона и торона в воздухе в Бк/л .

Если известны мощность дозы P и время облучения t , то доза от внешнего облучения равна их произведению:

$$D = P t \quad (6)$$

Тканевая доза облучения критического органа, в котором отложилась некоторая доля от попавшего в организм радиоактивного изотопа, может быть вычислена по следующему соотношению:

$$D = \frac{C \cdot k \cdot E_{\Sigma} \cdot 1,6 \cdot 10^{-6} \cdot t}{M \cdot 10^4}, \quad (7)$$

где D - доза облучения критического органа в Гр ; C - активность изотопа, попавшего в организм, в Бк или расп/с ; k - доля изотопа, отложившегося в критическом органе, от его общего количества во всем организме; E_{Σ} - эффективная энергия, передаваемая ткани органа при каждом акте распада радиоактивного изотопа, в МэВ ; t - время облучения критического органа в с ; M - масса критического органа, в г ; $1,6 \cdot 10^{-6}$ - число эргов в 1 МэВ ; 10^4 - число эрг/г на 1 Гр .

Активность радиоактивного препарата, попавшего в организм, можно рассчитать, если известна его масса :

$$C = \frac{\ln 2 \cdot N_o \cdot m}{T_{1/2} \cdot A}, \quad (8)$$

где $N_o = 6,02 \cdot 10^{23}$ - число Авогадро; m - масса изотопа в г ; $T_{1/2}$ - период его полураспада в с ; A - атомная масса изотопа.

Как видно из соотношения (7), доза в органе, в котором содержится радиоактивный изотоп, зависит от массы облучаемого органа, активности изотопа, содержащейся в этом органе, и энергии испускаемых изотопом частиц и γ -квантов, приходящейся на один распад. На получаемую дозу также будет влиять время пребывания радиоактивного изотопа в органе, которое в свою очередь зависит от периода полураспада радионуклида и периода его полувыведения из органа.

По соотношению (7) можно рассчитывать дозу, если концентрация ра-

диоизотопа в критическом органе практически не меняется во времени (период эффективного полувыведения изотопа очень велик), то есть когда изотоп медленно распадается и выводится.

Если концентрация изотопа в критическом органе во времени ощутимо уменьшается из-за биологического выведения и радиоактивного распада, то через время t после окончания поступления изотопа в орган доза будет равна:

$$D = \frac{C \cdot k \cdot E_{\Sigma} \cdot 1,6 \cdot 10^{-6}}{M \cdot 10^4} \cdot \frac{(1 - e^{-\lambda t})}{\lambda}, \quad (9)$$

где λ - постоянная эффективного выведения ($\lambda = \ln 2 / T_{эфф}$) в c^{-1} .

Если доза рассчитывается за достаточно большой промежуток времени, когда практически весь радиоактивный изотоп удалится из организма, то необходимо использовать следующее соотношение:

$$D = \frac{C \cdot k \cdot E_{\Sigma} \cdot 1,6 \cdot 10^{-6}}{M \cdot 10^4} \cdot \frac{1}{\lambda}. \quad (10)$$

1.5. Предельно допустимые уровни облучения

Предельно допустимые дозы внешнего и внутреннего облучения регламентируются Нормами радиационной безопасности (НРБ-99/2009) и приведены в таблице 9.

таблица 9

Нормируемые величины	Дозовые пределы, мЗв/год		
	персонал категории А*	персонал категории Б**	население
Эффективная доза	50	12,5	5
Эквивалентная доза в			
1) хрусталике глаза, кроветворных органах, гонадах	150	37,5	15
2) коже, щитовидной железе, костях, легких, печени, почках, мышцах и др.	500	125	50
3) кистях и стопах	500	125	50

* лица, работающие непосредственно с источниками ионизирующих излучений,

** лица, работающие в помещениях, смежных с помещениями, в которых ведутся работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений, но не занятых непосредственно работой с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений.

Для студентов и учащихся в возрасте до 21 года, проходящих обучение с использованием источников ионизирующего излучения, годовые накопленные дозы не должны превышать значений, установленных для населения.

2. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

2.1. Определение предельно допустимого времени пребывания на различных расстояниях от источника гамма-излучения

Задание

а) Предварительно отградуированным радиометром измерить мощность экспозиционной дозы на различных расстояниях от источника гамма-излучения Ra^{226} (3,7 МБк).

б) По результатам эксперимента найти предельно допустимое время пребывания на различных расстояниях от источника излучения.

в) Рассчитать теоретически предельно допустимое время пребывания на различных расстояниях от данного источника излучения.

г) Сравнить экспериментальные результаты и теоретические расчеты. Сделать выводы.

Материалы и оборудование

1. Отградуированный радиометр типа СРП-68-01 или СРП-88-01.
2. Радиоизотопный источник Ra^{226} (эталон С-41; 0,1 мг Ra; 3,7 МБк).
3. Калькулятор, миллиметровка, карандаш, резинка, линейка.

Порядок выполнения работы

а) Радиометр установить в 10-ти положениях на различных расстояниях от источника Ra^{226} и измерить мощность экспозиционной дозы P . Расстояние изменять от 0,1 до 1 м с шагом 0,1 м. Для перемещения источника использовать дистанционный инструмент.

б) Рассчитать предельно допустимое время пребывания на различных расстояниях от источника излучения по формуле:

$$t_{max} = \frac{D_{np}}{P}, \quad (11)$$

где D_{np} - предельно допустимая доза за один рабочий день при пятидневной рабочей неделе (для персонала – 0,2 мГр, для населения – 0,02 мГр), P - мощность поглощенной дозы в мГр/ч ($1 \text{ мГр/ч} = 1,13 \cdot 10^5 \text{ мкР/ч}$).

Результаты замеров и последующих расчетов занести в таблицу:

Расстояние R , м	Мощность дозы P		t_{max} , ч	$t_{max}^{теор}$, ч
	в мкР/ч	в мГр/ч		
1	2	3	4	5

в) Теоретически рассчитать предельно допустимое время пребывания на различных расстояниях от источника излучения по формуле:

$$t_{max}^{теор} = \frac{D_{np}}{84} \cdot R^2, \quad (12)$$

где D_{np} - предельно допустимая доза за один рабочий день при пятидневной рабочей неделе (для персонала – 0,2 мГр, для населения – 0,02 мГр), 84 – постоянная источника Ra^{226} типа С-41, R – расстояние до источника излучения в м.

Результаты теоретических расчетов занести в таблицу.

г) По экспериментальным данным и теоретическим расчетам на одних координатных осях построить графики зависимости $t_{max} = f(R)$ и $t_{max}^{теор} = f(R)$ для персонала и населения (рис.2).

д) Сделать выводы. Объяснить, почему кривая $t_{max} = f(R)$ лежит ниже теоретически рассчитанной кривой $t_{max}^{теор} = f(R)$ или почему теоретически рассчитанное время пребывания возле источника больше найденного экспериментально.

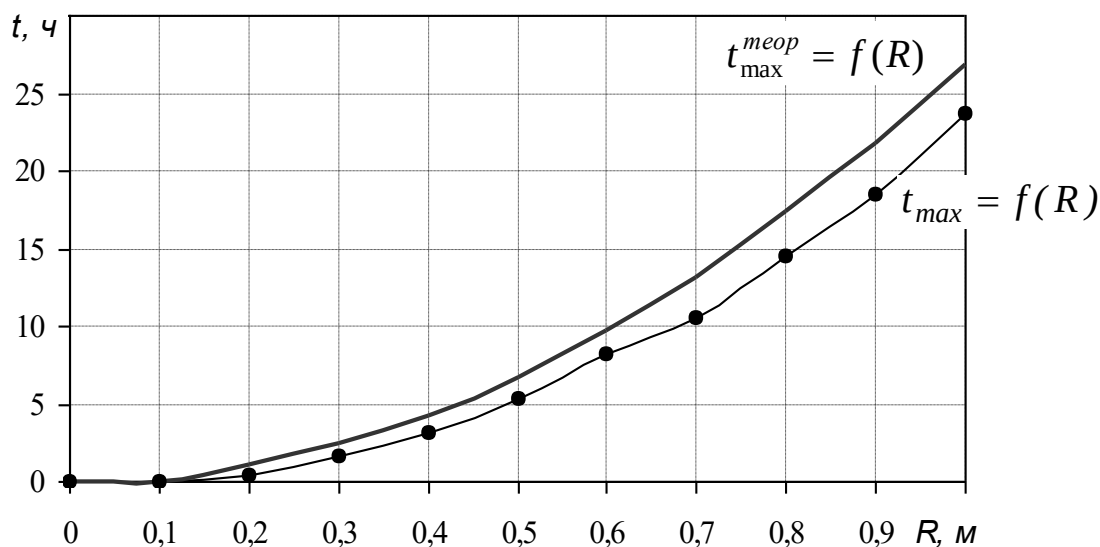


Рис. 2. Образец оформления графиков зависимости $t_{\max} = f(R)$ и $t_{\max}^{\text{теор}} = f(R)$.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение экспозиционной дозы.
2. Дайте определение поглощенной дозы.
3. Какова связь между мкР и мГр ?
4. Какова связь между дозой и мощностью дозы ?
5. Как зависит доза от расстояния между источником ионизирующего излучения и детектором ?
6. Как зависит доза от времени пребывания возле источника ?
7. Как влияет рассеянное гамма-излучение источника на дозу внешнего облучения ?

Содержание отчета

1. Краткое изложение основных теоретических положений.
2. Порядок выполнения измерений и расчетов.
3. Результаты измерений и расчетов.
4. Графики зависимости $t_{\max} = f(R)$ и $t_{\max}^{\text{теор}} = f(R)$ для персонала и населения.
5. Выводы.

2.2. Определение дозы внутреннего облучения при попадании радиоактивного вещества внутрь организма

Задание

а) Познакомиться с основными теоретическими положениями при расчете тканевых доз облучения.

б) По заданному преподавателем варианту условий рассчитать дозу внутреннего облучения от радиоактивного вещества, попавшего внутрь организма, за период, равный времени полного выведения радионуклида из организма. При расчете пользоваться справочными данными табл. 6 и табл. 7.

в) Сделать выводы о последствиях внутреннего облучения всего организма или отдельных органов данным радиоактивным веществом.

г) Варианты условий расчета дозы внутреннего облучения

таблица 10

Вариант задания	Радиоактивный изотоп, попавший внутрь организма	Количество радиоактивного изотопа, г	Орган или ткань организма для расчета дозы
-1-	-2-	-3-	-4-
1	H ³	10 ⁻⁶	все тело
2	C ¹⁴	10 ⁻⁶	все тело
3	Na ²⁴	10 ⁻⁹	все тело
4	P ³²	10 ⁻⁹	все тело
5	P ³²	10 ⁻⁹	кости
6	Co ⁶⁰	10 ⁻⁹	все тело
7	Co ⁶⁰	10 ⁻⁹	печень
8	Zn ⁶⁵	10 ⁻⁹	все тело
9	Zn ⁶⁵	10 ⁻⁹	кости
10	Zn ⁶⁵	10 ⁻⁹	мышцы
11	Sr ⁹⁰	10 ⁻⁹	все тело
12	Sr ⁹⁰	10 ⁻⁹	кости
13	Y ⁹⁰	10 ⁻⁹	все тело
14	Y ⁹⁰	10 ⁻⁹	кости
15	J ¹³¹	10 ⁻⁹	все тело
16	J ¹³¹	10 ⁻⁹	щитовидная железа
17	Cs ¹³⁷	10 ⁻⁹	все тело
18	Cs ¹³⁷	10 ⁻⁹	мышцы
19	Ba ¹⁴⁰	10 ⁻⁹	все тело

-1-	-2-	-3-	-4-
20	Ba ¹⁴⁰	10 ⁻⁹	кости
21	Po ²¹⁰	10 ⁻⁹	все тело
22	Po ²¹⁰	10 ⁻⁹	печень
23	Ra ²²⁶	10 ⁻⁹	все тело
24	Ra ²²⁶	10 ⁻⁹	кости
25	Th ²³²	10 ⁻⁹	все тело
26	Th ²³²	10 ⁻⁹	кости
27	U ²³⁵	10 ⁻⁹	все тело
28	U ²³⁵	10 ⁻⁹	кости
29	U ²³⁸	10 ⁻⁹	все тело
30	U ²³⁸	10 ⁻⁹	кости
31	Pu ²³⁹	10 ⁻⁹	все тело
32	Pu ²³⁹	10 ⁻⁹	кости

Материалы и оборудование

1. Справочная информация из табл. 6 и 7 настоящего методического пособия.
2. Калькулятор.

Порядок выполнения работы

а) По формуле (8) рассчитать активность радиоактивного препарата, попавшего в организм.

б) Если изотоп медленно распадается и выводится, и концентрация радиоизотопа в критическом органе или всем теле практически не меняется во времени, то есть когда период эффективного полувыведения изотопа очень велик (см. табл. 6), то при расчете дозы использовать формулу 7. Время t принять равным времени полного выведения радионуклида из организма, то есть $t = T_{эфф}/\ln 2$

Если концентрация изотопа в критическом органе или всем теле ощутимо уменьшается во времени вследствие биологического выведения и радиоактивного распада, то при расчете дозы использовать формулу 9, также приняв время t равным $T_{эфф}/\ln 2$.

в) Сделать выводы об опасности либо безопасности рассчитанной дозы и возможных последствиях.

Контрольные вопросы

1. Как влияет период полураспада и атомная масса радионуклида на величину его активности ?
2. Как влияет масса критического органа или ткани человека на величину поглощенной дозы ?
4. Как влияет время пребывания радионуклида в критическом органе или ткани человека на величину поглощенной дозы ?
5. Как влияет энергия частиц, излучаемых радионуклидом, на величину поглощенной дозы ?
6. От чего зависит период эффективного полувыведения радионуклида из организма ?
7. Если период полураспада радионуклида велик, а период его биологического полувыведения из организма мал, то каков будет период эффективного полувыведения радионуклида ? Почему ?
8. Если период полураспада радионуклида мал, а период его биологического полувыведения из организма велик, то каков будет период эффективного полувыведения радионуклида ? Почему ?

Содержание отчета

1. Краткое изложение основных теоретических положений.
2. Порядок выполнения расчетов.
3. Результаты расчетов.
4. Выводы.

2.3. Определение дозы внешнего облучения при работе на территориях с повышенной радиоактивностью

Задание

- а) Рассчитать дозу внешнего облучения оператора-радиометриста, выполняющего профильную спектрометрическую гамма-съемку в зоне уран-тори-

евого оруденения (рудное тело выходит на дневную поверхность). Скорость перемещения оператора по профилю – 3 км/ч. Время измерений на точке – 2 мин. Расстояние между точками измерений – 50 м. Исходными данными для расчета считать результаты измерений концентрации урана, тория и калия по профилю (табл. 11).

б) Построить графики распределения по профилю концентрации урана, тория, калия и суммарной мощности поглощенной дозы (рис. 3).

в) Сравнить рассчитанную дозу с дозовым пределом для населения (табл.9). Оценить возможность работы оператора в данных условиях в течение месяца при условии, что рабочий день составляет 8 часов. Дать объяснения.

г) Варианты условий расчета:

таблица 11

№ пи- кета	Вариант 1			Вариант 2			Вариант 3			Вариант 4		
	C _u , %	C _{Th} , %	C _k , %	C _u , %	C _{Th} , %	C _k , %	C _u , %	C _{Th} , %	C _k , %	C _u , %	C _{Th} , %	C _k , %
1	0,01	0,02	1,28	0,01	0,02	1,69	0,01	0,02	2,07	0,00	0,02	2,07
2	0,01	0,02	1,28	0,01	0,02	1,68	0,01	0,02	2,06	0,01	0,02	2,06
3	0,02	0,02	1,36	0,02	0,01	1,70	0,02	0,04	2,07	0,02	0,04	2,07
4	0,09	0,10	1,4	0,09	0,03	1,90	0,09	0,17	1,90	0,04	0,17	1,90
5	0,40	0,17	1,35	0,4	0,28	2,10	0,15	0,37	2,10	0,07	0,37	1,97
6	0,60	0,27	1,34	0,74	0,46	2,16	0,32	0,63	2,16	0,19	0,63	2,06
7	0,70	0,33	1,30	1,20	0,54	2,40	0,38	0,71	2,40	0,38	0,71	2,14
8	1,20	0,35	1,43	1,39	0,55	2,17	0,29	0,55	2,17	0,61	0,87	2,17
9	1,50	0,37	1,72	1,08	0,45	2,53	0,13	0,37	2,21	0,69	1,13	2,21
10	1,00	0,34	1,80	0,58	0,34	2,19	0,68	0,96	2,19	0,87	1,26	2,29
11	0,50	0,36	1,54	0,50	0,36	2,07	1,00	1,36	2,36	0,99	1,45	2,36
12	0,60	0,57	1,46	0,60	0,35	1,97	0,90	1,53	2,19	0,90	1,35	2,19
13	0,70	0,82	1,42	0,53	0,29	1,83	0,65	1,16	2,07	0,65	1,16	2,07
14	0,90	1,00	1,35	0,39	0,27	1,80	0,47	0,75	2,03	0,47	0,75	2,03
15	0,40	0,50	1,35	0,30	0,20	1,74	0,30	0,48	1,98	0,30	0,48	2,04
16	0,20	0,30	1,32	0,20	0,13	1,67	0,11	0,196	1,90	0,11	0,20	2,02
17	0,10	0,20	1,35	0,10	0,06	1,75	0,05	0,08	1,91	0,07	0,08	1,97
18	0,04	0,08	1,34	0,04	0,03	1,60	0,03	0,03	1,82	0,04	0,03	1,92
19	0,02	0,01	1,35	0,02	0,01	1,64	0,02	0,01	1,94	0,02	0,01	1,99
20	0,01	0,01	1,40	0,01	0,01	1,64	0,01	0,01	1,98	0,01	0,01	2,06

продолжение таблицы 11

№ пи- кета	Вариант 5			Вариант 6			Вариант 7			Вариант 8		
	$C_U, \%$	$C_{Th}, \%$	$C_K, \%$	$C_U, \%$	$C_{Th}, \%$	$C_K, \%$	$C_U, \%$	$C_{Th}, \%$	$C_K, \%$	$C_U, \%$	$C_{Th}, \%$	$C_K, \%$
1	0,00	0,02	1,79	0,00	0,02	2,14	0,00	0,02	2,14	0,02	0,02	2,05
2	0,04	0,02	1,88	0,03	0,02	2,12	0,02	0,02	2,12	0,02	0,02	2,04
3	0,02	0,04	1,86	0,02	0,04	2,02	0,02	0,00	2,02	0,02	0,01	2,02
4	0,04	0,04	1,90	0,20	0,04	2,02	0,04	0,06	2,02	0,09	0,01	2,02
5	0,07	0,17	1,97	0,27	0,09	2,12	0,07	0,15	2,12	0,39	0,03	2,12
6	0,18	0,45	2,06	0,28	0,10	2,18	0,18	0,22	2,18	0,59	0,08	2,36
7	0,38	0,65	2,20	0,38	0,07	2,29	0,29	0,4	2,29	0,29	0,16	2,29
8	0,29	0,85	2,23	0,52	0,1	2,36	0,52	0,61	2,36	0,92	0,36	2,23
9	0,77	1,08	2,30	0,77	0,53	2,40	0,94	0,98	2,65	1,60	0,64	2,55
10	0,89	1,20	2,35	0,89	0,12	2,35	1,80	1,52	2,85	2,18	0,83	2,96
11	0,30	0,26	2,10	0,64	0,07	2,23	0,87	1,13	2,59	1,10	0,55	2,59
12	0,90	0,15	2,19	0,54	0,15	2,19	0,30	0,57	2,42	0,30	0,11	2,42
13	0,65	0,06	2,13	0,60	0,10	2,13	0,18	0,32	2,37	0,12	0,07	2,37
14	0,14	0,04	2,03	0,39	0,06	2,10	0,28	0,92	2,21	0,07	0,03	2,21
15	0,30	0,04	2,04	0,30	0,04	2,10	0,13	0,36	2,28	0,04	0,07	2,10
16	0,11	0,02	2,02	0,11	0,01	2,11	0,04	0,13	2,11	0,04	0,01	2,00
17	0,02	0,01	2,04	0,03	0,01	2,12	0,03	0,04	2,12	0,03	0,02	1,97
18	0,04	0,03	2,07	0,04	0,01	2,16	0,01	0,02	2,07	0,04	0,01	2,07
19	0,02	0,01	2,12	0,02	0,01	2,12	0,02	0,05	2,12	0,02	0,03	2,05
20	0,01	0,01	2,06	0,01	0,01	2,06	0,01	0,01	2,06	0,01	0,01	2,15

Материалы и оборудование

1. Справочная информация из таблицы 9 настоящего методического пособия.
2. Калькулятор, миллиметровка, карандаш, резинка, линейка.

Порядок выполнения работы

а) Используя соотношения (3) рассчитать мощности поглощенных доз P_U , P_{Th} , P_K на поверхности земли в зависимости от концентрации изотопов U , Th и K . Следует иметь в виду, что в приведенных соотношениях концентрации радиоактивных изотопов C_U , C_{Th} и C_K представлены в г/г почвы, а мощности поглощенных доз P получают в Гр/сут. Чтобы C_U , C_{Th} и C_K подставлять в %, а P получать в Гр/ч, необходимо правую часть равенств умножить на 10^{-2} ($1 \% = 10^{-2}$ г/г) и разделить на 24 (1 сут. = 24 ч.):

$$\begin{aligned}
 P_U &= 7,33 \cdot 10^{-5} \cdot C_U, \\
 P_{Th} &= 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot C_{Th}, \\
 P_K &= 1,52 \cdot 10^{-8} \cdot C_K
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Чтобы мощности поглощенных доз выразить в мГр/ч. , следует полученные значения P_U, P_{Th}, P_K умножить на 10^3 .

б) Общую мощность поглощенной дозы в i -той точке профиля от ионизирующего действия γ -излучений U (и продуктов его распада), Th (и продуктов его распада) и K , содержащихся в почве, находят суммированием:

$$P_{\Sigma i} = P_{Ui} + P_{Thi} + P_{Ki} . \tag{13}$$

Распределения по профилю концентрации урана, тория, калия и суммарной мощности поглощенной дозы вынести на график, образец оформления которого представлен на рис.3.

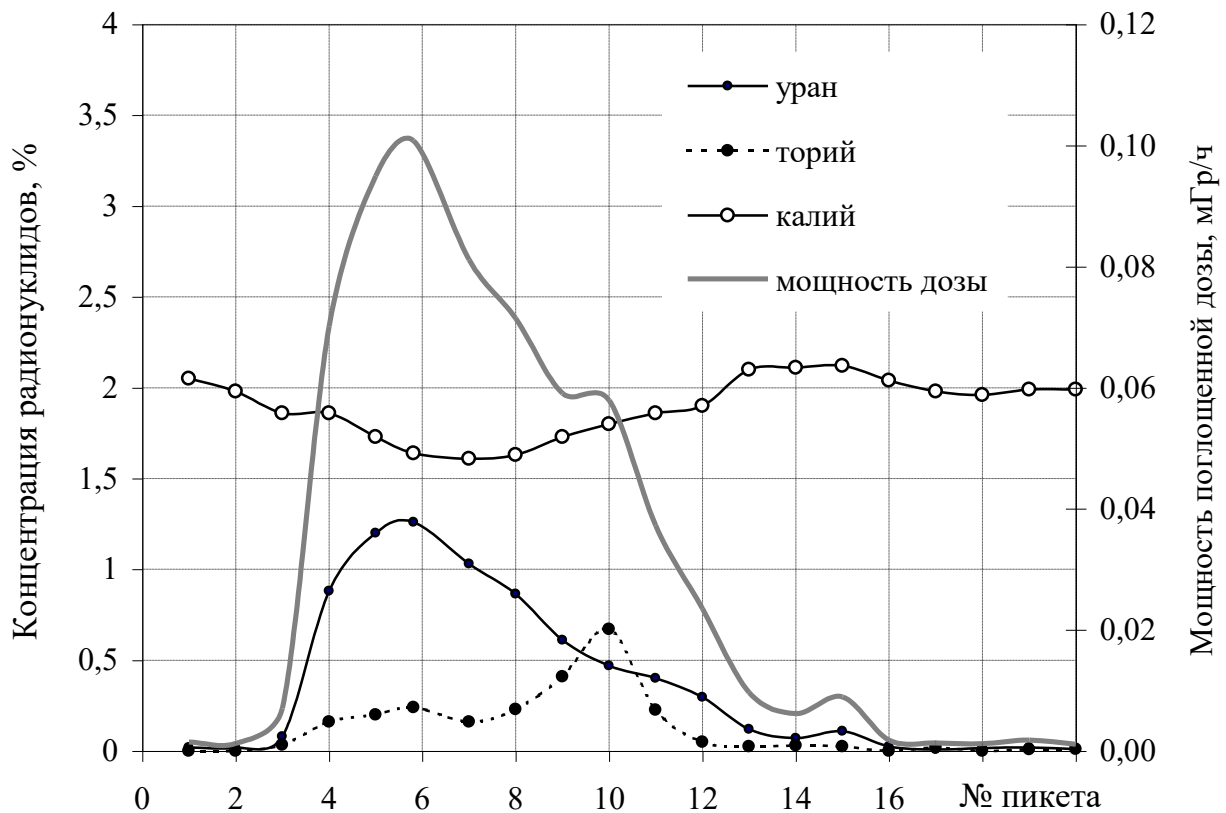


Рис. 3. Образец оформления графиков распределения по профилю концентрации урана, тория, калия и суммарной мощности поглощенной дозы

в) Величину поглощенной дозы находят

$$D = \sum_{i=1}^n P_{\Sigma i} \cdot t_i, \quad (14)$$

где $P_{\Sigma i}$ - общая мощность поглощенной дозы в i -той точке профиля; t_i - время пребывания в i -той точке профиля (с учетом времени перехода от одной точки к другой).

Контрольные вопросы

1. Как связаны между собой величина ионизации, создаваемая γ -излучением, и мощность поглощенной дозы ?
2. Как связаны между собой доза и мощность дозы ?
3. Как оценить возможное время пребывания в условиях повышенного гамма-фона, если известна мощность экспозиционной или поглощенной дозы ?
4. В каких единицах измеряют поглощенную дозу и мощность поглощенной дозы ?
5. Какой из изотопов U , Th или K вносит наибольший вклад в суммарную мощность поглощенной дозы ? Почему ?

Содержание отчета

1. Краткое изложение основных теоретических положений.
2. Порядок выполнения расчетов.
3. Графики распределения по профилю концентрации урана, тория, калия и суммарной мощности поглощенной дозы.
4. Результаты расчета величины поглощенной дозы оператором-радиометристом.
5. Выводы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Герфорд Л., Кох Х., Хюбнер К.* Практикум по радиоактивности и радиохимии: пер. с нем. – М.: Мир, 1984.
2. *Голубев В.П.* Дозиметрия и защита от ионизирующих излучений - М.: Энергоатомиздат, 1986.
3. *Гусев Н.Г.* Защита от ионизирующих излучений. Том 1. Физические основы защиты от излучений – М.: Энергоатомиздат, 1989.
4. *Краткий справочник инженера-физика..* Ядерная физика. Атомная физика / Под ред. Федорова Н.Д. – М.: Госатомиздат, 1961.
5. *Моисеев А.А., Иванов В.И.* Краткий справочник по радиационной защите и дозиметрии. – М.: Атомиздат, 1964.
6. *Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)* – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009.-100 с.
7. *Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)* - М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. – 83 с.
8. *Радиация. Дозы, эффекты, риск:* пер. с англ. – М.: Мир, 1990.
9. *Холл Э. Дж.* Радиация и жизнь: пер. с англ. – М.: Медицина, 1989.
10. *Хультквист Б.* Ионизирующее излучение естественных источников: пер. с англ. – М.: Изд-во иностр. лит., 1959.

Учебное издание

Александрова Жанна Николаевна

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Учебно-методическое пособие
к практическим занятиям и самостоятельной работе
по дисциплине «Радиационная безопасность» для студентов
специализаций «Геофизические методы исследования скважин» и
«Геофизические методы поисков и разведки МПИ»
специальности 21.05.03 – «Технология геологической разведки»
очной и заочной формы обучения

Часть 1

Расчет доз внешнего и внутреннего облучения

Редактор _____
Компьютерная верстка автора

Подписано в печать ____ . ____ . 2018 г.
Бумага писчая. Формат 60 x 84 1/16.
Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Печ. л. _____. Уч.-изд. л. _____. Тираж 100. Заказ _____

Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Уральский государственный горный университет
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебно-методическому

комитету
С.А. Уиоров



**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

Специальность:

21.05.03 Технология геологической разведки

форма обучения: очная, заочная

Автор: Александрова Ж. Н.

Екатеринбург

2020



0

ФГБОУ ВО

**«Уральский государственный горный
университет»**

Ж. Н. Александрова

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Учебно-методическое пособие
к практическим занятиям и самостоятельной работе
по дисциплине «Радиационная безопасность» для студентов
специализаций «Геофизические методы исследования скважин» и
«Геофизические методы поисков и разведки МПИ»
специальности 21.05.03 Технология геологической разведки
очной и заочной формы обучения

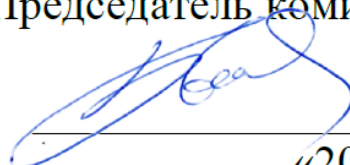
Часть 2

Реабилитация радиоактивно загрязненных территорий

**Екатеринбург
2020**

Федеральное агентство по образованию
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

ОДОБРЕНО
методической комиссией
факультета геологии и геофизики
Председатель комиссии



В. И. Бондарев
«20» марта 2020 г.

Ж. Н. Александрова

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Учебно-методическое пособие
к практическим занятиям и самостоятельной работе
по дисциплине «Радиационная безопасность» для студентов
специализаций «Геофизические методы исследования скважин» и
«Геофизические методы поисков и разведки МПИ»
специальности 21.05.03 Технология геологической разведки
очной и заочной формы обучения

Часть 2
Реабилитация радиоактивно загрязненных территорий

Рецензент: Щапов В.А., старший научный сотрудник
Института геофизики УрО РАН, д-р геол.-мин. наук

Александрова Ж.Н.

- А46 Лабораторный практикум по радиационной безопасности: учебно-методическое пособие к практическим занятиям и самостоятельной работе по дисциплине "Радиационная безопасность" для студентов специализаций «Геофизические методы исследования скважин» и «Геофизические методы поисков и разведки МПИ» специальности 21.05.03 – «Технология геологической разведки» очной и заочной формы обучения; Часть 2. Реабилитация радиоактивно загрязненных территорий / Ж. Н. Александрова; Уральский гос. горный ун-т. – Екатеринбург: изд-во УГГУ, 2020. – 26 с.

В учебно-методическом пособии дан краткий обзор существующих способов реабилитации радиоактивно загрязненных территорий, приведены приближенная теория и сведения о практическом применении ботанической реабилитации зараженных почв. Пособие содержит руководства к выполнению двух лабораторных работ по изучению распределения радионуклидов в почвах Чернобыльского следа и факторов перехода радионуклида Cs^{137} из почв в растения.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся специализациям «Геофизические методы исследования скважин» и «Геофизические методы поисков и разведки МПИ» по специальности «Технология геологической разведки».

© Александрова Ж.Н., 2020

© Уральский государственный
горный университет, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. БОТАНИЧЕСКАЯ РЕАБИЛИТАЦИЯ РАДИОАКТИВНО ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ	5
1.1. Краткий обзор существующих способов дезактивации радиоактивно загрязненных территорий	5
1.2. Теория ботанической реабилитации	6
1.2.1. Предпосылки к применению метода ботанической реабилитации ..	6
1.2.2. Основные количественные соотношения	11
1.2.3. Оценка сроков реабилитации	13
1.2.4. Понятие о факторе ботанической реабилитации и способы его количественной оценки	15
1.3. Практическое применение ботанической реабилитации	16
2. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ	20
2.1. Изучение распределения радионуклида Cs^{137} в почвах Чернобыльского следа	20
Задание	20
Материалы и оборудование	20
Порядок выполнения работы	20
Контрольные вопросы	22
Содержание отчета	22
2.2. Определение факторов перехода радионуклида Cs^{137} из почв в растения ..	
Задание	23
Материалы и оборудование	24
Порядок выполнения работы	24
Контрольные вопросы	25
Содержание отчета	25
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	26

ВВЕДЕНИЕ

В течение последних десятилетий в биосфере нашей планеты появились новые компоненты - искусственно синтезированные человеком радиоактивные изотопы. Загрязнение биосферы радиоактивными материалами связано с быстрым ростом атомной промышленности и увеличением применения энергии расщепленного ядра атома.

Проблема радиоактивного загрязнения биосферы привлекает внимание широкого круга специалистов: медиков, биофизиков, геофизиков, радиоэкологов, так как стала очевидна возможная опасность серьезных последствий, вызванных действием на живые организмы ионизирующих излучений, источником которых являются рассеиваемые в природе радиоактивные изотопы.

Особую актуальность эти проблемы приобретают в случае аварийных ситуаций, связанных с выбросами радиоактивных веществ в атмосферу. Такие случаи могут приводить к выведению из сельскохозяйственного оборота больших площадей, где будет невозможно проживание людей и получение продукции, отвечающей нормативным требованиям.

Многие радиоактивные вещества, образующиеся в результате деления тяжелых ядер, играют важную роль в биотическом цикле, в том числе долгоживущие радиоактивные изотопы (например, Sr^{90} и Cs^{137} с периодами полураспада соответственно 28 и 30 лет), так как растворимы в воде и могут участвовать в пищевой цепочке человека. Они активно поглощаются растениями из зараженного почвенного слоя и попадают в продукты питания как растительного, так и животного происхождения.

Повышение уровня радиоактивности в сельском хозяйстве в результате радиоактивного загрязнения почв после выпадения радиоосадков и других возможных причин загрязнения почвенного покрова указывает на необходимость дезактивационных мероприятий, целью которых является исключение неблагоприятных последствий распространения радиоактивных продуктов в природе.

1. БОТАНИЧЕСКАЯ РЕАБИЛИТАЦИЯ РАДИОАКТИВНО ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

1.1. Краткий обзор существующих способов дезактивации радиоактивно загрязненных территорий

В настоящее время в качестве способов дезактивации загрязненных радионуклидами почв используются механические и химические способы [5], а также пассивное ожидание уменьшения радиационного фона за счет естественного распада радионуклидов.

Механическая дезактивации почвы осуществляется путем удаления верхнего слоя почвы с последующим его захоронением на специально отведенных территориях, либо путем глубокой вспашки, в результате которой верхний горизонт сбрасывается ниже границы корнеобитаемого слоя, а более глубокие горизонты переносятся на дневную поверхность [5]. Указанные приемы существенно снижают плодородие почв, так как они связаны с удалением поверхностного, наиболее плодородного слоя почвы или захоронением этого слоя на глубину. На естественное восстановление изъятых слоев почвы, в зависимости от климатических условий, требуются многие десятки и даже сотни лет [4]. Кроме того, механическая дезактивация абсолютно не пригодна для песчаных почв с тонким плодородным слоем, как, например, в Белоруссии, поскольку ее осуществление может привести к невозможности дальнейшего сельскохозяйственного использования таких территорий. Другим ограничивающим фактором для применения механической дезактивации является трудность, связанная с транспортировкой большой снятой массы почвы и организацией специальных "могильников". Здесь возникают проблемы ветровой эрозии и загрязнения грунтовых и питьевых вод.

При химической дезактивации почв предлагается проводить выщелачивание радиоактивных изотопов Cs^{137} и Sr^{90} с помощью химических агентов. Однако применение этой технологии связано с проблемой выбора химического агента. Невозможно подобрать такой агент, который действовал бы только на

атомы Cs^{137} и Sr^{90} , поскольку в системе почва - почвенный раствор будут всегда находиться различные соединения других элементов, которые так же, как соединения Cs^{137} и Sr^{90} , будут вступать в реакции с этим агентом. Применение химических соединений может ухудшать физические и химические свойства почв и приводить их в состояние, когда нормальная жизнедеятельность растений будет затруднена или исключена вовсе. Кроме того, химическое выщелачивание опасно применять на территориях с неглубоким уровнем грунтовых вод, так как это может привести к загрязнению последних.

Пассивное ожидание снижения уровня радиоактивности за счет естественного распада изотопов Cs^{137} и Sr^{90} предусматривает исключение загрязненных территорий из сельскохозяйственного использования и может растянуться, в зависимости от степени загрязнения, на сотни лет, так как указанные радионуклиды имеют большие периоды полураспада. Активность изотопов до безопасных пределов в 1000 раз уменьшается за десять периодов.

Таким образом, возникает необходимость в такой технологии дезактивации, которая была бы лишена отмеченных недостатков - не наносила бы экологического ущерба почвам и другим экосистемам и позволяла бы сократить сроки их реабилитации. Указанных недостатков лишена ботаническая дезактивация радиоактивно загрязненных территорий.

1.2. Теория ботанической реабилитации

1.2.1. Предпосылки к применению метода ботанической реабилитации

О способности растений накапливать различные химические элементы известно давно. Еще древние римляне предполагали, что растительный покров отражает до некоторой степени характер подпочвы. Взаимосвязь между растительностью и ее подпочвой использовали рудоискатели Европы и Китая уже 400 лет назад при поисках месторождений.

Русский геолог Карпинский А.М. [3] был одним из первых, кто установил, что отдельные ассоциации растений существуют на отличительных под-

почвах, таких как песчаники, глины, известняки и т.д., и что распределение растительного покрова может быть использовано для характеристики геологических особенностей района. Его классические работы в конечном итоге служат введением в геоботанику индикаторов, которая стала изучать растительный покров и его разновидности, указывающие на условия окружающей среды.

Способность растений по-разному аккумулировать химические элементы можно использовать в практических целях для очищения загрязненных территорий от радиоактивных продуктов деления с помощью отчуждения выращенной растительной массы и последующей ее утилизации.

Эффективность технологии фитодезактивации загрязненных территорий зависит от ряда факторов: используемых видов растительности, их морфобиологических особенностей, длительности вегетационного периода, а также от свойств дезактивируемых почв и применяемых агрохимических и агротехнических приемов, которые позволяли бы усиливать поступление радионуклидов из почв в растения, то есть управлять выносом радиоактивных элементов [3].

Существует несколько возможностей управления переходом радиоизотопов из почв в растения: 1) использование растений-гипераккумуляторов радиоактивных элементов, 2) стимуляция роста растений-гипераккумуляторов для получения наибольшей биомассы, 3) улучшение доступности радионуклидов для корневого питания растений

Способность растений накапливать радиоактивные элементы оценивается по факторам перехода радионуклида из почв в растения [2].

Фактор перехода (доля радиоактивности, переходящая из загрязненной почвы в зеленую массу растения) представляет собой следующее отношение:

$$\varphi_{ij} = \frac{A_{ij}}{A_i}, \quad (1)$$

где A_{ij} - удельная активность [Бк/кг] i -го радионуклида в j -ом растении; A_i - удельная активность [Бк/кг] i -го радионуклида в почве.

В таблице 1 приведены экспериментально установленные величины фак-

торов перехода радионуклида Cs^{137} для некоторых растений локального участка Чернобыльского следа [1], среди которых как культурные (*рожь посевная*, *клевер белый*, *клевер луговой красный*, *люцерна* и др.), так и дикие представители флоры. Растения ранжированы в порядке убывания их факторов перехода.

таблица 1

	Название растения	Φ , отн.ед.		Название растения	Φ , отн.ед.
1	<i>Кипрей болотный</i>	0,671	34	<i>Повой заборный</i>	0,040
2	<i>Очиток пурпурный</i>	0,244	35	<i>Будра плющевидная</i>	0,039
3	<i>Осока острая</i>	0,242	36	<i>Крестовник луговой</i>	0,035
4	<i>Шлемник обыкновенный</i>	0,230	37	<i>Зверобой продырявленный</i>	0,034
5	<i>Мышиный горошек</i>	0,221	38	<i>Астрагал болотный</i>	0,034
6	<i>Жерушник</i>	0,208	39	<i>Вербейник обыкновенный</i>	0,034
7	<i>Горец земноводный</i>	0,208	40	<i>Вязель пестрый</i>	0,034
8	<i>Язвенник Линнея</i>	0,199	41	<i>Донник желтый</i>	0,034
9	<i>Черёда трехраздельная</i>	0,194	42	<i>Пижма обыкновенная</i>	0,031
10	<i>Клевер белый</i>	0,168	43	<i>Поручейник широколистный</i>	0,030
11	<i>Двукисточник тростниковый</i>	0,147	44	<i>Дрок красильный</i>	0,029
12	<i>Дудник обыкновенный</i>	0,146	45	<i>Болиголов пятнистый</i>	0,029
13	<i>Горичник Любименко</i>	0,129	46	<i>Девясил британский</i>	0,026
14	<i>Чистец болотный</i>	0,116	47	<i>Полынь обыкновенная</i>	0,024
15	<i>Люттик ползучий</i>	0,113	48	<i>Льнянка обыкновенная</i>	0,022
16	<i>Чахотная трава</i>	0,109	49	<i>Марь белая</i>	0,022
17	<i>Папоротник мужской</i>	0,104	50	<i>Щавель конский</i>	0,021
18	<i>Вероника длиннолистная</i>	0,098	51	<i>Кострец безостый</i>	0,020
19	<i>Хвоц приречный</i>	0,090	52	<i>Подмаренник мягкий</i>	0,019
20	<i>Дербенник иволистный</i>	0,089	53	<i>Одуванчик лекарственный</i>	0,017
21	<i>Люцерна хмелевидная</i>	0,082	54	<i>Луговик дернистый</i>	0,016
22	<i>Донник белый</i>	0,072	55	<i>Марь узколистная</i>	0,016
23	<i>Звездчатка злаковая</i>	0,069	56	<i>Лопух большой</i>	0,016
24	<i>Клевер луговой красный</i>	0,064	57	<i>Цикорий обыкновенный</i>	0,015
25	<i>Икотник серый</i>	0,063	58	<i>Тысячелистник обыкновенный</i>	0,015
26	<i>Мята болотная</i>	0,062	59	<i>Молочай обыкновенный</i>	0,014
27	<i>Клевер сходный</i>	0,053	60	<i>Бальзамин</i>	0,014
28	<i>Рожь посевная</i>	0,047	61	<i>Клевер шуршащий</i>	0,013
29	<i>Чистотел большой</i>	0,046	62	<i>Василек луговой</i>	0,012
30	<i>Редька дикая</i>	0,043	63	<i>Зюзник европейский</i>	0,011
31	<i>Подорожник большой</i>	0,043	64	<i>Мальва культурная</i>	0,010
32	<i>Ежа сборная</i>	0,042	65	<i>Спаржа лекарственная</i>	0,007
33	<i>Частуха подорожная</i>	0,041	66	<i>Пырей ползучий</i>	0,007

Обращает на себя внимание тот факт, что все растения в той или иной мере накапливают радиоактивный цезий. Диапазон изменения факторов перехода для различных видов растений очень велик и достигает трех порядков.

Максимальными факторами перехода характеризуются *кипрей болотный* (0,671), *очиток пурпурный* (0,244), *осока* (0,242), *шлемник обыкновенный* (0,23), *мышинный горошек* (0,221), *жерушник* (0,208) и другие растения, которые можно отнести к гипераккумуляторам радиоактивного цезия.

Минимальными факторами перехода обладают *полынь горькая* (0,001), *пырей ползучий* (0,007), *спаржа лекарственная* (0,007), которые можно назвать гипоаккумуляторами Cs^{137} .

Обращает на себя внимание тот факт, что некоторые виды растений способны в больших количествах накапливать радионуклиды (более 20 % от содержания последних в почве). Это обстоятельство является предпосылкой для ботанической реабилитации площадей, загрязненных по типу Чернобыльского следа.

Сущность указанного способа реабилитации заключается в следующем. На почвах, подлежащих очистке от радиоактивного загрязнения, систематически выращиваются растения, характеризующиеся максимальной способностью к извлечению радиоактивного элемента из питающей среды (почвы), то есть растения-гипераккумуляторы Cs^{137} (*мышинный горошек*, *шлемник обыкновенный* и другие). Урожай, обогащенный частично выведенными из почвы радионуклидами скашивается, озоляется и утилизируется. При этом цикл "выращивание гипераккумуляторов - скашивание - утилизация" повторяется до тех пор, пока уровень радиоактивности почвы не окажется соответствующим нормам радиационной безопасности.

Описанный способ позволяет сохранить плодородный почвенно-растительный слой и значительно сокращает срок реабилитации загрязненных площадей, если иметь в виду только естественную убыль активности загрязняющего радионуклида за счет распада.

При использовании технологии ботанической реабилитации почв, загрязненных радионуклидом Cs^{137} , важно знать характер распределения этого радионуклида в почвенном слое. Это может иметь значение при решении вопроса: доступен ли Cs^{137} для корневой системы растений.

На рис. 1 представлены результаты исследования распределения Cs^{137} по глубине почвенных разрезов [5]. Приведенные данные характеризуют ситуацию на 1995 год – спустя 9 лет после аварийного выброса на Чернобыльской АЭС. Из рисунка видно, что вся радиоактивность сосредоточена в верхнем 20-сантиметровом слое, а основная ее доля (около 90 %) - в 10-сантиметровом слое. Таким образом, скорость вертикальной миграции радионуклида Cs^{137} невелика, и ожидать значительного "самоочищения" почвы в ближайшие десятилетия не приходится. В настоящее время радиоцезий находится в корнеобитаемом почвенном слое и доступен растениям.

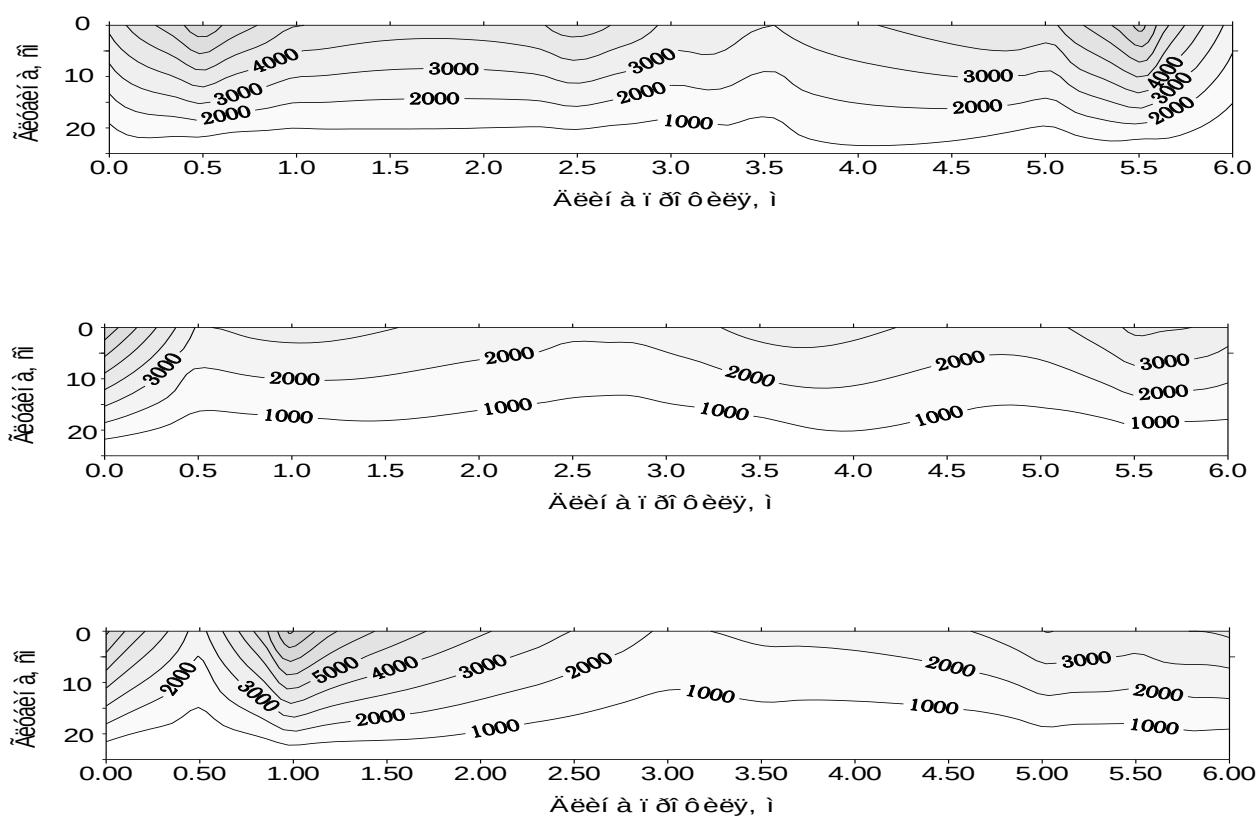


Рис. 1. Распределение удельной активности Cs^{137} по глубине нескольких почвенных разрезов Чернобыльского следа. Отметки изолиний соответствуют Бк/кг [1].

1.2.2. Основные количественные соотношения

Оценим время t , необходимое для снижения активности i -го радионуклида от начального a_{oi} до заданного $a_i(t)$ значения. При этом ограничимся только двумя из возможных факторов реабилитации – естественным остыванием и ботаническим выведением i -ой компоненты из среды загрязнения при культивировании растений j -го вида.

Предполагается, что в процессе "отсасывания" растениями i -го радионуклида, его количество, переходящее при прочих равных условиях из почвы в зеленую массу (подлежащую после созревания обязательной утилизации) составляет определенную, характерную для данного нуклида i и данного растения j долю активности i -ой компоненты, находящейся в среде загрязнения (почве).

Другими словами, фактор перехода ϕ_{ij} i -го радионуклида в зеленую массу j -го растения является константой, хотя результаты прямых измерений свидетельствуют о неустойчивости параметра ϕ_{ij} .

С учетом указанного выше допущения, формула для срока ботанической реабилитации почвы, загрязненной радионуклидом i , остывающим с постоянной распада λ_i , выглядит следующим образом:

$$t = - \left(\frac{\tau_i \tau_{ij}}{\tau_i + \tau_{ij}} \right) \ln \frac{a_i(t)}{a_{oi}} \quad (2)$$

где τ_i - средняя продолжительность жизни ядер i -го радионуклида; τ_{ij} - средняя продолжительность пребывания i -го радионуклида в загрязненной почве с учетом его выведения (эвакуации) j -ым растением (при заданных параметрах урожайности).

Из формулы (2) видно, что для оценки сроков реабилитации необходимо иметь количественные сведения о параметре τ_{ij} , поскольку остальные величины либо табулированы (τ_{ij}), либо известны из результатов непосредственных измерений (a_{oi}) или заданы [$a_i(t)$].

Прежде всего, оценим величину t для частных случаев.

1. Если $\tau_i \ll \tau_{ij}$, то

$$t \approx -\tau_{ij} \ln \frac{a_i(t)}{a_{oi}} \quad (3)$$

В этом случае срок реабилитации будет определяться средней продолжительностью пребывания радионуклида i в среде загрязнения в связи с ботаническим фактором.

2. Допустим, что $\tau_i \gg \tau_{ij}$, тогда

$$t \approx -\tau_i \ln \frac{a_i(t)}{a_{oi}} \quad (4)$$

Если средняя продолжительность естественного остывания i -го радионуклида невелика в сравнении с продолжительностью ботанического выведения, то срок реабилитации будет определяться параметром τ_i .

3. В частном случае, когда $\tau_i = \tau_{ij}$

$$t = -\frac{\tau_i}{2} \ln \frac{a_i(t)}{a_{oi}}, \quad (5)$$

то есть в этом случае срок реабилитации сокращается вдвое по сравнению с естественным остыванием.

Сопоставляя сроки реабилитации с использованием механизма ботанического выведения (t_{ij}) и без него (t_i) имеем при прочих равных условиях

$$\frac{t_i}{t_{ij}} = 1 + \frac{\tau_i}{\tau_{ij}}. \quad (6)$$

Поскольку параметры τ_i , τ_{ij} больше нуля, то правая часть (6) будет больше единицы.

Другими словами, при любых соотношениях между параметрами естественного остывания τ_i и ботанического выведения τ_{ij} срок реабилитации с применением технологии ботанического выведения оказывается меньше, чем без его использования, то есть в любом случае $t_{ij} < t_i$.

Для расчета параметра τ_{ij} введем понятие периода ботанического полувыведения T_{ij} , под которым будем понимать время, необходимое для выноса половины i -ой компоненты j -ым растением при некотором уровне урожайности.

Учитывая отмеченное, имеем для функции выживания i -го радионуклида в среде культивирования j -го аккумулятора:

$$1 - n \frac{m_j}{M} \varphi_{ij} = 2^{-k_{ij}}, \quad (7)$$

где m_j - урожайность (масса с единицы площади) аккумулирующей зеленой массы; M - масса загрязненного корнеобитаемого почвенного слоя единичной площади; n - кратность утилизации (количество урожаев за сезон); k_{ij} - срок выращивания j -го растения (промежуток времени Δt) в нормировке к периоду полувыведения j -ым растением i -го радионуклида (T_{ij}), то есть

$$k_{ij} = \frac{\Delta t}{T_{ij}}. \quad (8)$$

Если отношение nm_j/M обозначить через μ_j , тогда

$$T_{ij} = - \left(\frac{\ln 2}{\ln(1 - \mu_j \varphi_{ij})} \right) \Delta t, \quad (9)$$

откуда для τ_{ij} имеем

$$\tau_{ij} = - \frac{\Delta t}{\ln(1 - \mu_j \varphi_{ij})}. \quad (10)$$

Подставляя выражение для параметра τ_{ij} в формулу (2), получим выражение для оценки срока ботанической реабилитации почвы:

$$t = \left(\frac{\tau_i \Delta t}{\tau_i \ln(1 - \mu_j \varphi_{ij}) - \Delta t} \right) \ln \frac{a_i(t)}{a_{oi}}. \quad (11)$$

1.2.3. Оценка сроков реабилитации

Оценим время t для предельных случаев.

1. Если $\mu_j \varphi_{ij} \rightarrow 0$, то есть переход i -го радионуклида из почвы в растительную массу практически отсутствует. Тогда

$$t \rightarrow -\tau_i \ln \frac{a_i(t)}{a_{oi}}. \quad (12)$$

Это означает, что срок реабилитации почвы будет определяться лишь естественным остыванием i -го радионуклида.

2. Если $\mu_j \varphi_{ij} \rightarrow 1$, то есть практически вся активность за время Δt из почвы переходит в растительную массу. При этом

$$\frac{a_i(t = \Delta t)}{a_{oi}} \rightarrow 0 \quad (13)$$

и тогда

$$t \rightarrow \Delta t \quad (14)$$

В этом случае срок реабилитации почвы будет определяться лишь длительностью вегетационного периода Δt и может составить несколько месяцев.

Для большинства растений $0 < \mu_j \varphi_{ij} < 1$. На рис. 2 представлена оценка по соотношению (11) срока реабилитации почвы, загрязненной радионуклидом Cs^{137} , при использовании в качестве средства дезактивации растения *мышинный горошек*.

Так, для гипераккумулятора *мышинный горошек* $\varphi_{ij} = 0,221$, его урожайность m_j при благоприятных условиях составляет 11 т/га . Масса загрязненного почвенного слоя площади 1 га , мощности 10 см и плотности 1 г/см^3 равна 1000 т . При двух укосах ($n=2$) за вегетационный период ($\Delta t = 0,25$ года) величина $\mu_j = 0,022$. Для уменьшения активности радионуклида Cs^{137} ($\tau_i = 43$ года) в загрязненной почве в 10 раз потребуется время равное 55 годам, для снижения почвенной радиоактивности в 5 раз - примерно 38 лет, в 2 раза - примерно 16 лет (рис. 2).

Рассчитанные сроки оказываются значительно меньше сроков реабилитации почвы без ботанического выведения радиоактивной компоненты. Так, за

счет естественного распада Cs^{137} его активность в почве снижается в 10 раз через 104 года. Это примерно в 2 раза больше, чем при использовании в качестве средства дезактивации *мышинного горошка*.

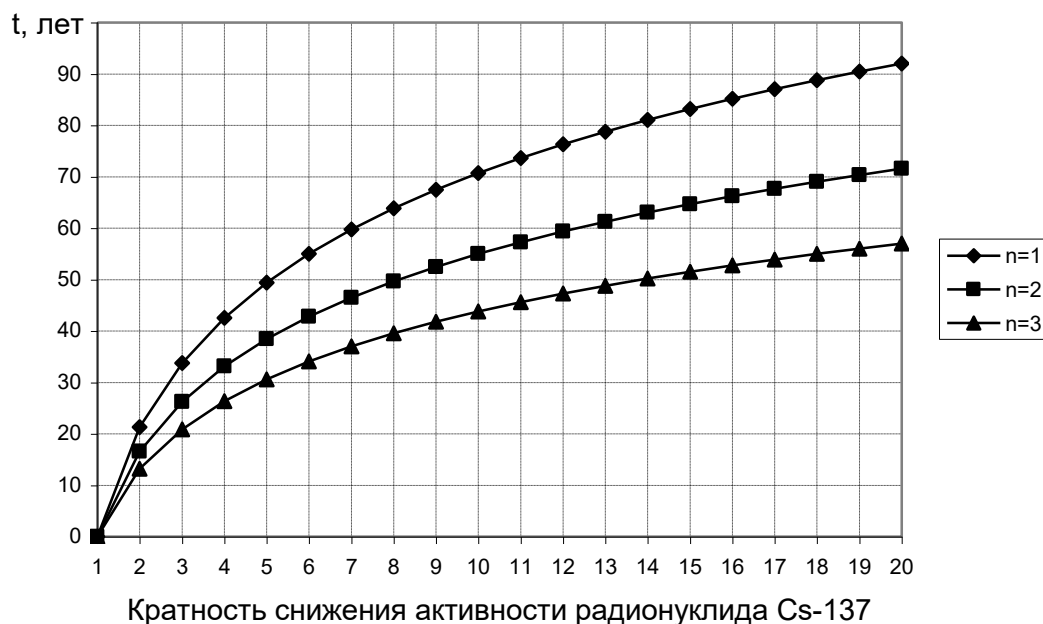


Рис. 2. Оценка срока реабилитации почвы, загрязненной радионуклидом Cs^{137} , при использовании в качестве средства дезактивации растения *мышинный горошек*.

1.2.4. Понятие о факторе ботанической реабилитации и его количественная оценка

Выражение (11) для срока ботанической реабилитации почвы, загрязненной радионуклидом i , можно упростить, имея в виду разложение

$$\ln(1-a)|_{a \ll 1} \approx -a. \quad (15)$$

С учетом (15) формула (11) выглядит следующим образом:

$$t \approx - \left(\frac{\tau_i \Delta t}{\tau_i \varphi_{ij} \mu_j + \Delta t} \right) \ln \frac{a_i(t)}{a_{oi}}, \quad (16)$$

или

$$t_i \approx - \left(\frac{\tau_i}{1 + \frac{\tau_i}{\Delta t} \varphi_{ij} \mu_j} \right) \ln \frac{a_i(t)}{a_{oi}}. \quad (17)$$

Обозначив $\theta_i = \tau_i / \Delta t$, получим:

$$t_i \approx - \left(\frac{\tau_i}{1 + \theta_i \varphi_{ij} \mu_j} \right) \ln \frac{a_i(t)}{a_{oi}}, \quad (18)$$

или

$$t_i \approx - \left(\frac{\tau_i}{1 + R} \right) \ln \frac{a_i(t)}{a_{oi}}, \quad (19)$$

где $R = \mu_j \theta_i \varphi_{ij}$ - фактор ботанической реабилитации.

Из формулы (19) видно, что при $R = 0$ реабилитация будет связана только с естественным остыванием радиоактивной компоненты, то есть

$$t_i \approx -\tau_i \ln \frac{a_i(t)}{a_{oi}}. \quad (20)$$

С возрастанием фактора реабилитации R , который включает в себя несколько составляющих, сроки дезактивации почвы уменьшаются и наоборот.

1.3. Практическое применение ботанической реабилитации

Результаты практического применения технологии ботанической реабилитации подтверждают ее основные теоретические положения и указывают на возможности очистки почв от радиоактивного загрязнения путем систематического отчуждения фитомассы, обогащенной радионуклидами.

Примером может служить один из участков Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРСа), сформировавшегося в результате Кыштымской аварии 1957 года на ПО "Маяк". Участок располагается в южной части Каменского района Свердловской области в окрестностях оз. Тыгиш, где в настоящее время наблюдаются наибольшие остаточные уровни радиоактивного загрязнения, Содержание Sr^{90} в отдельных почвенных пробах соответствует плотности поверхностного загрязнения 5 и более Ки/км^2 .

Участок представлен почвами, с которых велся регулярный в послеаварийный период укос травы, и почвами, где отчуждение фитомассы не производилось (рис. 3а). Уровень загрязнения участка по Sr^{90} на 1997 год – до 1 Ки/км^2 .

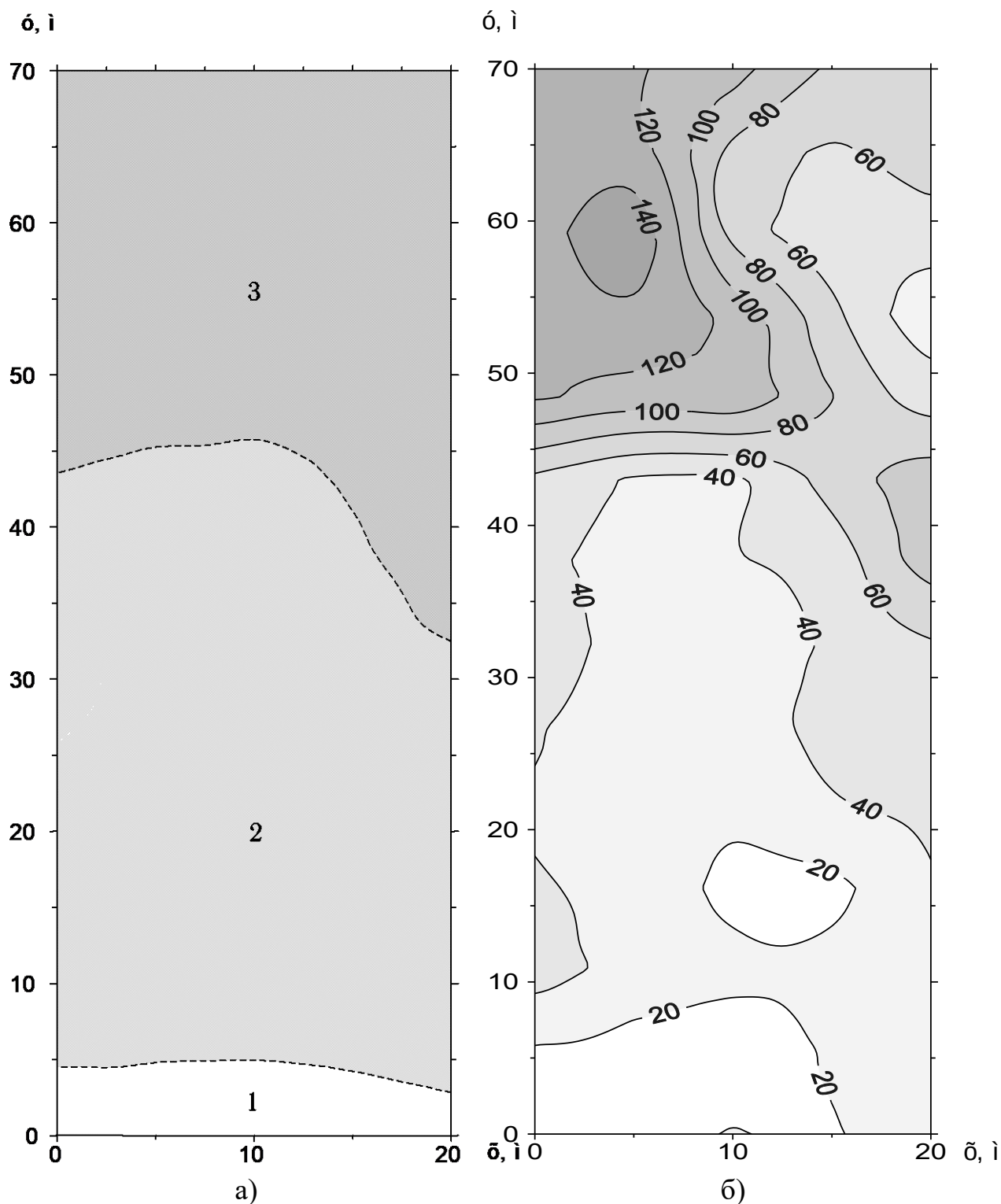


Рис. 3. а) Схема расположения различных по использованию почв на участке радиоэкологических исследований. б) Распределение β -активности по площади исследованного участка. Отметки изолиний соответствуют *имп/мин*.

Обозначения: 1 - сенокос на рекультивированной почве, 2 - сенокос на целинной почве, 3 - участок леса, где скашивание травы в послеаварийный период не производилось [1].

Так, северо-западную часть участка занимают почвы с погребенным гумусовым горизонтом, образование которого связано с проведением в начальный послеаварийный период серии дезактивационных работ. Последние были проведены на территории ВУРСа в зонах с максимальной плотностью загрязнения, и они представляют собой высокую отвальную вспашку, в результате которой верхняя часть гумусового профиля оказалась перемещенной на глубину 50-90 см. В настоящее время на этой почве производится выращивание многолетних трав, скашивание ведется с применением техники.

Средняя часть участка занята почвами, незатронутыми дезактивационными мероприятиями и которые с 1957 года используются местными жителями как естественный сенокос, скашивание ведется вручную.

И, наконец, юго-западную часть занимает лес. Эти почвы также не затронуты дезактивационными работами, но укос травы с них не производится даже вручную из-за наличия большого количества древесной растительности.

Исследования распределения β -активности по площади участка (Sr^{90} и его дочерний продукт Y^{90} являются β -излучателями) показали, что активность по β -лучам в той части участка, где производилось регулярное с момента загрязнения скашивание растительности, оказалась заметно ниже, чем в точках наблюдений, расположенных за пределами этой части, то есть где укос травы не производился (рис. 3б).

Контраст в аппаратном отклике по β -лучам хорошо виден на рис. 4, где представлена интенсивность β -излучения по одному из съемочных профилей участка. Так, минимальной β -активностью – 20 *имп/мин* характеризуются вспаханные рекультивированные почвы, на сенокосе β -отклик составил 30-40 *имп/мин*, а на территории леса отмечается максимальная активность по β -лучам – 80-140 *имп/мин*, что примерно в 3 раза больше, чем на сенокосе.

Систематическое скашивание и эвакуация растительности с фактором перехода по радиостронцию $\varphi_{ij} = 0,25$ с зараженной территории за 39 лет умень-

шили активность почв в 10 раз. Это сократило время, необходимое на такое снижение активности, более чем в 2 раза. Выращивание и утилизация *шлемника обыкновенного* с фактором перехода $\varphi_{ij} = 0,93$ могло бы обеспечить снижение активности Sr^{90} в почве в 10 раз, которое удалось зарегистрировать на участке, не за 39 лет, а примерно за 15 лет. Таким образом, возможность использования технологии ботанической реабилитации радиоактивно загрязненных почв получила экспериментальное подтверждение на локальном участке Восточно-Уральского радиоактивного следа [1].

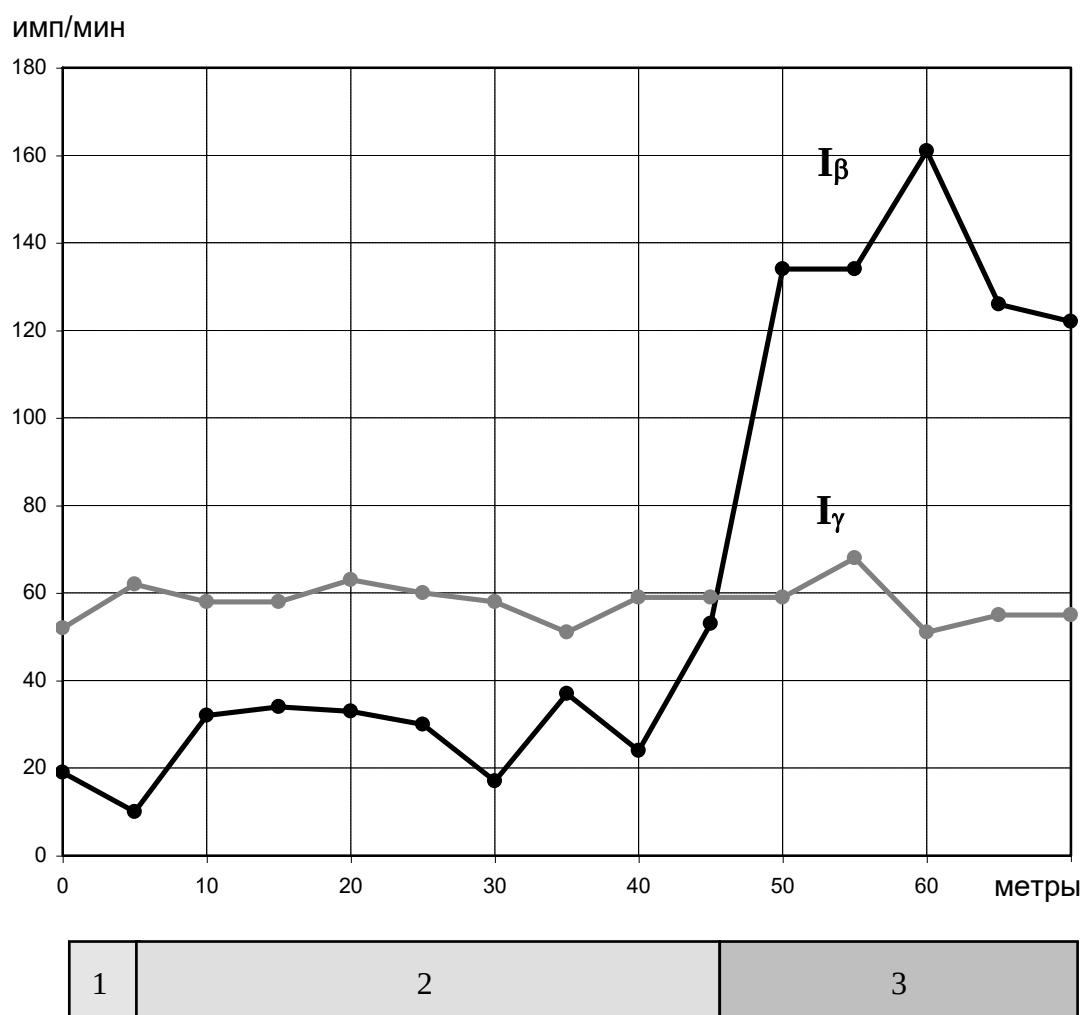


Рис. 4. Интенсивность β - и γ -излучения по съемочному профилю. Обозначения: 1- сенокос на рекультивированной почве, 2 - сенокос на целинной почве, 3 - лес.

2. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

2.1. Изучение распределения радионуклида Cs^{137} в почвенном слое Чернобыльского следа

Задание

а) С помощью лабораторного гамма-спектрометра "Гамма-01С" зарегистрировать спектры гамма-излучения почвенных проб, отобранных на территории Чернобыльского следа с разной глубины почвенного слоя.

б) Произвести обработку полученных спектров и вычислить удельную активность радионуклида Cs^{137} в почвенных образцах.

в) Построить график вертикального распределения удельной активности Cs^{137} в почвенном слое.

г) Сделать выводы о соответствии удельной активности Cs^{137} в почвенных образцах нормам радиационной безопасности и максимальной концентрации радиоактивного цезия в почвенном разрезе.

Материалы и оборудование

1. Лабораторный гамма-спектрометр "Гамма-01С".
2. Набор почвенных проб, отобранных на территории Чернобыльского следа с разной глубины почвенного слоя.
3. Эталон Cs^{137} с известной удельной активностью.
4. Набор образцовых спектрометрических гамма-источников (ОСГИ).
5. Калькулятор, миллиметровка, карандаш, резинка, линейка.

Порядок выполнения работы

а) Лабораторный спектрометр подготовить к работе: прогреть в течение 10 минут, произвести градуировку энергетической шкалы с помощью образцовых спектрометрических гамма-источников (ОСГИ).

б) Зарегистрировать спектр гамма-излучения эталонного образца Cs^{137} с экспозицией 10 мин. Найти площадь фотопика Cs^{137} на спектре гамма-излучения эталона $S_{\text{эт}}$.

в) Зарегистрировать спектр фонового гамма-излучения с экспозицией 10 мин. Найти площадь S_{ϕ} , соответствующую энергетическому интервалу фотопика Cs^{137} на спектре фонового гамма-излучения эталона.

г) Взвесить почвенные образцы. Зарегистрировать спектры их гамма-излучения с экспозицией 10 мин (рис. 5). Найти площадь фотопика Cs^{137} на спектре гамма-излучения каждой почвенной пробы S_{ni} .

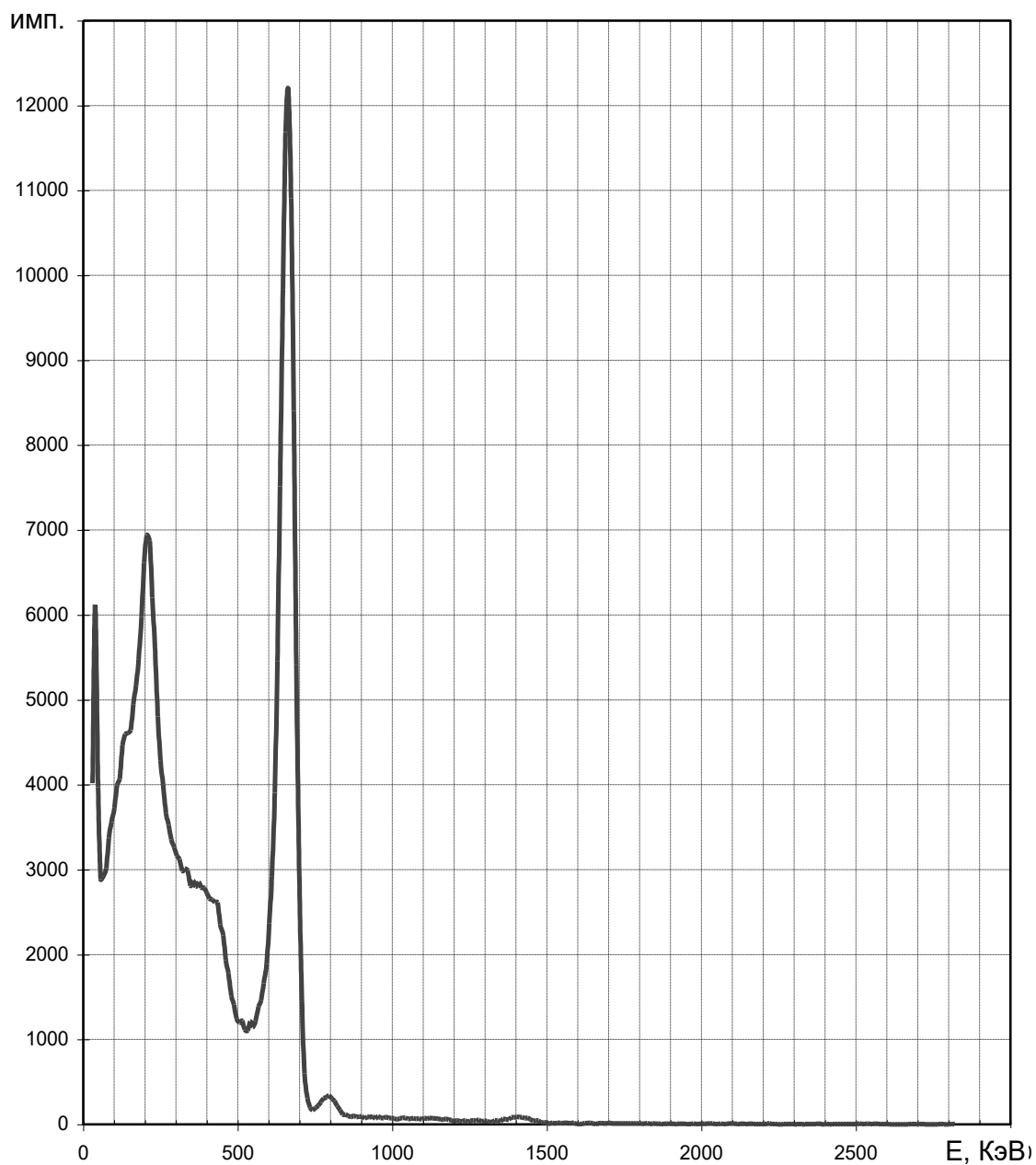


Рис. 5. Спектр гамма-излучения почвенной пробы локального участка Чернобыльского следа. Время измерения – 10 мин., масса – 100 г.

д) Вычисление удельной активности Cs^{137} в i -ом почвенном образце производится по формуле:

$$A_{ni} = A_{эм} \cdot \frac{S_{ni}}{S_{эм}} \cdot \frac{t_{эм}}{t_n} \cdot \frac{m_{эм}}{m_n}, \quad (21)$$

где $A_{эм}$ - удельная активность Cs^{137} в эталонном образце в $Bк/кг$; S_{ni} - площадь фотопика Cs^{137} на спектре γ -излучения i -ой почвенной пробы в $имп$; $S_{эм}$ - площадь фотопика Cs^{137} на спектре γ -излучения эталона в $имп$; $t_{эм}$ - время регистрации спектра эталонной пробы в $с$; t_n - время регистрации спектра почвенной пробы в $с$; $m_{эм}$ - масса эталонной пробы в $г$; m_n - масса почвенной пробы в $г$.

е) График вертикального распределения удельной активности Cs^{137} в почвенном слое представить в виде гистограммы, образец которой приведен на рис. 6.

ж) Описать полученные результаты. Указать, находится ли Cs^{137} в корнеобитаемом почвенном слое, или он недоступен для корневого питания растений.

Контрольные вопросы

1. Какова основная цель изучения распределения радионуклида Cs^{137} в почвах Чернобыльского следа ?
2. Какова скорость вертикальной миграции радионуклида Cs^{137} в почвах?
3. Чем определяется скорость вертикальной миграции радионуклида Cs^{137} в почвах ?
4. Какие радионуклиды, кроме Cs^{137} , обнаружены Вами в почвенных образцах ?

Содержание отчета

1. Краткое изложение основных теоретических положений.
2. Порядок выполнения измерений и последующей обработки данных.
3. График вертикального распределения удельной активности Cs^{137} в почвенном разрезе.
4. Выводы.

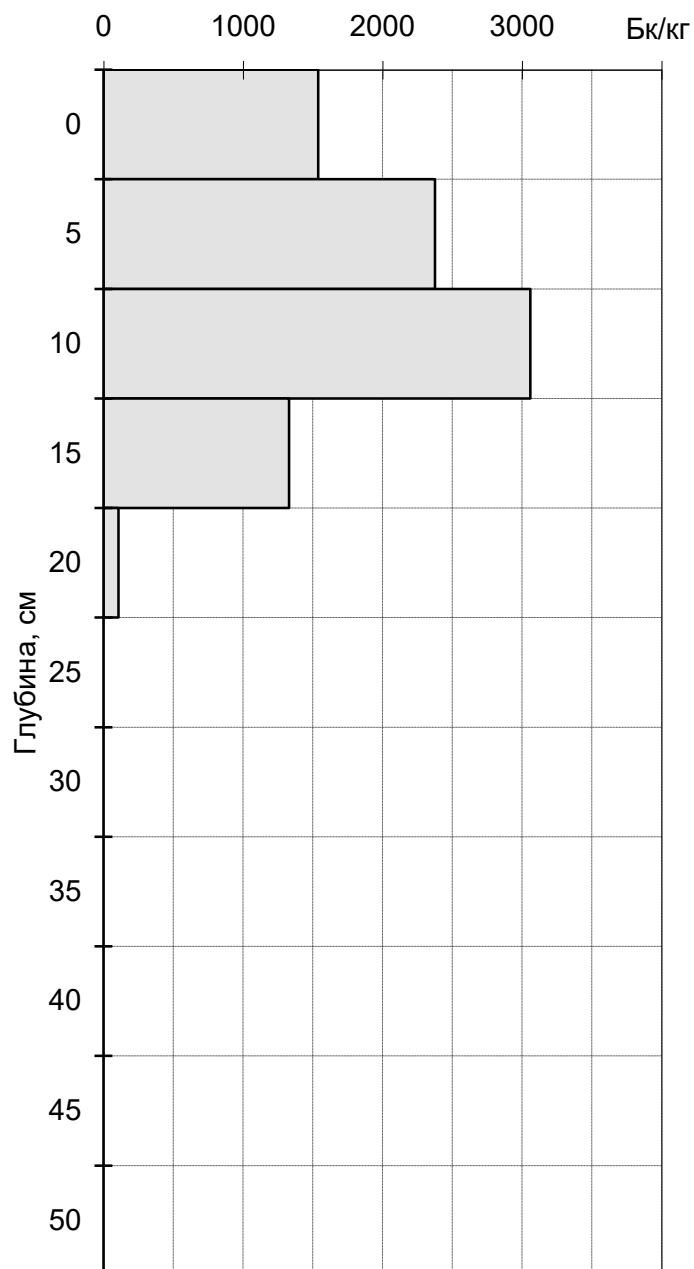


Рис. 6. Образец оформления графика вертикального распределения удельной активности Cs^{137} в почвенном разрезе.

2.2. Определение факторов перехода радионуклида Cs^{137} из почв в растения

Задание

а) С помощью лабораторного гамма-спектрометра "Гамма-01С" зарегистрировать спектры гамма-излучения растительных и почвенных проб, отобранных на территории Чернобыльского следа.

- б) Произвести обработку полученных спектров и вычислить удельную активность радионуклида Cs^{137} в растительных и почвенных образцах.
- в) Рассчитать факторы перехода радионуклида Cs^{137} из почв в растения.
- г) Сделать выводы.

Материалы и оборудование

1. Лабораторный гамма-спектрометр "Гамма-01С".
2. Эталон Cs^{137} с известной удельной активностью.
3. Набор образцовых спектрометрических гамма-источников (ОСГИ).
4. Пробы растений *мышинный горошек* и *шлемник обыкновенный*.
5. Пробы почв, соответствующие растениям *мышинный горошек* и *шлемник обыкновенный*.
6. Калькулятор, карандаш, резинка.

Порядок выполнения работы

а) Лабораторный спектрометр подготовить к работе: прогреть в течение 10 минут, произвести градуировку энергетической шкалы с помощью образцовых спектрометрических гамма-источников (ОСГИ).

б) Зарегистрировать спектр гамма-излучения эталонного образца Cs^{137} с экспозицией 10 мин. Найти площадь фотопика Cs^{137} на спектре гамма-излучения эталона $S_{\text{эт}}$.

в) Зарегистрировать спектр фонового гамма-излучения с экспозицией 10 мин. Найти площадь $S_{\text{ф}}$, соответствующую энергетическому интервалу фотопика Cs^{137} на спектре фонового гамма-излучения эталона.

г) Взвесить подготовленные растительные образцы для *мышинного горошка* и *шлемника обыкновенного*. Зарегистрировать спектры их гамма-излучения с экспозицией 15 мин. Найти площадь фотопика Cs^{137} на спектре гамма-излучения каждой растительной пробы $S_{\text{рj}}$.

д) Взвесить почвенные образцы, соответствующие растениям *мышинный горошек* и *шлемник обыкновенный*. Зарегистрировать спектры их гамма-излу-

чения с экспозицией 5 мин. Найти площадь фотопика Cs^{137} на спектре гамма-излучения каждой почвенной пробы S_{nj} .

е) По формуле (21) рассчитать удельную активность Cs^{137} в растительных и соответствующих им почвенных образцах.

ж) По соотношению (1) вычислить факторы перехода радионуклида Cs^{137} из почв в растения *мышинный горошек* и *шлемник обыкновенный*.

з) Сделать заключение, относятся ли исследованные растения к гипераккумуляторам радиоактивного цезия или нет.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют способы реабилитации радиоактивно загрязненных территорий ? Каковы их недостатки и преимущества ?
2. Что такое фактор перехода радионуклида из почвы в растение ?
3. Какие растения-гипераккумуляторы радиоактивного цезия Вы можете назвать ?
4. Как можно оценить срок ботанической реабилитации почвы ?
5. Какие факторы влияют на срок ботанической реабилитации почвы ?
6. Что такое фактор ботанической реабилитации почвы ?
7. Как влияет фактор ботанической реабилитации на сроки снижения почвенной активности ?

Содержание отчета

1. Краткое изложение основных теоретических положений.
2. Порядок выполнения измерений и последующей обработки данных.
3. Результаты расчета факторов перехода радионуклида Cs^{137} из почв в растения *мышинный горошек* и *шлемник обыкновенный*.
4. Выводы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Александрова Ж.Н.* Ядерно-физические измерения параметров ботанической реабилитации радиоактивно загрязненных площадей: Диссертация на соискание ученой степени кандидата геол.- минерал. наук. – Екатеринбург, 1998. – 147 с.
2. *Александрова Ж.Н., Возжеников Г.С.* О возможности ботанической реабилитации загрязненных площадей Восточно-Уральского радиоактивного следа // Международная выставка-семинар "Уралэкология-95": Тез. докл. – Екатеринбург, 1995. – с.190-191.
3. *Антропогенная радионуклидная аномалия и растения* / Гродзинский Д.М., Коломиец К.Д., Кутлахмедов Ю.А. и др. – Киев: Лыбидь, 1991. – 156 с.
4. *Брукс Р.Р.* Биологические методы поисков полезных ископаемых: Пер. с англ. – М.: Недра, 1986. – 311 с.
5. *Поляков Ю.А.* Радиоэкология и дезактивация почв. – М.: Атомиздат, 1970. – 142 с.

Учебное издание

Александрова Жанна Николаевна

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Учебно-методическое пособие
к практическим занятиям и самостоятельной работе
по дисциплине «Радиационная безопасность» для студентов
специализаций «Геофизические методы исследования скважин» и
«Геофизические методы поисков и разведки МПИ»
специальности 21.05.03 – «Технология геологической разведки»
очной и заочной формы обучения

Часть 2

Реабилитация радиоактивно загрязненных территорий

Редактор _____
Компьютерная верстка автора

Подписано в печать ____ . ____ . 2018 г.
Бумага писчая. Формат 60 х 84 1/16.
Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Печ. л. _____. Уч.-изд. л. _____. Тираж 100. Заказ _____

Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Уральский государственный горный университет
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебно-методическому

комитету
С.А. Уиоров



**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

Специальность:

21.05.03 Технология геологической разведки

форма обучения: очная, заочная

Автор: Александрова Ж. Н.

Екатеринбург

2020



ФГБОУ ВО

**«Уральский государственный горный
университет»**

Ж. Н. Александрова, Ю. В. Бельшев

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

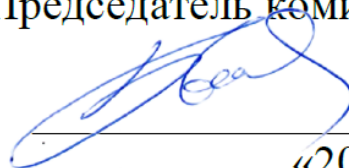
Учебно-методическое пособие
к практическим занятиям и самостоятельной работе
по дисциплине «Радиационная безопасность» для студентов
специализаций «Геофизические методы исследования скважин» и
«Геофизические методы поисков и разведки МПИ»
специальности 21.05.03 Технология геологической разведки
очной и заочной формы обучения

**Часть 3
Определение радона в воде**

**Екатеринбург
2020**

ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

ОДОБРЕНО
методической комиссией
факультета геологии и геофизики
Председатель комиссии



В. И. Бондарев
«20» марта 2020 г.

Ж. Н. Александрова, Ю. В. Бelyшев

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Учебно-методическое пособие
к практическим занятиям и самостоятельной работе
по дисциплине «Радиационная безопасность» для студентов
специализаций «Геофизические методы исследования скважин» и
«Геофизические методы поисков и разведки МПИ»
специальности 21.05.03 Технология геологической разведки
очной и заочной формы обучения

Часть 3
Определение радона в воде

Рецензент: Шапов В.А., старший научный сотрудник
Института геофизики УрО РАН, д-р геол.-мин. наук

Александрова Ж.Н., Бельшев Ю.В.

- А46 Лабораторный практикум по радиационной безопасности: учебно-методическое пособие к практическим занятиям и самостоятельной работе по дисциплине "Радиационная безопасность" для студентов специализаций «Геофизические методы исследования скважин» и «Геофизические методы поисков и разведки МПИ» специальности 21.05.03 – «Технология геологической разведки» очной и заочной формы обучения; Часть 3. Определение радона в воде / Ж. Н. Александрова, Ю. В. Бельшев; Уральский гос. горный ун-т. – Екатеринбург: изд-во УГГУ, 2020. – 23 с.

В учебно-методическом пособии приводятся сведения о радиоактивном газе радоне, дан краткий обзор существующих способов его определения. Описан полевой эманометр «Радон» и порядок работы с ним. Пособие содержит руководство к выполнению лабораторной работы по определению концентрации радона в воде.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся специализациям «Геофизические методы исследования скважин» и «Геофизические методы поисков и разведки МПИ» по специальности «Технология геологической разведки».

© Александрова Ж.Н., Бельшев Ю.В., 2018
© Уральский государственный горный
университет, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭМАНАЦИОННЫХ МЕТОДОВ	4
1.1 Свойства радона	4
1.2 Радон в воздухе зданий	6
1.3 Радон в питьевой воде	7
1.4 Способы определения радона	8
2. ПОЛЕВОЙ ЭМАНОМЕТР «РАДОН»	13
2.1 Основные технические данные и характеристики прибора	14
2.2 Устройство и принцип работы прибора	14
2.3 Подготовка прибора и измерительной установки к работе	15
2.4 Градуирование прибора	16
3. ПРОГРАММА ИЗМЕРЕНИЙ	18
4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	22
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	23

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭМАНАЦИОННЫХ МЕТОДОВ

1.1 Свойства радона

После открытия радия, когда ученые познавали тайны радиоактивности, было установлено, что твердые вещества, находившиеся в близком соседстве с солями радия, становились радиоактивными. Однако, спустя несколько дней радиоактивность этих веществ исчезала бесследно. В 1902 году Дорн, изучавший это явление, пришел к выводу, что радий непрерывно испускает радиоактивное вещество, невесомые количества которого оседают на близлежащих предметах. Это вещество оказалось радиоактивным газом, который Резерфордом был назван эманацией радия. Слово "эманация" было заимствовано из латинского языка и означает "истечение".

Радиоактивные газы (эманации) - радон ${}^{222}\text{Rn}$ ($T_{1/2} = 3,82$ сут), торон ${}^{220}\text{Rn}$ (Tn, $T_{1/2} = 55,6$ с) и актинон ${}^{219}\text{Rn}$ (An, $T_{1/2} = 3,96$ с) входят в радиоактивные цепочки последовательно превращающихся *естественных* радионуклидов уранового ${}^{238}\text{U}$ ($T_{1/2} = 4,47 \cdot 10^9$ лет), ториевого ${}^{232}\text{Th}$ ($T_{1/2} = 14 \cdot 10^9$ лет) и актиноуранового ${}^{235}\text{U}$ ($T_{1/2} = 7,04 \cdot 10^8$ лет) рядов.

Радон – самый тяжелый из благородных газов. Он в 110 раз тяжелее водорода, в 55 раз тяжелее гелия. Не имеет ни запаха, ни вкуса, прозрачен и бесцветен.

Плотность радона при 0 °С равна 9,81 кг/м³, т.е. почти в 7,5 раз больше плотности воздуха. Однако пока эти сведения не проверены, так как чтобы получить один литр радона из солей радия, нужно около 500 кг радия. Если бы такой объем газа и был получен каким-либо образом, то, по словам Резерфорда, ученого, открывшего радон, "никакой сосуд не мог бы удержать его, так как количество тепла, испускаемое радоном, расплавило бы сосуд, в который его заключили".

Радон химически инертен и реагирует только с сильными фторирующими реагентами.

Радон образуется при распаде ${}^{226}\text{Ra}$ ($T_{1/2} = 1620$ лет), входящего в радиоактивное семейство ${}^{238}\text{U}$. Он является α -излучателем.

В результате радиоактивного распада ${}^{226}\text{Ra}$ образующийся радон попадает в кристаллическую решетку минералов. Процесс выделения радона из минералов и горных пород в поровое или трещинное простран-

ство получил название *эманирования*. Не все атомы радона могут выделиться в поровое пространство, поэтому для характеристики степени высвобождения радона из горных пород используется *коэффициент эманирования*:

$$\eta = \frac{Q_{\text{п}}}{Q_0} 100\% = \frac{C_{\text{п}} V_{\text{п}}}{C V} 100\% = \frac{C_{\text{п}}}{C} k_{\text{п}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $Q_{\text{п}}$ - количество эманации, выделяемой в поровое пространство за некоторое время; Q_0 - полное количество эманации (включая «замурованную» часть в минеральных зернах), образующейся за тот же промежуток времени; $C = Q_0/V$ - общая концентрация эманации, находящейся в объеме V ; $V_{\text{п}}$ - объем пор; $k_{\text{п}} = V_{\text{п}}/V$ - коэффициент пористости породы.

Величина коэффициента эманирования зависит от характера породы, ее структуры и степени ее раздробленности. Чем меньше зерна породы, тем больше внешняя поверхность зерен, тем активнее идет процесс эманирования. Коэффициент эманирования может меняться от первых процентов (скальные породы) до 30-40 % (песчаники, угли) и даже 60 % (торфяники).

Попадая в поры горной породы эманации и в дальнейшем распространяются путем диффузии или конвективного переноса (по трещинам, разломам), образуя *газовый ореол рассеяния*. Растворенные в воде радиоактивные элементы и эманации могут мигрировать с подземными водами на значительные расстояния (до десятков километров), образуя *водный ореол рассеяния*.

Проводниками радона под землей являются региональные разломы, заложенные в допалеозойское время, и разломы, активизированные в мезо-кайнозойское время, с помощью которых радон появляется на поверхности земли и частично концентрируется в рыхлых отложениях.

Если в породе известна массовая доля P_U (%) урана, то концентрация $R_{\text{п}}$ в объеме порового пространства вычисляется по формуле:

$$C_{\text{Ra}}^{\text{пор}} = 3,4 \cdot 10^4 \frac{\eta}{k_{\text{п}}} \rho K_{\text{pp}} P_U, \quad (2)$$

где ρ - плотность горной породы (г/см^3); K_{pp} - коэффициент радиоактивного равновесия между радием и ураном.

$$K_{\text{pp}} = \frac{P_{\text{Ra}}}{P_U} \frac{1}{3,4 \cdot 10^{-7}}, \quad (3)$$

где P_{Ra} и P_U - содержания радия и урана соответственно.

Концентрация эманаций измеряется в долях удельной активности (Бк/л, Бк/м³ или Ки/л, Ки/м³) - количества ядерных превращений в секунду, происходящих в единице объема вещества.

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}, 1 \text{ эман} = 10^{-10} \text{ Ки/л} = 3,7 \text{ Бк/л}$$

При оценке концентрации T_n используется следующая формула:

$$C_{T_n}^{\text{пор}} = 2,6 \cdot 10^4 \frac{\eta}{k_{\Pi}} \rho P_{Th}. \quad (4)$$

Экспериментальными исследованиями установлено, что распределение R_n между жидкой и газообразной фазами подчиняется закону Генри:

$$C_{\text{ж}} = \alpha(T) C_{\text{г}}, \quad (5)$$

где $C_{\text{ж}}$ - концентрация R_n в жидкости; $C_{\text{г}}$ - концентрация R_n в газе; $\alpha(T)$ - коэффициент растворимости (коэффициент Генри).

Установлена следующая эмпирическая зависимость растворимости радона в воде в зависимости от температуры:

$$\alpha(T) = 0,105 + 0,405 e^{-0,0502 \cdot T}. \quad (6)$$

Из формулы видно, что коэффициент α уменьшается с ростом температуры. При температурах 10, 20, 30, 40 °C он равен соответственно 0,35; 0,25; 0,20 и 0,16. При кипячении воды радон полностью удаляется.

В природе радона очень мало - его можно отнести к числу наименее распространенных на нашей планете химических элементов. Концентрация R_n в атмосфере оценивается цифрой $7 \cdot 10^{-17} \%$ по весу. В земной коре его тоже очень мало, поскольку радон образуется из сверхредкого элемента - радия. Тем не менее, даже ничтожное присутствие радона можно обнаружить с помощью специальных приборов - эманометров.

1.2 Радон в воздухе зданий

Основным источником поступления радона в воздух помещений является геологическое пространство под зданием. Содержание радона в воздухе помещений зависит от его содержания в почве и подстилающих породах, их эманацирующей способности, климатических условий, конструкции зданий и системы их вентиляции, кратностью воздухообмена в помещении. Концентрации и потоки радона крайне неравномерны, они изменяются в очень широких пределах для различных регионов и видов зданий.

Свой вклад в поток радона, поступающий в помещение, создает и его выход из строительных конструкций - радон может генерироваться строительными материалами при достаточно большом содержании в них урана и тория. Генерируется он вследствие того, что при строительстве здания мог быть использован кирпич, изготовленный из глины, характеризующейся повышенной радиоактивностью.

При проектировании новых зданий жилищного и общественного назначения должно быть предусмотрено, чтобы объемная активность радона и торона и их дочерних продуктов распада в воздухе помещений не превышала **100 Бк/м³**.

В эксплуатируемых зданиях концентрация Rn^{222} и Rn^{220} и их дочерних продуктов распада в воздухе не должна превышать **200 Бк/м³**. При более высоких значениях объемной активности должны проводиться защитные мероприятия, направленные на снижение поступления радона в воздух помещений и улучшение вентиляции помещений.

Изотоп Rn^{222} (продукт распада ${}_{92}U^{238}$) дает примерно 50–55 % дозы облучения, которое ежегодно получает каждый житель Земли. Изотоп Rn^{220} (продукт распада ${}_{90}Th^{232}$) прибавляет к этому еще примерно 5–10 %. Однако исследования показали, что в отдельных местностях радоновое облучение во много раз и даже на несколько порядков может превышать средние величины.

1.3 Радон в питьевой воде

Каким образом радон попадает в питьевую воду? Он попадает в воду из окружающих пород (гранитов, базальтов и др.), с которыми соприкасаются водоносные слои. Поэтому концентрация радона в водах зависит от концентрации материнских элементов в горных породах, омываемых ею, коэффициента эманирования, пористости или трещиноватости горных пород и скорости движения воды (расхода потока). Рыхлые или трещиноватые породы характеризуются повышенными концентрациями радона (зоны тектонических нарушений, кора выветривания и т.д.).

Подземные воды трещинных массивов кислых кристаллических пород обычно отличаются наиболее высокой концентрацией радона, достигающей 500 Бк/л и выше. Значительно ниже концентрация радона в водах основных изверженных пород. Трещинные воды известняков, песчаников,

сланцев обычно имеют концентрацию радона в пределах 10-100 Бк/л. Однако, в отдельных случаях, и в этих породах могут встречаться повышенные концентрации радона. Подземные воды в горизонтах грунтовых вод, залегающих недалеко от поверхности, обычно имеют более низкую концентрацию радона, составляющую менее 50 Бк/л. В поверхностных водах концентрация радона, как правило, не превышает 2-5 Бк/л, главным образом, из-за того, что радон успевает распасться в течение существования воды в поверхностных условиях или уйти в атмосферу за счет аэрации.

В зависимости от геологических и гидрогеологических условий в различных районах земли создаются условия для формирования широкого спектра фоновых концентрации радона. Наряду с районами с пониженными фоновыми концентрациями радона в водах имеются территории с весьма высокими, “ураганными” содержаниями радона. Такие территории обнаружены в Бразилии, Индии, Канаде. В Иране известны родники с высокими концентрациями радона. Повышенными фоновыми концентрациями радона характеризуются скандинавские страны. Многочисленные зоны с высокой концентрацией радона в водах выявлены в США. В России выявлены зоны с концентрацией радона в воде в 300-400 Бк/л. Из-за разнообразия условий радононакопления в водах в разных странах приняты различные величины предельно допустимых концентраций радона, которые ограничивают использование вод с высоким содержанием радона. Так, в Финляндии предельно допустимые концентрации установлены на уровне 300 Бк/л, в Швеции - 300 Бк/л, в Ирландии - 200 Бк/л.

В России нормы радиационной безопасности устанавливают предельно допустимое содержание радона в воде в **60 Бк/л** при отсутствии в воде других радиоактивных веществ. До этого «Санитарные правила и нормы для централизованного водоснабжения» разрешали пользоваться водой с содержанием радона до 120 Бк/л.

1.4 Способы определения радона

Радон можно определить с помощью эманационных методов.

Под эманационным методом геофизической разведки понимают исследования распределения концентрации радиоактивных газов в горных породах, рудах, почве, атмосферном воздухе, воде в целях поисков и разведки месторождений радиоактивных руд, а также для решения некото-

рых геологических (картирование разломов, зон трещиноватости), инженерно-геологических (выявление пород с повышенной пористостью, отслеживание водных горизонтов) и экологических задач. Сравнительно недавно установлено аномальное поведение радона в подземных водах вблизи эпицентра землетрясения. Это открытие позволило создать метод прогноза землетрясений, который уже оправдал себя на практике.

В зависимости от природы эманаций различают радоновый, торонный и актиноновый методы. Наибольшее распространение в полевых условиях получил радоновый метод эманационной съемки. Путем измерения концентраций Rn и Tn в почвенном воздухе и воде можно определять природу активного начала (тип радиоактивной аномалии) горных пород.

Эманационный метод представляет собой один из основных радиометрических методов геофизической разведки, что обуславливается его большой по сравнению с другими радиометрическими методами глубиной, так и его высокой чувствительностью.

Суть эманационных методов анализа заключается в следующем. Радиоактивные газы тем или иным способом извлекают из твердых или жидких веществ и переводят в ионизационную или сцинтилляционную камеру, чувствительную к α -частицам (радиоактивные эманации Rn , Tn , $Ап$ - это α -излучатели), которая предварительно градуируется с помощью жидкого радиевого стандартного образца (эталона). По ионизационному току или количеству импульсов определяют концентрацию эманации в камере и затем в исходной пробе почвенного воздуха или воды. Данные об активности Rn , Tn , $Ап$ используют для определения содержания долгоживущих материнских веществ - U (по Ra), Th и Ac .

Существует два наиболее распространенных способа анализа концентрации эманаций в водных пробах - *вакуумный* и *циркуляционный*.

При вакуумном способе (рис. 1, а) из сцинтилляционной камеры 1 объемом V_k и из осушителя 2 объемом V_{oc} через соединительные трубки 3 с зажимами $З_{1-2}$ откачивают воздух. Затем кран K_1 и зажимы в определенном порядке открывают, после чего атмосферный воздух, проходя через сосуд 4, обогащается растворенным в воде 5 радиоактивным газом, начинает поступать в эманационную камеру со скоростью около 100 пузырьков в минуту. Специальный сосуд (барботер) плотно закрыт резиновой пробкой 6 с винтовым зажимом, предотвращающей утечку эманации.

В замкнутой циркуляционной системе (рис. 1, б) эманация из сосуда с водой 4 (общий объем V_c , объем воды - $V_{\text{вод}}$) с помощью груши 7 объемом V_r через соединительные трубки 3 объемом V_t в течении некоторого времени прокачки $t_{\text{пр}}$ равномерно распределяется по всему *газовому* объему циркуляционной системы $V_{\text{сист}}$:

$$V_{\text{сист}} = V_k + V_{\text{ос}} + V_r + V_t + V_c - V_{\text{вод}} + \alpha V_{\text{вод}}, \quad (7)$$

или

$$V_{\text{сист}} = V_{\text{возд}} + \alpha V_{\text{вод}}, \quad (8)$$

где $V_{\text{возд}}$ - объем воздуха в системе; $\alpha V_{\text{вод}}$ - объем эманации, растворенной в воде; α - коэффициент Генри.

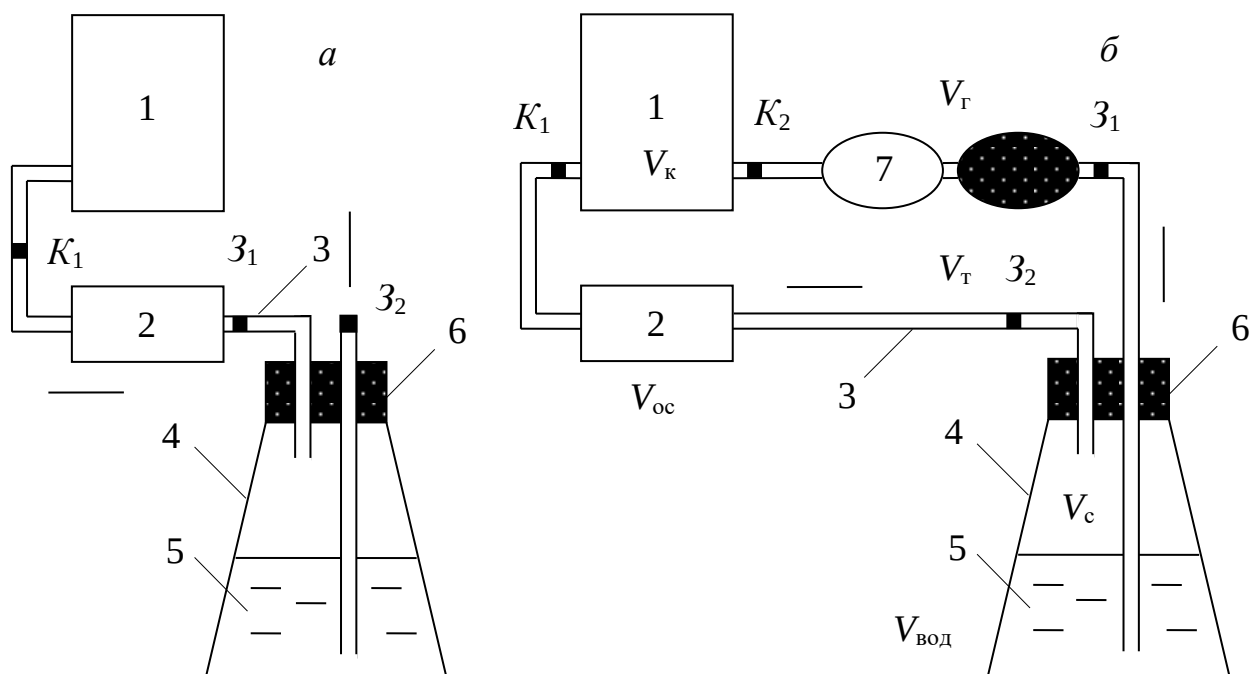


Рис. 1. Вакуумный (а) и циркуляционный (б) способы анализа. Стрелками показано направление движения воздуха

Имеет смысл сделать некоторые пояснения относительно объема эманации, растворенной в жидкости. Формулу (5) можно переписать так:

$$\frac{Q_{\text{ж}}}{\alpha V_{\text{ж}}} = \frac{Q_{\text{газ}}}{V_{\text{газ}}}, \quad (9)$$

где $Q_{\text{ж}}$, $Q_{\text{газ}}$ - количество эманации (Бк) в объемах $V_{\text{ж}}$ и $V_{\text{газ}}$.

Если бы мы перевели всю эманацию из жидкости в газ (что эквивалентно $Q_{\text{ж}} = Q_{\text{газ}}$), то объем $V_{\text{газ}}$, который она занимает в этом случае, со-

гласно (9) должен составить $\alpha V_{\text{вод}}$, что и отражено в соотношении (8).

После введения Rn в камеру и перекрытия зажимов начинает происходить накопление его дочерних продуктов распада (тоже α -излучателей), что приводит к увеличению интенсивности α -излучения I во времени (рис.2). Нарастание I зависит от продолжительности введения $t_{\text{пр}}$ эманации в камеру, от формы и размера камеры, типа детектора, поэтому наряду со значением I фиксируют интервал времени $t_{\text{пауз}}$ от момента прекращения прокачки системы до начала измерения скорости следования импульсов.

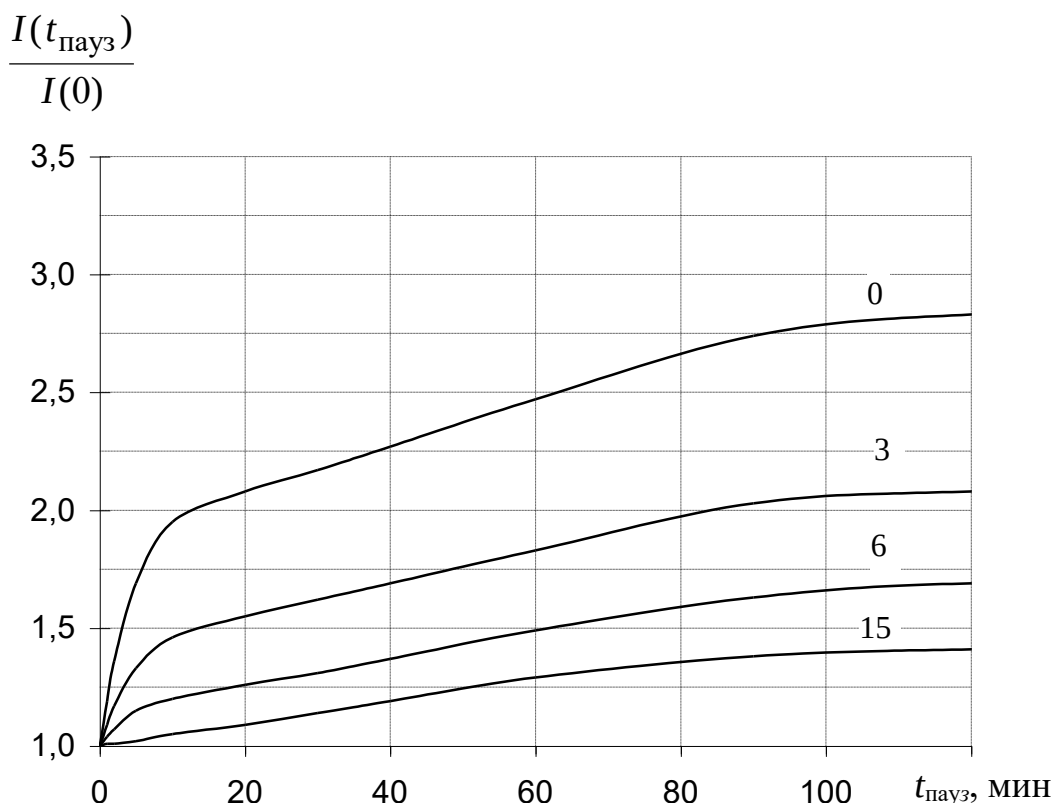


Рис. 2. Коэффициенты нарастания скорости счета импульсов в сцинтилляционной камере в зависимости от интервала $t_{\text{пауз}}$ и продолжительности прокачки системы $t_{\text{пр}}$ в минутах (шифр кривых)

Значение $t_{\text{пр}}$ выбирают одинаковым в процессе анализа проб и при градуировании аппаратуры. Для гидрохимических проб $t_{\text{пр}} = 3-6$ мин. Значение $t_{\text{пауз}}$ в анализах повышенной точности достигает нескольких часов, при изучении лито- и гидрохимических проб - от 3-10 мин до 3 ч.

Для анализа на Rn отбирают 0,2-0,5 л воды (в зависимости от объема барботера) и помещают ее в сосуд, включенный в циркуляционную систему. Желательно произвести эту операцию не позже 4-5 суток после мо-

мента отбора пробы, т.к. если вода не содержит солей Ra, то за этот интервал времени проба может потерять значительную долю активности.

Концентрация Rn в камере после прокачки системы, составляет

$$C_{Rn}^{возд} = \varepsilon I e^{-\lambda t}, \quad (10)$$

где I - скорость счета импульсов в превышении над фоном (имп/мин); ε - градуировочный коэффициент [эман/(имп/мин)]; t - время между отбором пробы и началом ее анализа; λ - постоянная распада Rn:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{3,82 \cdot 24 \cdot 3600} = 2,1 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}. \quad (11)$$

Экспоненциальный множитель в формуле (10) выступает как поправка за распад эманации до начала проведения анализа. Если время t не превышает первых часов, то поправку можно не учитывать.

Количество Rn, циркулирующего в системе составляет

$$Q_{Rn}^{возд} = C_{Rn}^{возд} V_{сист} = \varepsilon I e^{-\lambda t} V_{сист}. \quad (12)$$

Поскольку из водной пробы был извлечен весь радон, то величина

$$C_{Rn}^{вод} = \varepsilon I e^{-\lambda t} \frac{V_{сист}}{V_{вод}} = \varepsilon I e^{-\lambda t} \frac{(V_{возд} + \alpha V_{вод})}{V_{вод}} \quad (13)$$

представляет собой искомую концентрацию Rn в исследуемой пробе.

В случае, когда $V_{возд} \gg \alpha V_{вод}$ и можно пренебречь распадом Rn, формула (13) упрощается:

$$C_{Rn}^{вод} = \varepsilon I \frac{V_{сист}}{V_{вод}} \approx \varepsilon I \frac{V_{возд}}{V_{вод}}. \quad (14)$$

В полевых условиях содержание Rn в высокорadioактивных водах определяют γ -методом. Для этого водой заполняют стандартный сосуд объемом 8-12 л и в нем измеряют интенсивность γ -излучения. Расчет концентрации эманации ведут по формуле:

$$C_{Rn,\gamma}^{вод} = \varepsilon_{\gamma} I_{\gamma}, \quad (15)$$

где I_{γ} - интенсивность γ -излучения в превышении над естественным фоном (пА/кг или мкР/ч); ε_{γ} - градуировочный коэффициент, который при работе с радиометрами серии СРП-68 составляет около 300 Бк/л на 1 пА/кг (5,8 эман

на 1 мкР/ч).

Эманиационная съемка в полевых условиях заключается том, что в определенной точке съемочного профиля производится отбор проб почвенного воздуха с некоторой глубины. Почвенный воздух по соединительной системе с помощью ручного насоса закачивается в эманиационную камеру. После введения пробы воздуха в камеру, с помощью фотоэлектронного умножителя и счетного устройства импульсов определяется количество сцинтилляций, которое пропорционально концентрации R_n в камере. Сцинтилляционный метод применим для анализа проб воздуха, содержащих радон в концентрациях от нескольких десятых долей эмана и выше.

На рис. 3 приведена принципиальная схема эманиационных измерений на одной из точек съемочного профиля в полевых условиях.

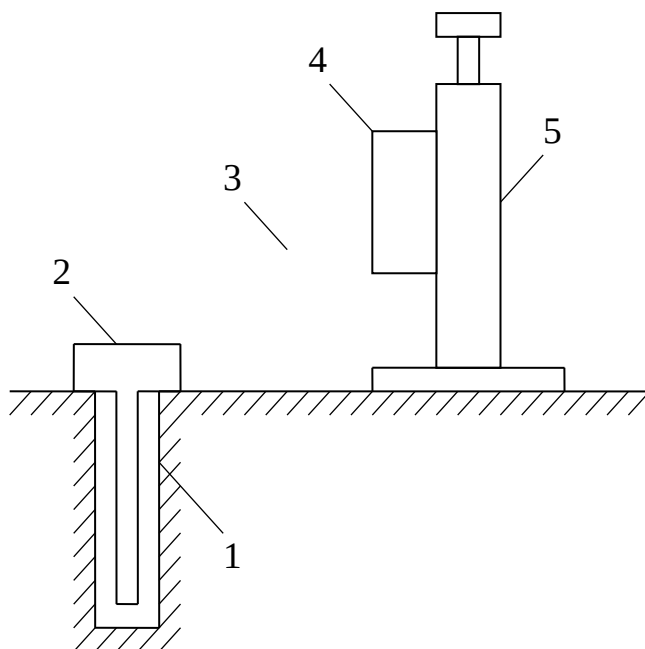


Рис. 3. Схема эманиационных измерений в полевых условиях. Обозначения: 1 – шпур; 2 – пробоотборник воздуха; 3 – соединительный шланг; 4 – эманиационная камера и измерительное устройство; 5 – держатель и ручной насос

2. ПОЛЕВОЙ ЭМАНОМЕТР «РАДОН»

Полевой сцинтилляционный эманометр «Радон» предназначен для определения концентрации R_n в почвенном воздухе при полевой эманиационной съемке и определения R_n в пробах воды. «Радон» может применяться и при дозиметрических измерениях. Эманометр в разных модифи-

кациях выпускался с конца 60-х до середины 80-х годов, когда ему на смену пришел более современный прибор РГА-01 «Глициния».

2.1 Основные технические данные и характеристики прибора

- Диапазон измерения скорости счета импульсов - от 0 до 5000 имп/с с поддиапазонами 50, 250, 1000 и 5000 имп/с.

- Чувствительность прибора после трехчасового накопления продуктов распада Rn при объеме камеры 0,5 л не менее 0,36 эман/(имп/с) при фоне в чистой камере не более 5 имп/мин.

- Прибор устойчиво работает в диапазоне температур 0-40 °С при относительной влажности до 80 %. Дополнительная погрешность прибора, вызванная изменением температуры, не более 10 %.

- Питание прибора осуществляется от шести элементов А-373.

- Дополнительная погрешность, вызванная изменением напряжения питания в пределах 8,1 до 9,9 при номинале 9,0 - не более 15 %.

- Основная погрешность измерений эманометра - не более 30 %.

2.2 Устройство и принцип работы прибора

Эманометр «Радон» состоит из следующих основных блоков: сцинтилляционной камеры, фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), блока питания и стабилизатора напряжения, усилителя импульсов, порогового дискриминатора, интенсиметра α -излучения, электромеханического счетчика (ЭМС) импульсов с секундомером. В комплект эманометра входит также ручной насос для закачки почвенного воздуха, осушитель и соединительные трубки.

Сцинтилляционная камера представляет собой металлический стакан покрытый внутри слоем $ZnS(Ag)$ - веществом, фоточувствительным к ионизирующему воздействию α -частиц. При попадании α -частицы на слой сцинтиллятора возникает световой квант (вспышка света), который, попадая в фотоэлектронный умножитель, в результате фотоэффекта на катоде выбивает из него электрон. Под действием ускоряющего электрического поля напряжением ≈ 600 В фотоэлектрон в дальнейших столкновениях с *динодами* ФЭУ производит лавинообразное умножение заряда, снимаемого с анода в виде короткого (1-5 мкс) импульса напряжения. С выхода ФЭУ импульсы попадают на усилитель и далее - на пороговый дискриминатор, осуществля-

ющий их отбор по амплитуде. С выхода дискриминатора импульсы поступают на ЭМС и аналоговый интенсиметр со стрелочным индикатором, принцип работы которого близок для большинства радиометров.

На панели основного блока эманометра расположены: держатель ФЭУ со съемной сцинтилляционной камерой и металлическими кранами, стрелочный индикатор измерительного прибора (ИП), регулятор порога дискриминации, кнопка СБРОС, переключатель диапазонов измерений (50, 250, 1000, 5000 имп/с), переключатель РОД РАБОТ и разъем для подключения блока ЭМС. На отдельном блоке ЭМС расположены: секундомер (слева), стрелочный индикатор числа зарегистрированных импульсов, тумблер СТОП/ПУСК и переключатель масштабов $\times 1 / \times 2$.

Переключатель рода работ может находиться в следующих положениях: ВЫКЛ - прибор выключен, НБ - проверка напряжения питания батарей, НВ - проверка высокого напряжения питания ФЭУ. ИМП/СЕК - режим измерения скорости счета импульсов с помощью стрелочного индикатора, ЭМС - режим измерения скорости счета импульсов с помощью электромеханического счетчика. При относительно высоких скоростях следования импульсов (более 20 имп/с) используется режим измерения со стрелочным индикатором, при низких скоростях - режим ЭМС.

ВНИМАНИЕ! Категорически запрещается использовать режим ЭМС при скорости счета 30 имп/с и более - это может привести к выходу счетчика из строя!

2.3 Подготовка прибора и измерительной установки к работе

Подготовка прибора начинается с зарядки батарей в отсек питания и проверки напряжения питания с помощью переключателя рода работ (положение НБ). При правильной работе блока питания стрелка измерительного прибора должна находиться во второй половине шкалы.

ВНИМАНИЕ! Включение прибора в режим измерений возможно только с установленной эманационной или контрольной камерой! В противном случае может произойти засветка ФЭУ и выход его из строя.

Далее производится проверка высокого напряжения ФЭУ: при переключателе рода работ НВ стрелка ИП должна отклоняться не менее чем на

16 делений шкалы. Если этого не происходит, то необходимо подождать 3-5 минут пока не установится рабочий режим ($\approx 18-20$ делений).

С помощью контрольной камеры проверяется чувствительность прибора и правильность установки порога дискриминации. С этой целью на поддиапазоне не ниже 250 снимается зависимость скорости счета импульсов от положения порога дискриминации. В некотором диапазоне шкалы регулятора порога должно наблюдаться «плато» - незначительное изменение скорости счета. Регулятор порога устанавливается примерно в середину этого «плато». Если «плато» не наблюдается, то положение порога фиксируется исходя из паспортных значений чувствительности эманометра, измеренных с помощью контрольной камеры на разных диафрагмах.

Непосредственно перед началом измерений концентрации R_n необходимо проверить работоспособность эманационных камер и оценить их собственный фон. Камера считается пригодной к работе если фон не превышает 30-40 имп/мин. Дочерние продукты распада R_n , оседая на стенках сцинтилляционной камеры, могут вызвать ее радиационное загрязнение. Поэтому после измерений высокоактивных проб рекомендуется заменить камеру и не использовать ее до тех пор, пока фон не снизится до нормального уровня (за счет проветривания и распада радионуклидов).

Подготовка установки для измерения концентраций R_n в воде заключается в сборе циркуляционной системы (рис. 4.1, б). Перед подключением соединительных трубок к эманационной камере краны K_{1-2} должны быть обязательно закрыты во избежание попадания эманации в детектор до начала измерений. Следует также проверять герметичность системы в целом и отсутствие в ней утечек воздуха. Следует обратить внимание на направление подключения груши, в противном случае при прокачке вместо воздуха в камеру может попасть вода и вывести прибор из строя.

2.4 Градуирование прибора

Градуирование эманометра заключается в нахождении значения коэффициента ε . С этой целью 1-2 раза в месяц проводят измерения скорости счета импульсов на стандартных образцах (СО). В качестве СО используют помещенный в барботер раствор соли R_a массой m_{Ra} (г). Для удаления R_n сосуд с радиевым раствором продувают воздухом, плотно закрывают, момент герметизации фиксируют на этикетке СО. Время накоп-

ления Rn берут $t > 3$ суток.

Собирают циркуляционную систему (рис. 1, б), следя за тем, чтобы зажимы Z_{1-2} и краны K_{1-2} были закрыты. Далее измеряют фон камеры $I_{\text{ф}}$ (имп/мин) за время $t_{\text{изм}} = 3$ мин. После этого открывают зажимы Z_{1-2} , краны K_{1-2} и начинают прокачку воздуха в течении $t_{\text{пр}} = 3$ мин. Прокачку системы ведут в темпе, при котором в воде наблюдаются отдельные пузырьки воздуха, следующие друг за другом со скоростью около 300 в мин.

Затем камеру закрывают и в течении нескольких часов через каждые 3 мин фиксируют показания прибора, настроенного на заданную чувствительность (порогом дискриминации), и строят кривую нарастания I (за вычетом фона) во времени.

Градуировочный коэффициент ε в эман/(имп/мин) для момента времени $t_{\text{пауз}} = 3$ мин (значительная часть $T_{\text{п}}$ уже распадется) после прокачки воздуха вычисляют по следующей формуле:

$$\varepsilon = \left(1 - e^{-\lambda t}\right) \frac{C_{\text{Rn}}^{\text{возд}}}{I(t_{\text{пауз}})}, \text{ или} \quad (16)$$

$$\varepsilon = \left(1 - e^{-\lambda t}\right) \frac{m_{\text{Ra}} \cdot 10^{10}}{(V_{\text{возд}} + \alpha V_{\text{вод}}) I(t_{\text{пауз}})}, \quad (17)$$

где $I(t_{\text{пауз}})$ - показания прибора, определяемые на графике для интервала времени $t_{\text{пауз}}$, принятого в процессе анализа проб.

Пример. Имеем эталон Ra массой $m_{\text{Ra}} = 8,55 \cdot 10^{-9}$ г и следующие режимы анализа: $t_{\text{пр}} = 3$ мин, $t_{\text{изм}} = 3$ мин, $t_{\text{пауз}} = 3$ мин. Параметры системы: $V_{\text{к}} = 0,5$, $V_{\text{ос}} = 0$, $V_{\text{г}} = 0,3$, $V_{\text{с}} = 0,5$, $V_{\text{т}} = 0,05$, $V_{\text{вод}} = 0,4$ (все в л), фон камеры $I_{\text{ф}} = 37$ имп/мин, температура $T_{\text{возд}} = 20$ °С. Эталон прокачен 72 ч назад, т.е. $t = 3$ сут.

Измеренная скорость счета импульсов на эталоне составила 1167 имп/с. После вычета фона $I(t_{\text{пауз}}) = 1167 - 37 = 1130$ имп/мин.

$$V_{\text{возд}} = V_{\text{к}} + V_{\text{ос}} + V_{\text{г}} + V_{\text{т}} + V_{\text{с}} - V_{\text{вод}} = 0,95 \text{ л.}$$

$$V_{\text{сист}} = V_{\text{возд}} + \alpha V_{\text{вод}} = 0,95 + 0,2 \cdot 0,4 \approx 1 \text{ л.}$$

$$1 - \exp(-\lambda t) = 1 - \exp(-0,693 \cdot 3/3,82) = 0,42.$$

$$\varepsilon = 8,55 \cdot 10^{-9} \cdot 10^{10} \cdot 0,42 / (1 \cdot 1130) = 0,032 \text{ эман/(имп/мин).}$$

При проведении градуирования аппаратуры особо тщательно следует следить за тем, чтобы раствор радия не попал внутрь эманационной ка-

меры. Последствия радиационного заражения эманометра крайне неприятны: необходимо полностью разобрать прибор, тщательно промыть каждую деталь. Зараженная камера не пригодна к дальнейшим измерениям.

3. ПРОГРАММА ИЗМЕРЕНИЙ

Задание:

1. Ознакомиться с элементами теории эманационных методов (раздел 1).
2. Ознакомиться с эманометром «Радон», его назначением и основными техническими характеристиками. Подготовить прибор и измерительную установку к работе (раздел 2).
4. Произвести градуировку эманометра в соответствии с описанием, приведенном в разделе 2.4 (выполняется строго под руководством преподавателя).
5. Отобрать пробы воды из разных источников и выполнить измерения концентраций Rn в соответствии с программой измерений (раздел 3).
6. Сделать выводы о соответствии нормам радиационной безопасности исследованных водных источников и возможной природе выявленных аномалий.
7. Ответить на контрольные вопросы (раздел 4).

Материалы, оборудование:

1. Эманометр «Радон» с контрольной камерой, комплект из 6 батарей питания к нему (А-373, «Орион»).
2. Набор сцинтилляционных эманационных камер объемом 0,5 л.
3. Эталонный водный раствор соли радия ($10^{-7} \div 10^{-9}$ г Ra).
4. Специальные сосуды для отбора водных проб (барботеры).
5. Соединительные резиновые трубки, груша для прокачки воздуха, стеклянные трубки, осушительная камера.
6. Калькулятор, журнал измерений, карандаш, резинка.

Отбор водных проб выполняется в следующем порядке:

1. Сосуды для отбора проб (барботеры) моются, желательно в речной или озерной воде, после чего сушатся. На барботеры наклеиваются этикетки из лейкопластыря для записи даты, времени и места отбора проб.

2. Отбор проб производится из водоемов, колодцев, родников, водопроводных кранов, скважин и других источников в объеме 0,3-0,35 л (сосуды емкостью 0,5 л) и 0,5-0,6 л (емкость 1 л). Из водоемов и колодцев отбираются пробы $V = 0,5-0,6$ л, из скважин и родников - $V = 0,3-0,35$ л.

3. Если вода набирается из крана, то струя воды должна бежать свободно, БЕЗ НАПОРА и пузырьков воздуха. Воду следует наливать аккуратно, так, чтобы она бежала по стенке сосуда и не плескалась на дне. Эти предосторожности гарантируют сохранность растворенного в воде Rn .

4. Сразу же после заполнения барботера водой (примерно до середины) его следует герметично закрыть, для чего зажимаются или перевязываются резиновые соединительные трубки. Пробка барботера плотно зажимается винтовым механизмом, причем следует контролировать силу зажима - стеклянные трубки внутри сосуда не должны расколоться.

5. На этикетке сосуда записывается время t_0 и место отбора пробы.

Подготовка прибора и измерительной установки к работе выполняется в соответствии с разделом 4.2.3, градуирование - по указанию преподавателя.

Выполнение измерений концентрации Rn производят так:

1. Собирают циркуляционную систему (рис. 1, б), следя за тем, чтобы зажимы Z_{1-2} и краны K_{1-2} были закрыты.

2. Измерят фон камеры I_f (имп/мин) за время $t_{изм} = 3$ мин. С этой целью переключатель рода работ устанавливают в положение ЭМС. В исходное состояние сбрасываются секундомер и ЭМС. Пересчетный коэффициент ЭМС устанавливают в положение $\times 2$ (регистрируется каждый второй импульс). Для начала измерений необходимо одновременно запустить секундомер и включить переключатель ПУСК счетчика импульсов. Далее следят за секундомером, так как счетчик автоматически не останавливается после истечения времени $t_{изм}$. По истечении заданной экспозиции переключатель переводят в положение СТОП.

3. Открывают зажимы Z_{1-2} , краны K_{1-2} и начинают прокачку воздуха в течении $t_{пр} = 3$ мин. Прокачку системы ведут в темпе, при котором в воде наблюдаются отдельные пузырьки воздуха, следующие друг за другом со скоростью около 300 в мин.

4. После прокачки воздуха краны K_{1-2} закрывают и выжидают некоторое время $t_{пауз} = 3$ мин, чтобы активность радона в камере немного увеличилась, а торона - значительно уменьшилась.

5. Записывают в журнал время начала анализа t_1 . Проводят измерения скорости счета импульсов I (имп/мин) в течении времени $t_{изм} = 3$ мин аналогично п.2.

6. Вычисляют концентрацию Rn в водной пробе по формуле:

$$C_{Rn}^{вод} = \varepsilon k (I - I_{\phi}) \frac{V_{сист}}{V_{вод}} \exp \left[-\frac{\ln 2}{3,82} (t_1 - t_0) \right], \quad (18)$$

где k - пересчетный коэффициент счетчика, для нашего случая $k = 2$.

В формуле (18) время отбора t_0 и начала анализа t_1 - в сутках. Если $t_1 - t_0 < 0,2$ сут, то вместо (18) используется более простая формула:

$$C_{Rn}^{вод} = \varepsilon k (I - I_{\phi}) \frac{V_{сист}}{V_{вод}}. \quad (19)$$

При вычислениях принять:

$$V_{сист} = V_{возд} + \alpha V_{вод}, \alpha = 0.2;$$

$$V_{возд} = V_{к} + V_{ос} + V_{г} + V_{т} + V_{с} - V_{вод}.$$

$$V_{к} = 0,5 \text{ л}, V_{ос} = 0,2 \text{ л}, V_{г} = 0,3 \text{ л}, V_{т} = 0,05 \text{ л}, V_{с} = 0,5 \text{ или } 1,0 \text{ л}.$$

Объем воды $V_{вод}$ в барботере определяют по оцифрованной шкале.

В процессе измерений рекомендуется вести следующую форму лабораторного журнала:

Прибор № _____ Оператор _____
 $t_{пр} =$ _____ $t_{пауз} =$ _____ $t_{изм} =$ _____
 $k =$ _____ $\varepsilon =$ _____ эман/(имп/мин)

	Место отбора пробы воды	t_0 , сут	t_1 , сут	I_{ϕ} , имп	I , имп	$I - I_{\phi}$, имп	$V_{вод}$, л	$V_{возд}$, л	$\frac{V_{сист}}{V_{вод}}$	C_{Rn} , эман
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Примечание. Если градуирование не проводится, то значение пересчетного коэффициента ε принимается равным 0,05 эман/(имп/с).



Рис. 4.4. Процесс измерения концентрации радона в водных пробах, отобранных в разных точках Верх-Сысертского участка

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сущность, цели и задачи эманационной съемки.
2. Радиоактивные газы и их краткая характеристика.
2. Глубинность эманационных методов (отдельно по R_n и T_n).
3. По какой формуле можно оценить концентрацию радона в поровом пространстве горной породы?
4. Единицы измерения концентрации эманаций и их соотношение.
5. Закон Генри. Зависимость коэффициента Генри от температуры.
5. Способы анализа концентрации эманаций в воздухе и в воде.
6. Полевой эманометр «Радон» и его краткая характеристика.
7. На каком физическом эффекте основан метод определения концентрации радиоактивных газов прибором «Радон»?
7. Устройство эманометра «Радон» и подготовка его к работе.
8. Порядок градуирования эманометра «Радон».
9. Порядок отбора и анализа содержания R_n в водных пробах.
10. Почему после ввода R_n в сцинтилляционную камеру скорость счета импульсов увеличивается с течением времени?
11. Если спустя несколько суток после отбора водной пробы ее α -активность не изменилась, то какой Вы можете сделать вывод?
12. Назовите физические предпосылки для раздельного определения концентраций радона, торона и актинона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Возжеников Г.С., Бельшев Ю.В.* Радиометрия и ядерная геофизика: Учебное пособие. - Екатеринбург: Изд. УГГУ, 2011.
2. *Гонсалес А.Х., Андерс Ж.* Естественные и искусственные источники излучения. В кн.: Ядерная энергия в будущем. МАГАТЭ, 1989. Т. 31, № 2.
3. *Жуковский М. В.* Радон: измерение, дозы, оценка риска. - Екатеринбург: ИПЭ, 1997.
4. *Крисюк Э.М.* Радиационный фон помещений. М.: Энергоатомиздат, 1989.
5. *Нефёдов В.Д.* и др. Радиохимия. – М: Высшая школа, 1985.
6. Радиация: Дозы, эффекты, риск. Пер. с англ. - М.: Мир, 1998.
7. *Смыслов А.А., Максимовский В.А., Харламов М.Г.* и др. Радон в земной коре и риск радоноопасности // Разведка и охрана недр. 1995. № 5.
8. *Титов В.К., Лучин И.А., Лашков Б.П.* Радон в почвах и зданиях - Л.: Рудгеофизика, 1991.
9. *Уткин В.И.* Газовое дыхание Земли // Соросовский образовательный журнал. – М., 1997. – № 1.
10. *Уткин В. И.* Радоновая проблема в экологии. // Соросовский образовательный журнал. – М., 2000. - том 6, № 3.

Учебное издание

Александрова Жанна Николаевна
Белышев Юрий Владимирович

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Учебно-методическое пособие
к практическим занятиям и самостоятельной работе
по дисциплине «Радиационная безопасность» для студентов
специализаций «Геофизические методы исследования скважин» и
«Геофизические методы поисков и разведки МПИ»
специальности 21.05.03 – «Технология геологической разведки»
очной и заочной формы обучения

Часть 3
Определение радона в воде

Редактор _____
Компьютерная верстка автора

Подписано в печать ____ . ____ . 2018 г.
Бумага писчая. Формат 60 х 84 1/16.
Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Печ. л. _____. Уч.-изд. л. _____. Тираж 100. Заказ _____

Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Уральский государственный горный университет
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»



В. М. Сапожников

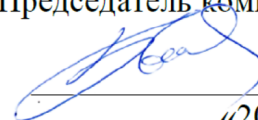
КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Учебное пособие
по дисциплине «Комплексирование геофизических методов»
для студентов специальности
21.05.03 Технология геологической разведки
специализации «Геофизические методы поиска и разведки
месторождений полезных ископаемых»

Екатеринбург – 2020

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

ОДОБРЕНО
методической комиссией
факультета геологии и геофизики
Председатель комиссии



В. И. Бондарев
«20» марта 2020 г.

В. М. Сапожников
**КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ
ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ**

Учебное пособие
по дисциплине «Комплексирование геофизических методов»
для студентов специальности
21.05.03 Технология геологической разведки
специализации «Геофизические методы поиска и разведки
месторождений полезных ископаемых»
очной, заочной и дистанционной форм обучения

Екатеринбург
2020

Рецензент: *Виноградов А. М.*, д-р. геол.-минер. наук,
ведущий научный сотрудник Института геофизики УрО РАН;
Голиков Ю. В., д-р. геол.-минер. наук,
Уральский государственный горный университет.

Печатается по решению Редакционно – издательского совета
Уральского государственного горного университета

Сапожников В. М.

Комплексирование геофизических методов: учебное пособие / В. М. Сапожников;
Уральский гос. горный ун-т.-Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2020. – 76 с.

Учебное пособие представляет несколько сокращенный конспект лекций по дисциплине №Комплексирование геофизических методов» для специальности 21.05.03 Технология геологической разведки специализации «Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых» (РФ). В учебное пособие вошла та часть курса, которая посвящена поискам твердых полезных ископаемых и наиболее востребована при подготовке дипломных проектов большей частью студентов специальности РФ.

В пособии рассматриваются общие положения методологии планирования и проведения комплексных геофизических исследований преимущественно в рудных провинциях. Особое внимание уделено выявлению тектонических нарушений различного масштаба, которые являются контролируемыми, подводящими и распределяющими элементами рудоносных структур. Формирование и результативность комплекса при поисках рудных объектов показана на примере уранового месторождения, поскольку типовые комплексы для решения структурно-картировочных и поисковых задач на различные твердые полезные ископаемые подробно рассмотрены в специальной справочной литературе.

Учебное пособие предназначено для студентов специальности РФ очного и заочного обучения. Отдельные разделы могут быть полезны студентам других геофизических и геологических специальностей, которым разведочная геофизика дается в сокращенном виде. Пособие может быть полезным аспирантам, магистрам и работникам производственных организаций, применяющих геофизические методы.

Автор выражает благодарность инженеру кафедры геофизики Г. А. Косаревой, взявшей на себя труд по оформлению рисунков и окончательной компоновки пособия.

Рис. 23 Библ. 13 наим.

© Уральский государственный
горный университет, 2020

Введение

Курс «Комплексирование геофизических методов» завершает подготовку студентов-геофизиков к профессиональной деятельности. В курсе на основе знаний по отдельным геофизическим методам с их достоинствами и ограничениями дается представление о решении типовых геологоразведочных задач путем комплексирования нескольких методов с целью получения совокупности данных существенно расширяющих возможности геофизических исследований недр.

С необходимостью применить знания по комплексированию геофизических методов студенты сталкиваются еще на стадии обучения в вузе в период дипломного проектирования и это умение оценивается государственной аттестационной комиссией по итогам защиты учебного проекта по решению картировочной или поисково-разведочной задачи. Выпускник кафедры геофизики должен показать умение сформировать и обосновать рациональный комплекс методов в конкретной геологической среде.

Представленный курс лекций в основном ориентирован на изложение методик выявления и изучения месторождений твердых полезных ископаемых. Именно эти объекты являются главными для специальности РФ. Что касается комплексирования геофизических методов при поисках месторождений нефти и газа, то по этой теме издан конспект лекций доцента вуза Г. Г. Кассина.

Методология комплексирования геофизических методов сформировалась к началу 80-х годов прошлого столетия, когда появились специальные монографии, учебники и справочники, обобщающие теоретические положения и опыт комплексирования. В числе специалистов, внесших существенный вклад в формирование и пропаганду технологии комплексирования методов разведочной геофизики, следует назвать Г. С. Вахромеева, В. В. Бродового, А. А. Никитина, В. К. Хмелевского.

Впервые курс по комплексированию геофизикам в нашем вузе начал читать профессор Н. А. Иванов. Несколько лет этот курс читал доцент, а затем профессор А. Я. Ярош. Проблеме комплексирования геофизических методов главным образом при поисках руд посвятили свои докторские диссертации Г. П. Саковцев, ставший впоследствии ректором нашего вуза, и выпускник кафедры геофизики Г. С. Вахромеев. Последним на эту тему опубликована монография. К настоя-

щему времени по курсу комплексирования издано несколько вариантов учебников и справочников. Основные из них приведены в списке использованной литературы.

В настоящем конспекте помимо классических положений, отраженных в известных источниках, автор приводит некоторые свои разработки и сведения, которые могут оказаться полезными в процессе выбора и обоснования комплекса геофизических методов.

1. ПРЕДПОСЫЛКИ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

При изучении теории и практики применения отдельных геофизических методов, которым посвящены специальные учебные курсы разведочной геофизики, обучающиеся знакомятся не только с достоинствами методов, но и их ограничениями при исследовании многообразных и сложных геологических сред. Практически всегда перед геофизическими методами ставится задача по изучению одиночных или комплекса объектов в некоторой вмещающей среде. И в общем случае ограниченные возможности одного метода делают невозможным без дополнительной информации определить природу геологических тел, признаки, существования которых выявляются в процессе измерений. Даже, если наличие определенного объекта установлено, бывает сложно определить требуемые для его оценки характеристики.

Одной из основных причин необходимости применения комплекса геофизических методов является неоднозначность истолкования наблюдаемого поля, следовательно, и неопределенность конечных геологических выводов. В качестве примера обратимся к рис. 1, на котором видно, что близкие по виду положительные локальные аномалии поля силы тяжести (Δg), наблюдаются над разнообразными геологическими объектами относительно повышенной плотности (интрузии, руды). Поэтому по данным гравиметрии можно лишь установить факт увеличения плотности, каких-то горных пород на изучаемом участке, но нельзя определить геологическую причину нарушения однородности среды и объективно охарактеризовать аномалиеобразующий объект.

При решении поисковой задачи нередко возникает проблема классификации аномалий, которые по признакам похожи на те, которые характерны для искомого объекта. Часто среди выявленных аномалий встречаются такие, которые вызваны геологическими телами, не представляющими поискового интереса. Их создают неоднородности, относимые к классу геологических помех. На примере рис. 1 видно, что при поисках залежей руд с повышенной плотностью, аномалии над разрезами *а*, *б* и *г* можно связывать с проявлением геологических помех. В рассмотренном примере для снижения или даже исключения неоднозначности в истолковании зафиксированных ано-

малый существенную помощь могло оказать применение электрического зондирования.

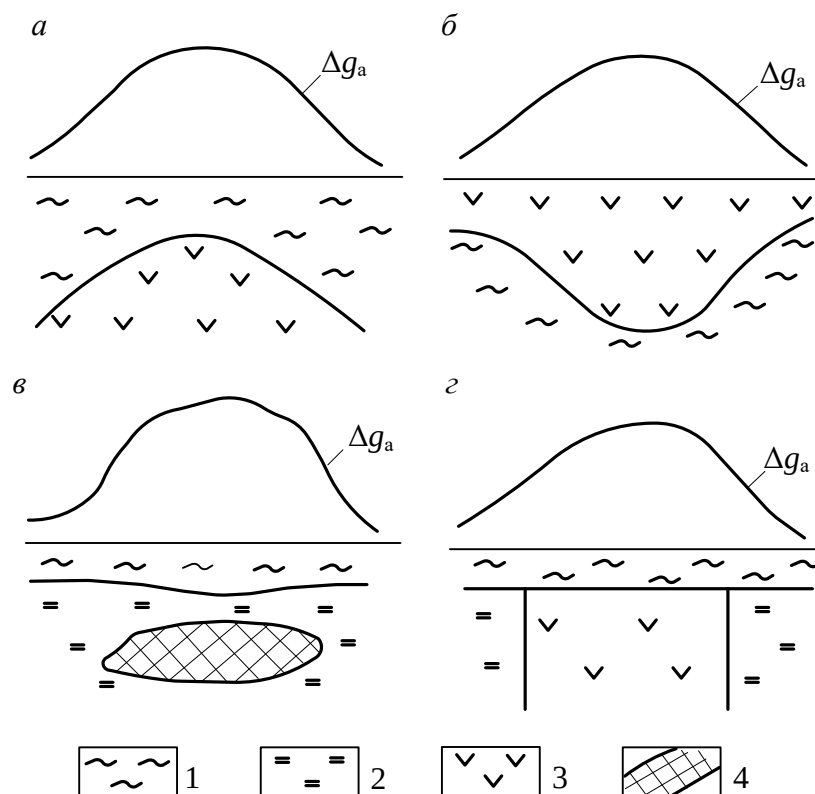


Рис. 1. Пример проявления однотипных аномалий силы тяжести над разнообразными геологическими разрезами: породы: 1 – глинистые; 2 – гидротермально измененные; 3 – магматические; 4 – руды

Перед геофизическими методами, отличающимися высокой производительностью и возможностью дистанционно изучать земные недра, ставятся задачи по определению качественных и количественных характеристик изучаемых объектов. Например, по данным промысловых геофизических исследований скважин необходимо провести литологическое расчленение разреза, выделить пласты-коллекторы, определить их фильтрационно-емкостные свойства, характер насыщения, а для продуктивных пластов – установить коэффициент нефтегазонасыщенности. Такое многообразие требуемых характеристик приводит к необходимости применять солидный комплекс геофизических методов, нередко превышающий десяток наименований.

Во многих случаях из-за влияния факторов, осложняющих условия наблюдения, приходится применять разнотипные методы определения одной и той же физико-геологической или геометрической характеристики объекта. Например, для определения пористости коллекторов в одной скважине применяют три разнотипных геофизических метода: ГГК-П, НК и АК, которые контролируют результаты друг друга. В крайнем случае, ограничиваются какими-то двумя методами.

Природу аномалиеобразующих объектов иногда можно определить, используя несколько модификаций одного и того же метода, отличающихся глубиной исследования. В качестве примера можно привести двухразное электропрофилирование или двухзондовый микрокаротаж.

При проектировании и применении геофизических методов ответственным моментом является их разделение на основные и вспомогательные – детализационные методы. Первыми изучается все намеченное геологическое пространство, а вторые применяются лишь на отдельных участках, как наиболее перспективных по данным основных методов.

Таким образом, комплексирование геофизических методов проводится с целями выявить и надежно классифицировать неоднородности геологической среды. Среди общего числа аномалий необходимо выделить те из них, которые обусловлены объектами, представляющими первоочередной интерес. Следует определить качественные и количественные характеристики геологических образований, и, в первую очередь, тел полезных ископаемых, требуемые для оценки их ценности, проектирования дальнейшей разведки и условий добычи.

2. НОРМАЛЬНОЕ ПОЛЕ И ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ. НЕКОТОРЫЕ СПОСОБЫ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

При проведении геофизических работ приходится оперировать понятиями нормального поля и геофизической аномалии. И хотя способы их определения в различных методах могут существенно различаться, основные принципы в этих способах являются общими. Это связано с тем, что задачей геофизических исследований является выявление и классификация неоднородностей в геологической среде.

Нормальное поле

Это такое физическое поле условно однородной геологической среды, которое существовало бы в случае отсутствия объектов, нарушающих однородность этой среды. Например, за нормальное в гравиразведке принимают поле силы тяжести условно однородного сфероида Земли, поверхность которого совпадает с уровнем океанов. Это поле определяют исходя из координат точки наблюдения по широте и долготе с учетом значения поля на экваторе. Для уточнения в это поле вносят поправку Буге, учитывающую влияние толщины и плотности промежуточного (между точкой наблюдения и уровнем океана) слоя.

В магниторазведке также рассчитаны карты нормального поля Земли, которое на ограниченной площади принимают за постоянное значение. Его определяют в соответствии с географическим положением этой площади на материке или в море. В методе радиоволнового просвечивания (РВП) нормальное электромагнитное поле вычисляют с учетом паспортной для передатчика начальной напряженности, геометрии (взаимного расположения элементов) установки и коэффициента поглощения поля (α_k) условно однородной среды (рис. 2).

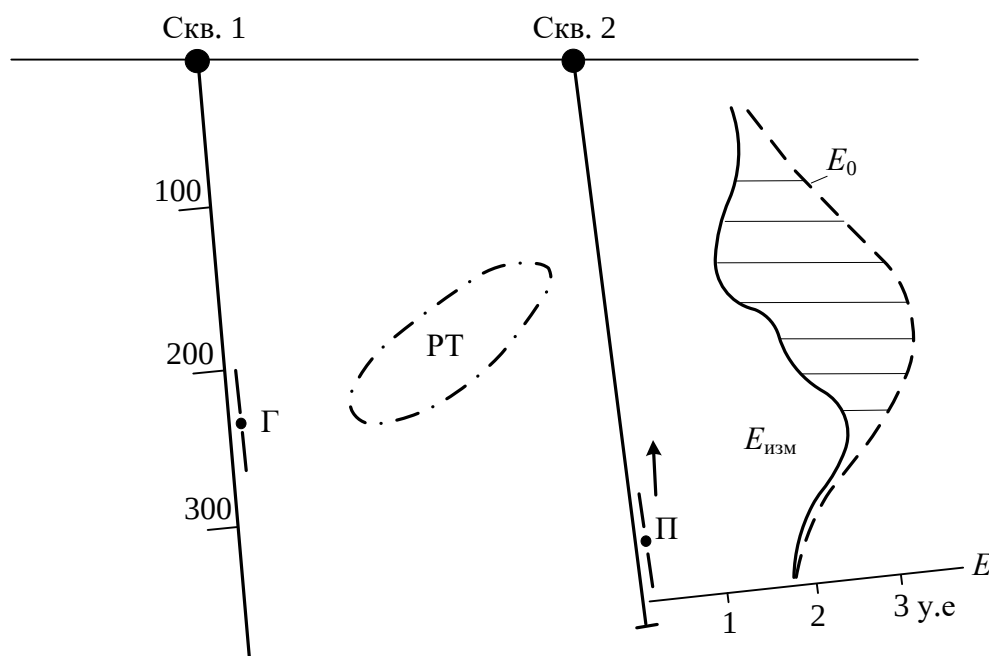


Рис. 2. Пример сопоставления напряженности измеренного ($E_{изм}$) и вычисленного нормального (E_0) поля в методе радиоволнового просвечивания

Г – генераторная антенна; П – приемная антенна; РТ – рудное тело

Похожий подход к определению нормального поля применяют в методе заряда, выражая это поле в виде функции от расстояния точки наблюдения до эпицентра погруженного источника тока. Эту функцию рассчитывают аналитически или определяют стохастическим способом по измеренному полю [13].

В методах, изучающих искусственно возбуждаемые поля, в качестве нормального иногда принимают некоторые обоснованные постоянные значения поля или в виде некоторого диапазона значений с верхним и нижним пределами.

В общем случае нормальным считается поле, обусловленное однородной по конкретному физическому параметру геологической средой. В некоторых случаях условно однородная среда может представлять какую-то структуру, например, горизонтально-слоистое полупространство, измеряемая характеристика поля над которым остается постоянной или изменяется по установленному закону. Принимаемая однородность среды зависит от масштаба исследований. При средне- и крупномасштабных съемках используют понятие о местном нормальном поле, отражающем стохастический подход к его определению.

Стохастический способ определения нормального поля

В методах, изучающих на ограниченной площади естественные физические поля или искусственно возбуждаемые поля при постоянном размере установки (магниторазведка, радиометрия, электропрофилирование и др.), в качестве фона (местного нормального поля) принимают некоторые постоянные значения, характерные для условно однородной геологической среды, которая рассматривается в качестве фонового объекта. Это может быть массив горных пород, горизонтально-слоистая толща или другая структура, характеристики поля для которой по показаниям применяемой установки в идеале должны сохраняться постоянными.

В реальной геологической обстановке в случае наличия такой структуры на результаты геофизических наблюдений влияет масса случайных факторов: мелкая неоднородность физических свойств фонового объекта, изменения геометрии его элементов, рельеф местности и т.п. В этих условиях перспективно использовать стохастический (вероятностно-статистический) подход к определению фона.

Простейшим примером служит статистическое определение коэффициента поглощения в методе РВП, который определяется по не-

скольким значениям, вычисленным на участках трассы измерений, не имеющих признаков экранирования поля генератора проводниками в межскважинном пространстве. Этот коэффициент для изучаемого разреза принимается как постоянная величина и используется при вычислении нормального поля.

Профильная съемка. В более общем случае, как это показано на рис. 3, а на примере профилирования методом вызванной поляризации (ВП) с установкой постоянного размера, исходными являются данные измерений на участке, для которого имеются основания отнести поле на нем к условному фону. Как видно из рис. 3, а, значения кажущейся поляризуемости (η_k) на профиле изменяются в определенных пределах. Для объективного отражения изменчивости поля строится дифференциальная кривая распределения анализируемой характеристики с учетом закона, принимаемого для статистически однородной совокупности этой характеристики. В случае η_k распределение хорошо описывается нормальным законом Гаусса. Построение распределения ведется с применением линейной шкалы с разбивкой диапазона измеренных значений на равные интервалы (классы). Ось ординат отражает частоту появления при измерениях значений поля для каждого из классов (соответствует середине класса) и принимается в штуках или процентах (рис. 3, б). Для характеристики фона желательно иметь не менее 30 измерений.

При ограниченном объеме выборки для построения детальной кривой распределения в статистике применяют прием, предусматривающий использование второй шкалы значений поля. Ширина классов остается прежней, но их границы смещаются относительно первой шкалы на половину класса. Использование дополнительной шкалы позволяет в 2 раза увеличить число точек, по которым строится распределение, не уменьшая ширину класса.

Значение поля A , встречающееся с максимальной частотой (мода), которое при нормальном законе распределения совпадает со средним и медианой, принимают в качестве центрального значения – $\bar{A}_0$ (в рассматриваемом примере изучения поляризуемости $\bar{\eta}_{k0} = 2.5 \%$).

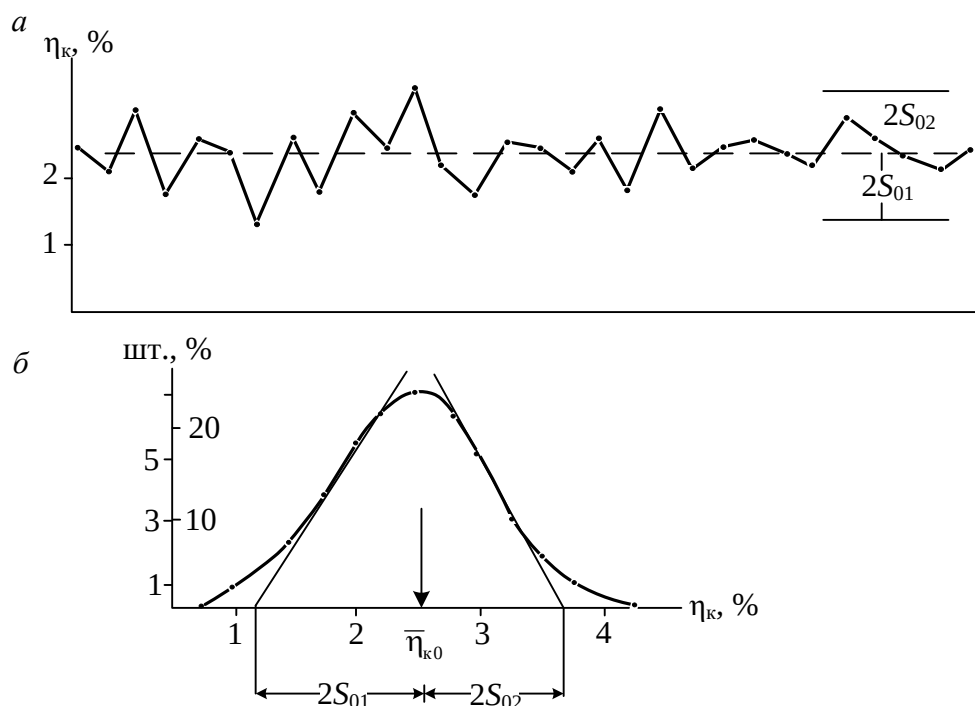


Рис. 3. Графики измеренных значений кажущейся поляризуемости (η_k) методом ВП по профилю в пределах фонового объекта (а) и дифференциальная кривая распределения значений η_k для этого профиля, по которой определяются стохастические характеристики фона (б)

Для характеристики рассеивания значений относительно центрального используют среднеквадратичное отклонение – S_0 . В теории вероятности ему соответствует стандартное отклонение (стандарт). Для его определения к ветвям кривой распределения проводятся две наклонных касательных (рис. 3, б). Согласно теории точки пересечения касательных с осью абсцисс смещены от центрального значения на величины $\pm 2S_0$, а расстояние между точками пересечения равно $4S_0$. В рассматриваемом примере $S_0 = 0,63\%$.

При упрощенном способе искомые характеристики определяют графически по графикам измеренного поля на фоновом объекте. Осредняющая график прямая соответствует значению $\bar{A}_0$, а величина S_0 определяется по диапазону изменения фона, который приблизительно равен $4S_0$. На рис. 3, а этот диапазон отмечен ограничивающими линиями (в правой части рисунка).

Статистические характеристики нормального поля с распределением по закону Гаусса могут быть вычислены и аналитическим пу-

тем. Центральное значение вычисляется как среднее для n рядовых (i) измерений: $\bar{A}_0 = \Sigma A_{0i}/n$, а величина S_0 определяется по формуле

$$S_0 = \left[\sum_{i=1}^n (A_{0i} - \bar{A}_0)^2 / n \right]^{1/2} \quad (1)$$

По результатам оценки статистических характеристик нормального поля его диапазон с надежностью 95 % принимают равным:

$$A_0 = \bar{A}_0 \pm 2 S_0. \quad (2)$$

Очевидно, что все величины поля, попадающие в этот диапазон, могут рассматриваться как значения фона. По результатам измерений, приводимых на рис. 3, значения в интервале 1.24-3.74 относятся к фоновым характеристикам поля.

При известной величине S_0 к аномальным с надежностью 95 % относятся значения поля, отвечающие условиям: меньше $(\bar{A}_0 - 2S_0)$ или больше $(\bar{A}_0 + 2S_0)$.

Метод заряда. Исходными данными являются значения относительного потенциала, измеренные по некоторой сети, причем для нее известны координаты точек наблюдения, позволяющие определить расстояние от каждой точки до эпицентра заряда. В примере (рис. 4), иллюстрирующем применение способа, результаты съемки поля заряда в рудное пересечение скважины 1 представлены в виде плана изолиний потенциала.

Наиболее распространенной моделью вмещающей среды в этом методе является однородное изотропное или горизонтально-слоистое полупространство. Для реализации способа определения нормального поля на планшете съемки намечаются 6-8 радиальных профилей с началом в эпицентре заряда O . На одном чертеже строят графики измеренного потенциала (U) для этих радиальных профилей как функции расстояния (r) от точки O и проводят осредняющую их кривую U_{cp} . Кривая U_{cp} и рассматривается в качестве функции нормального потенциала $U_0(r)$. Естественно эту процедуру можно выполнить аналитически по простейшей программе осреднения.

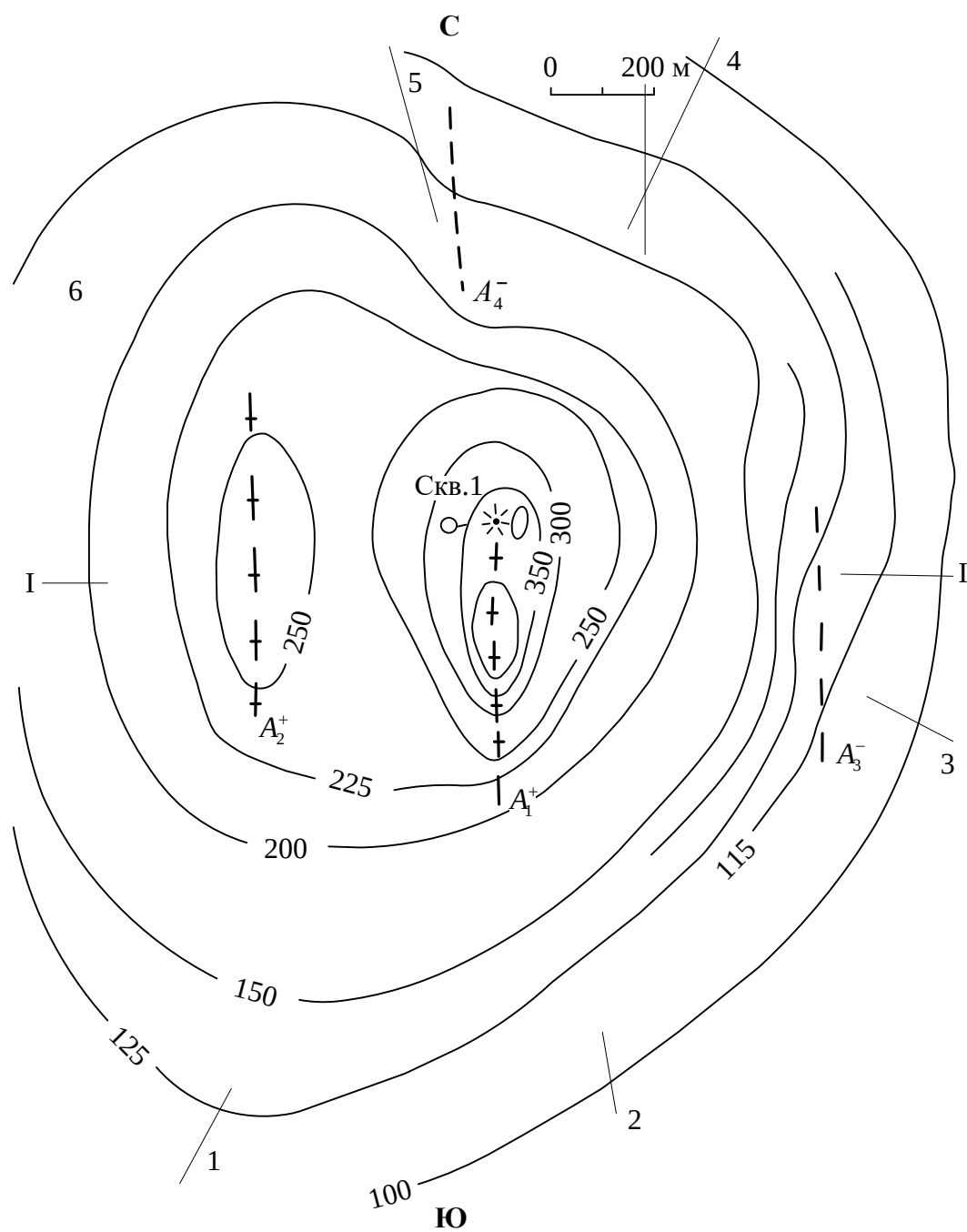


Рис. 4. План изолиний потенциала (в мВ) поля заряда, сделанного в рудное пересечение скв.1:

A^+ , A^- - оси положительных и отрицательных аномалий, 1-6 – радиальные профили, O – эпицентр заряда; I – I – линия геологического разреза

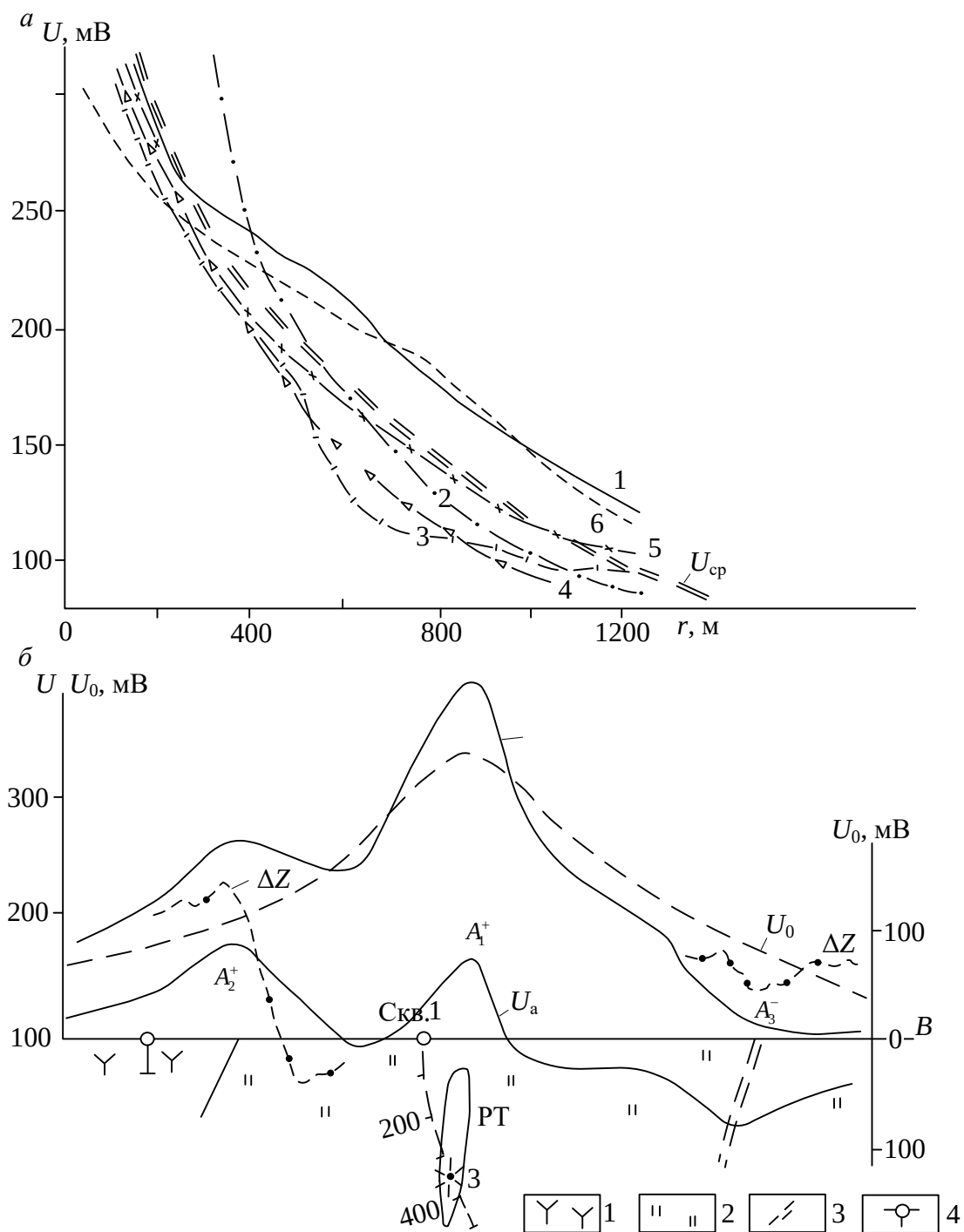


Рис. 5. Результаты обработки и интерпретации поля заряда в скважину 1 (исходные данные на рис. 4):

a – графики потенциала по системе радиальных профилей и осредняющая их кривая ($U_{cp} = U_0(r)$); b – графики измеренного, нормального и аномального потенциала (U , U_0 , U_a), фрагменты измерений магнитного поля (ΔZ) и геологический разрез по профилю I–I.

1 – субвулканические липарито-дациты; 2 – гидротермально измененные породы; 3 – разрывные нарушения; 4 – скважины; 3 – заряд; РТ – рудное тело (проекция на плоскость разреза)

В случае наличия признаков проявления анизотропной вмещающей среды стохастический способ определения нормального потенциала в методе заряда применяют с учетом схемы перехода от анизотропной к изотропной среде [13].

По результатам определения нормального потенциала можно при любой ориентировке профилей съемки вычислить нормальный потенциал по профилю. Пример определения в методе заряда по плану изолиний (рис. 4) нормального потенциала по одному из поперечных профилей показан на рис. 5, а.

Геофизические аномалии

Геофизическая аномалия характеризует отклонение физического поля от его нормальных значений. По геофизическим аномалиям изучают неоднородности геологической среды различного масштаба, что позволяет получить представление о самой структуре земных недр. В общем случае, при анализе результатов геофизических измерений в качестве аномальной составляющей рассматривают величину разности между измеренным значением поля в i -ой точке (A_i) и местным нормальным полем (A_0): $A_{ai} = \Delta A_i = A_i - A_0$. Нормальное поле может быть постоянным или плавно меняющимся, задаваться некоторыми средними величинами или, при учете его дисперсии, в виде предельных значений. В общем случае к аномальным относятся значения, превышающие верхний предел нормального поля или оказывающиеся ниже его нижнего предела. В первом случае наблюдается положительная аномалия, а во втором случае отрицательная аномалия.

Например, на рис. 2 аномальная составляющая изображена заштрихованной областью и отражает появление отрицательной аномалии, связанной с экраным влиянием сульфидного рудного тела.

В качестве примера определения аномальной составляющей изучаемого поля могут служить результаты, полученные при обработке и интерпретации данных метода заряда, приводимые на рис. 4 и 5. Данные о распределении нормального потенциала $U_0(r)$ используются для выделения в рядовой точке аномальной составляющей U_a измеренного потенциала U , равной

$$U_a = U - U_0(r). \quad (3)$$

По результатам определения нормального потенциала можно при любой ориентировке профилей съемки вычислить нормальный, а

затем и аномальный потенциал по профилю. Результаты подобных вычислений нормального потенциала, сопоставления его с измеренным полем и график аномального потенциала по одному из поперечных профилей с элементами геологической интерпретации показан на рис. 5, б.

В рассматриваемом примере аномалия A^+_1 связана с приподнятой относительно заряда частью заряженного рудного тела, имеющего северное склонение. Другая положительная аномалия A^+_2 обусловлена контактом гидротермально измененных пород, вмещающих заряженное тело, с менее электропроводной субинтрузией. Отрицательные аномалии фиксируют субвертикальные плоскости разрывных нарушений относительно повышенной электропроводности.

Безразмерные характеристики геофизических аномалий. В ряде случаев для характеристики аномального объекта целесообразно использовать нормирование аномалий относительно каких-то стандартных величин, при котором учитывается уровень фона, снижается зависимость от точности измерений, типа измеряемой аппаратуры, условий наблюдений, вида изучаемого поля. Появляется возможность сопоставлять аномальные эффекты, зафиксированные от одного и того же объекта различными методами или одним методом, но с применением различных технологий, и в других случаях.

В промысловой геофизике при оценке аномалий широко применяется двойной разностный параметр α . Он представляет отношение

$$\alpha = \Delta A_i / \Delta A_0 = (A_i - A_0) / (A_0 - A_0), \quad (5)$$

где ΔA_i – аномалия на рядовом объекте, ΔA_0 – максимальная аномалия на объекте принятом за эталон (может быть и любым объектом с которым производится сравнение). Например, при проведении измерений поля ПС в скважине на изучаемом пласте-коллекторе потенциал равен 20 мВ, на пласте с самыми высокими фильтрационно-емкостными свойствами потенциал равен 10 мВ, на глинах, рассматриваемых в качестве фона, зафиксированы значения 60 мВ. Следовательно, для изучаемого пласта имеем $\alpha_{\text{ПС}} = -40 / -50 = 0,8$.

Применение безразмерного двойного разностного параметра удобно для установления корреляционной зависимости $\alpha_{\text{ПС}}$ от некоторых промысловых параметров, например, от коэффициента пористости K_p , определенного по данным лабораторных исследований. Подобные зависимости часто имеют достаточно универсальное значение и широко используются на производстве.

При геофизических поисковых и разведочных работах на твердые полезные ископаемые для характеристики аномальности i -го объекта при применении j -го метода используется показатель контрастности γ_{ij} , равный [1]:

$$\gamma_{ij} = \Delta A_i / S_0. \quad (6)$$

В этом параметре учитывается не только аномальность поля относительно уровня фона, но и дисперсия самого фона. Показатель контрастности удобен для сравнения эффективности методов при оценке их конкурентности, а также для вычисления аномальности объекта в случае применения комплекса методов. Для успешного применения метода необходимо условие $\gamma_i > |2|$.

Использование безразмерных величин γ_i позволяет учитывать результаты нескольких методов путем вычисления функции комплексного показателя θ , представляющую алгебраическую сумму показателей контрастности отдельных методов. Знак у показателей контрастности при суммировании устанавливается в соответствии с решаемой задачей, обеспечивая подчеркивание аномальности искомых объектов по комплексу методов. Подробнее этот вопрос рассмотрен ниже в разделах 3 и 5.

3. ФИЗИКО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

Геофизические методы применяются для изучения разнообразных геологических и технических объектов. Это могут быть геологические структуры, благоприятные на содержание ценного сырья, месторождения и отдельные тела полезных ископаемых. К типовым объектам также относятся земельные основания для строительства или прокладки автомобильных и железных дорог, скважины или другие горные выработки на разведываемых или эксплуатируемых месторождениях и др. При организации и проведении геофизических работ на любых объектах необходимо четко сформулировать цели исследований по выявлению и изучению в типовых условиях геологических образований. Следует также рассмотреть возможные варианты их параметров, физические предпосылки для успешного решения поставленных задач. Результаты, получаемые в процессе исследований, часто требуют оперативного и обоснованного внесения корректив в их технологию. Ответственным моментом является представление ито-

говых данных исследований в форме понятной и удобной для специалистов, организующих комплексные геологоразведочные или изыскательские работы.

Решение всех этих вопросов осуществляется с помощью сформированной для соответствующей стадии работ физико-геологической модели (ФГМ) объекта геофизических исследований. Существенный вклад в теорию и методику комплексирования геофизических методов, включая принципы формирования ФГМ, внес выпускник Свердловского горного института профессор Гелий Сергеевич Вахромеев [1].

ФГМ отражает упрощенно-обобщенное представление об изучаемом геофизическими методами объекте, предполагающее наличие системы геолого-геофизических сведений, имеющихся на данной стадии работ. ФГМ создают в период проектирования геофизических работ, в процессе их проведения по мере поступления получаемых данных, а также по завершению работ в виде итогового документа.

Обобщенную ФГМ можно представлять в виде совокупности частных моделей: геологической, петрофизической и физических полей в профильном, плоскостном или объемном варианте.

Геологическая модель.

Примеры геологических моделей рудных полей

Геологическая модель отражает представление об объекте исследований как системе геологических тел и проявлений геологических процессов с изображением соответствующих разрезов, карт, блок-схем и т. п.

Представляет интерес рассмотреть обобщенные морфогенетические геологические модели постмагматогенных рудных полей, которые являются предметом изучения при поисках рудных месторождений. Под рудным полем понимают геологический объект, состоящий из генетически родственных сближенных рудных скоплений, гидротермально измененных минерализованных пород и малых магматических образований, представляющих собой фазы отщепления из общего материнского очага и использовавших в своем движении общие каналы. Поэтому при поисках рудных месторождений интерес представляет выявление всех этих структурных элементов рудных полей.

Наиболее отчетливо модели рудных полей продемонстрированы в работах П. Ф. Иванкина на основе детального изучения более 50

глубокозалегающих месторождений руд самого различного состава. Достоинство типизации рудных полей, выполненное П. Ф. Иванкиным, состоит в том, что сформированные им геологические модели отражают в наглядной форме главнейшие их структурные элементы, к выявлению которых могут успешно привлекаться геофизические методы. Об этом свидетельствует опыт успешных поисково-разведочных работ, отраженный в частности в монографии [13]. Большой набор примеров рудных месторождений, изученных в пределах разнотипных рудных полей, часть из которых приведена ниже, рассмотрен в справочнике [9].

Постмагматогенные рудные поля формируются выше или на периферии материнских интрузий, которые являются источником постмагматических растворов, создающих ореолы гидротермальных изменений горных пород и рудные скопления. По характеру взаимоотношений гидротермального оруденения с материнскими интрузиями можно выделить три рода рудных полей.

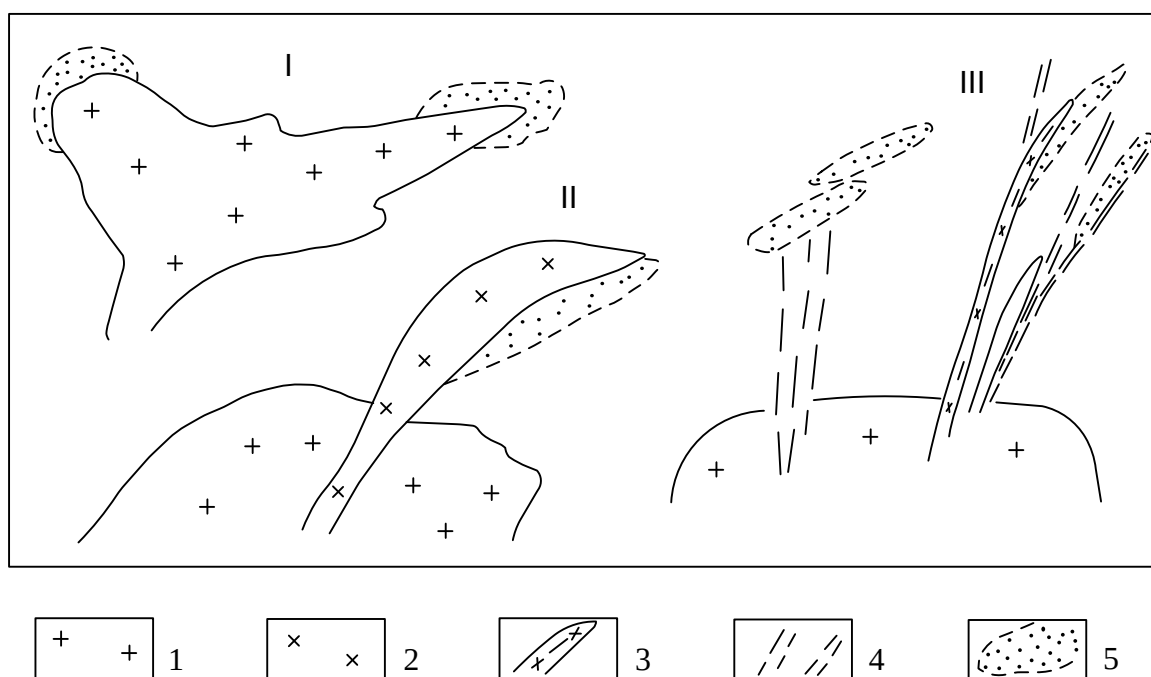


Рис. 6. Морфологические типы (геологические модели) постмагматических рудных полей разного рода (I, II, III) (по П. Ф. Иванкину):

1 – материнский плутон; 2 – тела поздних магматических отщеплений; 3 – лентовидные тела малых интрузий; 4 – разрывные нарушения; 5 – рудоносный комплекс, включающий гидротермально измененные породы и руды

Рудные поля I рода являются ореольными или бескорневыми (рис. 6). Они формируются на ранних стадиях остывания внедривше-

гося магматического тела в условиях широкого фронта отделения растворов по всей или части поверхности материнского интрузива. Растворы обычно обогащены водой, летучими и рудными компонентами. Минерализация вмещающих пород происходит вблизи места отделения растворов от остывающей магмы. В результате образуются широкие ореолы измененных пород с рассеянной или прожилковой минерализацией без богатых локальных скоплений. На поверхности они проявляются в виде полей измененных пород и рассеянной минерализации на достаточно обширных пространствах над погребенными интрузиями или вдоль границ вскрытых эрозией магматических тел. Примеры геологических разрезов месторождений типичных для ореольных рудных полей I рода приведены на рис. 7. Эти разрезы могут рассматриваться как геологические модели этих объектов. Главными структурными элементами их являются интрузии и ореолы рассеянной или прожилковой минерализации.

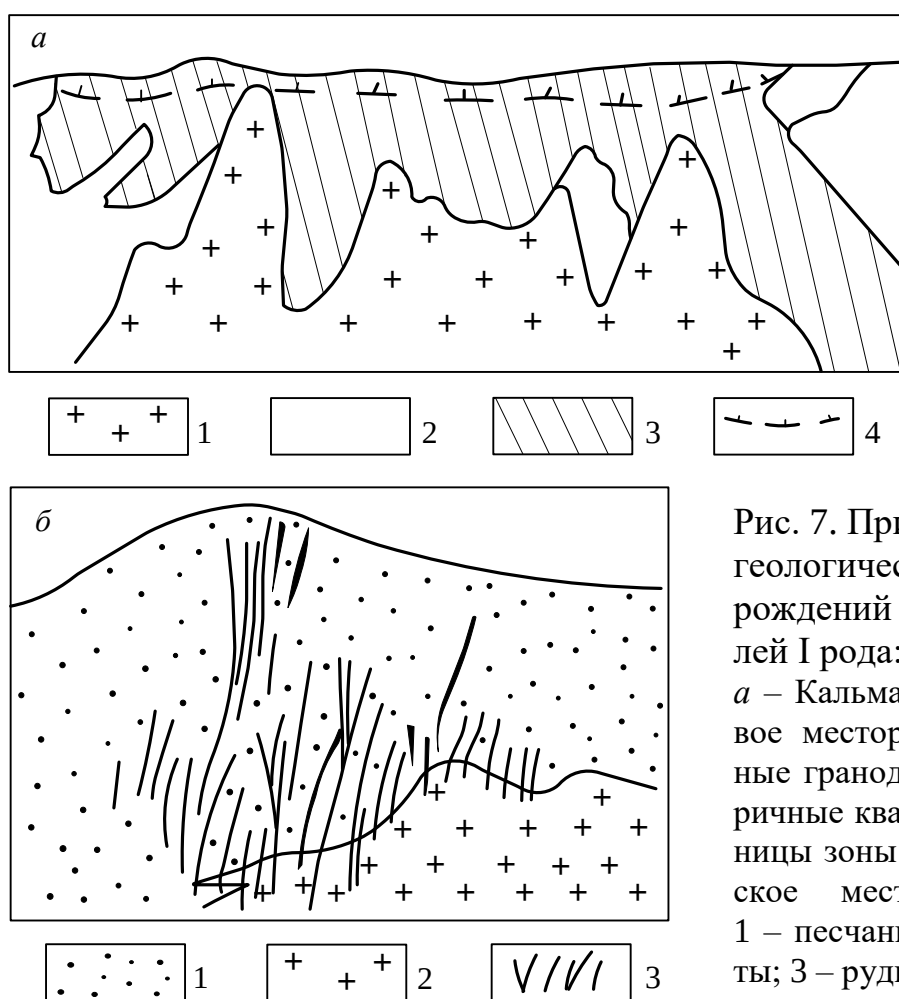


Рис. 7. Примеры схематических геологических разрезов месторождений ореольных рудных полей I рода:

а – Кальмакырское медно-порфировое месторождение: 1 – интрузивные гранодиорит-порфиры; 2 – вторичные кварциты; 3 – руды; 4 – границы зоны окисления; *б* – Иультинское месторождение вольфрама: 1 – песчаники и сланцы; 2 – граниты; 3 – рудные жилы

Рудные поля II рода – это системы рудных тел, окружающих их зон гидротермально измененных пород и поздних магматических от-

щеплений, имеющих общие корни (или рудно- и магмоподводящие каналы), уходящие внутрь крупного интрузива, производными которого все они являются (рис. 6.) Считается, что растворы поступали из верхних частей интрузива и проникали в их кровлю в виде потоков, двигавшихся по нарушениям, контактам или другим проницаемым каналам, что обусловило структурный контроль оруденения. Фигура рудного поля и свойства преобразованных в его пределах пород отражают направленность рудоносных растворов от корней к фронту поля. Рудные поля II рода характерны для гипабиссальных интрузий, часто приурочены к вулканическим постройкам, сформировавшимся над ними, имеют пологие и крутопадающие ветви. Примеры месторождений, типичных для корневых рудных полей II рода, приведены на рис. 8.

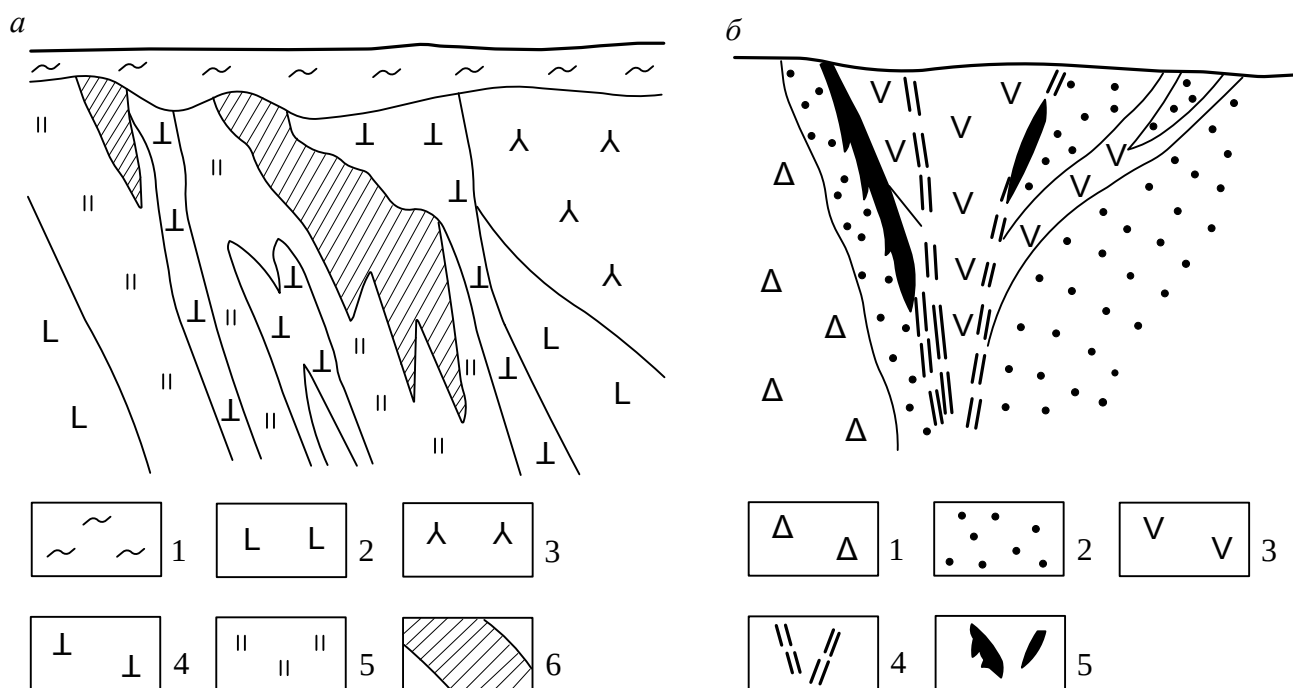


Рис. 8. Схематические геологические разрезы месторождений рудных полей II рода:

а – южная часть Гайского медноколчеданного месторождения: 1 – рыхлые отложения; 2 – туфы; 3 – диабазовые порфириты; 4 – субвулканические липарит-дациты (малая интрузия) ; 5 – метасоматиты; 6 – руды; б – молибден-урановое месторождение: 1 – диабазы и спилиты докембрия; 2 – переслаивающиеся осадочные и вулканогенно-осадочные породы; 3 – субвулканические андезиты (малая интрузия); 4 – разрывные нарушения; 5 – рудные тела

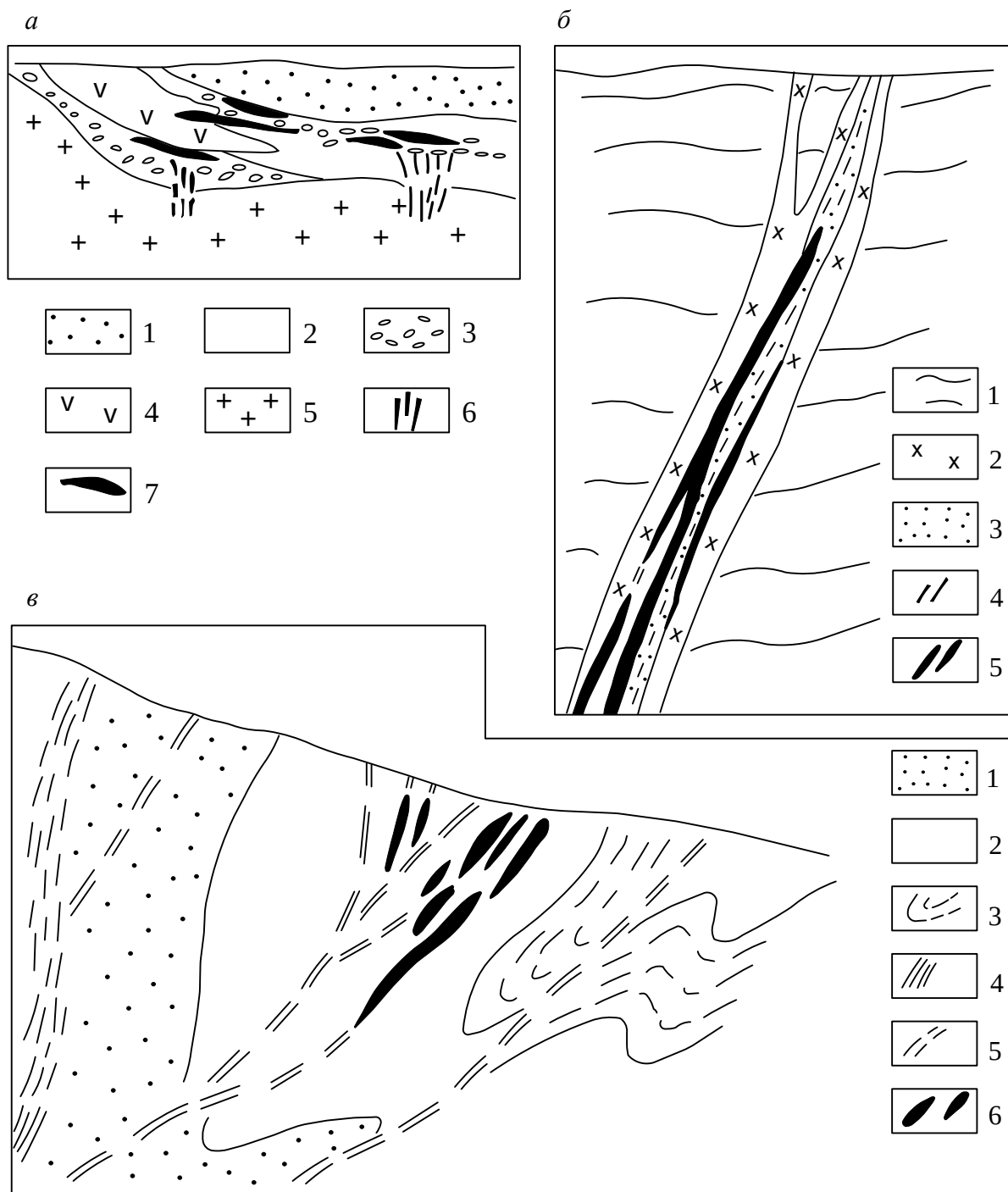


Рис. 9. Примеры геологических разрезов месторождений корневых рудных полей III рода:

а – мышьяково-урановое месторождение: 1 – алевриты с прослоями песчаников; 2 – песчаники; 3 – конгломераты и гравелиты; 4 – туфолавы; 5 – граниты; 6 – разрывные нарушения; 7 – рудные тела; *б* – уран-титановое месторождение: 1 – кристаллические сланцы и гнейсы; 2 – пегматитовые жилы; 3 – гидротермально измененные породы; 4 – бластомилониты тектонических швов; 5 – рудные тела; *в* – Сахалинское месторождение киновари: 1 – песчаники, конгломераты, алевриты; 2 – глинистые алевриты; 3 – пачки глин; 4 – главный разлом; 5 – оперяющиеся трещины; 6 – рудные тела

К рудным полям III рода относят систему рудных тел, окружающих их измененных пород и иногда сопровождающих их серии малых интрузий, значительно оторванных от глубинных интрузий (рис. 6). Образовавшие их потоки гидротерм приурочены к самостоятельным тектоническим зонам, уходящих на глубину, или к ветвям крупных разломов. Последние являлись открытыми системами и, хотя могут нести следы гидротермальных изменений и минерализации, но промышленных скоплений руды не содержат. В ответвлениях, выклинивающихся к дневной поверхности, или в локальных проницаемых геологических телах, игравшими роль экранированных для растворов резервуаров, с которыми контактировали тектонические нарушения, образуются рудные скопления. Поэтому рудные залежи в рудных полях этого рода залегают согласно со слоистыми толщами или разрывными нарушениями в породах с повышенной пустотностью. Примеры месторождений, характерных для рудных полей III рода, приведены на рис. 9.

Таким образом, как следует из геологических моделей, при поисках рудных месторождений главными объектами выявления геофизическими методами являются рудные залежи, включающие их ореолы окolorудных изменений, рудоконтролирующие тектонические нарушения, крупные и малые интрузии. Все эти объекты имеют аномальные петрофизические свойства и благоприятные предпосылки для обнаружения при геофизических съемках.

Модели петрофизические и физических полей

Петрофизическая модель отражает сведения о распределении в геологическом пространстве физических свойств, характеризующих геологические тела, как объекты, имеющие предпосылки для выявления и изучения их геофизическими методами. При этом возможны случаи объединения нескольких геологических образований в структурно-вещественные комплексы (СВК) с одинаковыми или близкими физическими свойствами. В этом случае происходит упрощение петрофизической модели по сравнению с геологической моделью. Однако не исключены случаи, когда внутри условно единого геологического тела существуют участки изменений свойств за счет проявления процессов локального преобразования горных пород, которые отличаются по физическим свойствам и могут фиксироваться геофизическими методами. Такая картина наблюдается при локальном ме-

таморфизме, околорудных изменениях, развитии трещиноватости и др. процессах. В этих случаях петрофизическая модель может отражать результаты действия этих процессов и выглядеть сложнее, чем геологическая модель.

Петрофизическая модель может быть представлена в виде таблиц, типовых физико-геологических колонок, сводных геолого-геофизических разрезов, петрофизических карт или разрезов: самостоятельных или совмещенных с геологическими картографическими материалами. Желательно дополнять традиционно принятые в геологии мелкомасштабные литолого-стратиграфические разрезы (колонки) данными о физических свойствах, представленных на них толщ.

Исходные данные о физических свойствах горных пород для формирования петрофизической модели получают в результате лабораторных измерений на образцах, по данным интерпретации результатов каротажа или параметрических наблюдений физических полей на отдельных участках, а также путем использования справочной литературы. Помимо данных по изучаемой территории обязательно приводятся необходимые сведения об объектах-аналогах, что позволяет учесть опыт предшественников. Примером петрофизической модели месторождения может служить упрощенная типовая физико-геологическая колонка, изображенная на рис.11.

Физические поля или результаты их трансформации отражают данные, получаемые при решении прямой задачи на основе геологической и петрофизической моделей, или же отражают данные реальных наблюдений. Они необходимы для обоснования возможностей геофизических методов. На стадии проектирования это могут быть геофизические поля на объектах-аналогах, ранее изученных в схожих геологических условиях. Физические поля также приводятся как исходный материал, использованный при геологической интерпретации уже выполненных измерений, когда с помощью ФГМ представляются итоговые документы геофизических работ.

Пример физико-геологической модели

В качестве примера на рис. 10, 11 приводится ФГМ уранового месторождения, приуроченного к разрывным дислокациям в метаморфизованных породах протерозоя. По классификации П. Ф. Иванкина оно относится к корневым рудным полям III рода, оторванных от материнского глубинного плутона и приуроченных к тектониче-

ским зонам. На геологической модели (рис. 10, а) видно, что разрывные нарушения тяготеют к крыльям антиклинальной структуры, представленной вулканогенно-карбонатными отложениями. Оруденение локализуется в зонах проявления разрывной тектоники преимущественно в сланцевых толщах на участках с повышенной пористостью, появившихся вследствие разуплотнения пород. Рудоносные растворы помимо урана привнесли в зону их разгрузки вещества, сформировавшие ореолы гематитизации и сульфидизации. Эпигнетические изменения вмещающих пород сопровождались образованием в верхней части разреза зоны окисления.

Петрофизическая модель месторождения (рис. 11) отражает развитие аномальных проявлений в физических свойствах, как в контуре рудных тел, так и в околорудно-измененных породах. В рудах помимо высокой радиоактивности (J_γ) отмечается увеличение плотности (σ), магнитной восприимчивости (χ), поляризуемости (η_k) и понижение сопротивления (ρ_k). Вмещающие породы достаточно дифференцированы по физическим свойствам, что позволяет ожидать появление аномалий от складчатых структур. Анализируя петрофизическую модель, можно полагать, что зоны околорудно-измененных пород, характеризующиеся разуплотнением, повышением магнитной восприимчивости, электропроводности и поляризуемости, должны проявиться в магнитном поле, а также по данным методов электротометрии. Следует ожидать наложение на структурную составляющую полей проявлений, связанных с телами рудных тел и сопровождающих их ореолов минерализации.

Действительно, на графиках полей, измеренных комплексом методов по профилю, проходящему через рудоносную структуру (рис. 10, б), отражаются главнейшие ее элементы. Так отрицательной локальной аномалией силы тяжести отмечается ядро антиклинали (выход к поверхности карбонатов среди магматических пород). Расширение этой аномалии связано с проявлением зон разуплотнения и трещиноватости, обусловленных существованием здесь разрывных нарушений, как одного из признаков благоприятных условий для проникновения рудоносных растворов.

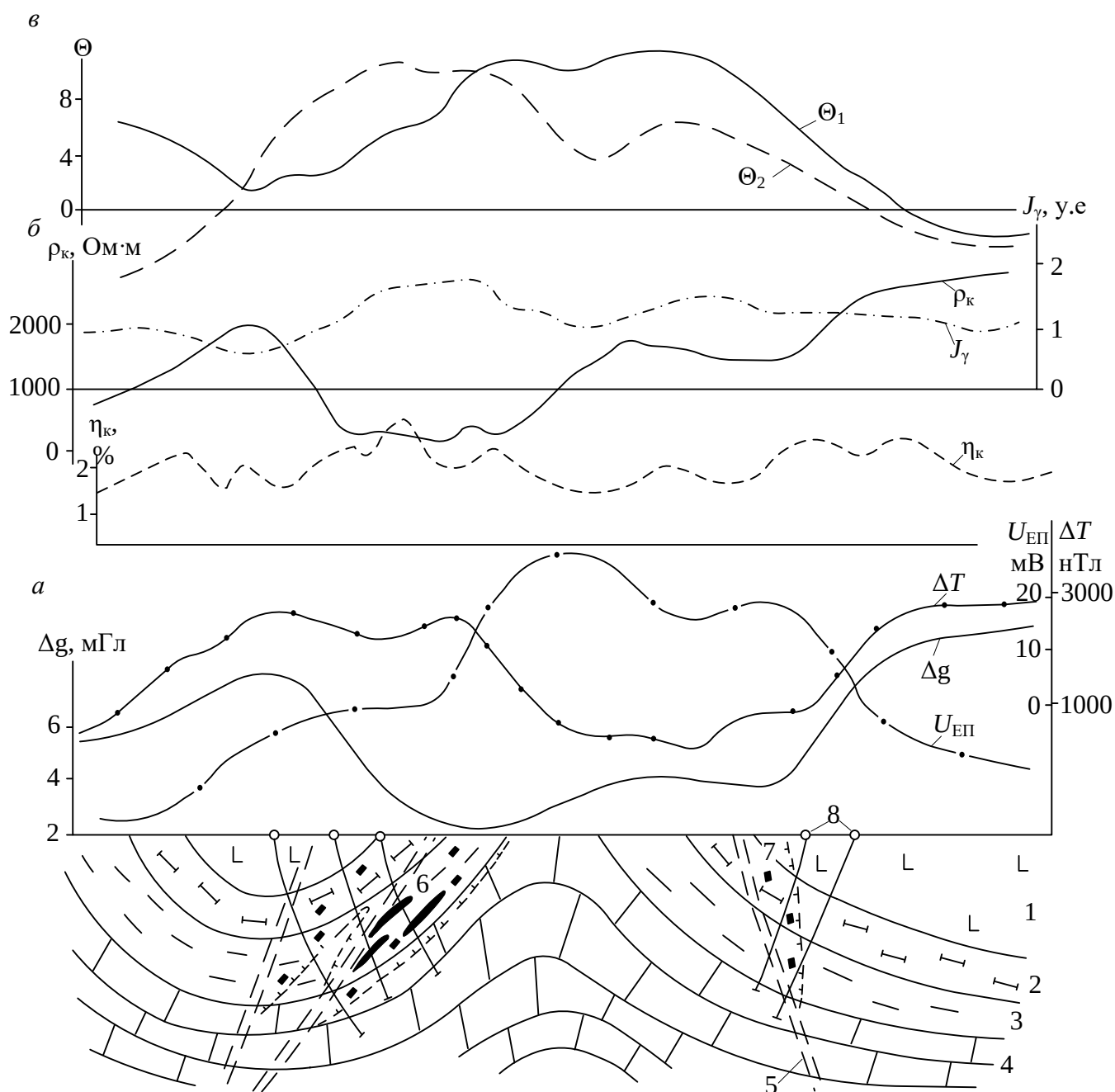


Рис. 10. ФГМ месторождения урана (по В. Е. Голомолзину, В. А. Титовой, А. В. Денисову):

а – геологический разрез (геологическая модель) месторождения: 1 – габбро-диабазы; 2 – пестроцветные слюдистые сланцы; 3 – слюдисто-карбонатные шунгитсодержащие сланцы; 4 – доломиты; 5 – тектонические нарушения; 6 – урановые руды; 7 – зоны гидротермально метасоматических изменений и минерализации; 8 – скважины; *б* – графики геофизических полей; *в* – функции комплексного показателя аномалий гравитационного и магнитного полей (θ_1), полей электрометрии и радиометрии (θ_2)

Отрицательная локальная аномалия магнитного поля, связанная с ядром антиклинали, явно уже гравитационной аномалии, то есть заметно повышение магнитного поля в районе ослабления поля силы

тяжести (над выходом к дневной поверхности рудоносных пород). Такое несоответствие двух полей является признаком отражения развития вторичных процессов, связанных с проявлением рассеянного ожелезнения, что характерно для фронтальной части ореола поступавших из недр рудоносных растворов. Это весьма благоприятный поисковый признак.

Для месторождения характерны участки профиля, на которых отмечается заметное уменьшение удельного сопротивления, хотя и слабое, но заметно повышение поляризуемости среды по данным срединного градиента с размером установки 1000 м. Так как над этим участком также наблюдается заметное повышение гамма-поля, то эти важные признаки следует также рассматривать как благоприятные для обнаружения оруденения.

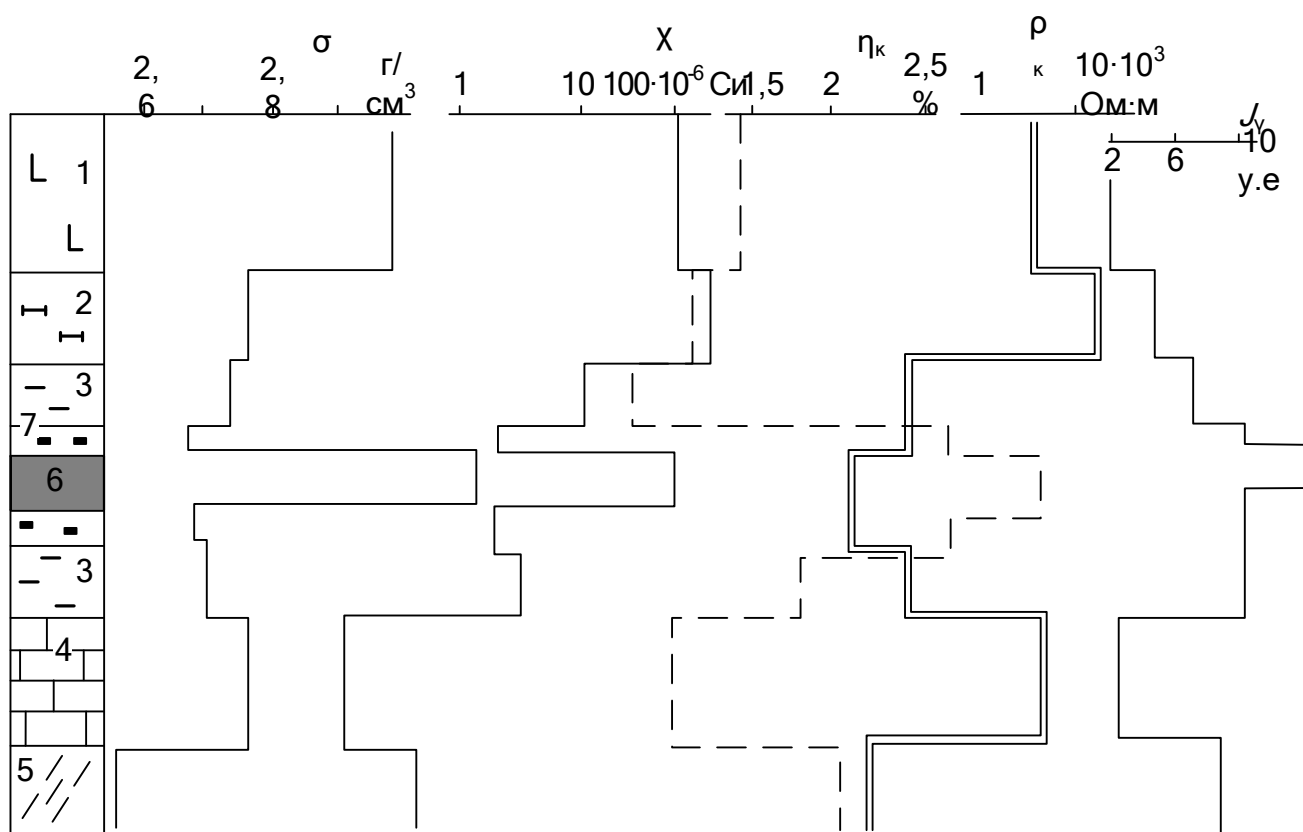


Рис. 11. Типовая физико-геологическая колонка (петрофизическая модель) месторождения урана (см. рис.10):
 графики плотности (σ), магнитной восприимчивости (χ), кажущихся поляризуемости (η_k) и удельного сопротивления (ρ_k), радиоактивности (J_γ) горных пород разреза (1-7 см. подрисуночные надписи к рис.10, а)

Весьма отчетливо влияние рудоносных пород проявляется в виде четкой положительной аномалии естественного электрического

поля. И хотя аномалия несколько смещена по восстанию относительно самого оруденения и наблюдается еще над участком с рассеянной минерализацией, однако, при наличии других признаков район, наиболее перспективный на оруденение, по аномалии естественного поля фиксируется достаточно надежно.

Представление о возможности совместного учета результатов нескольких методов показано на примере двух вариантов функции комплексного показателя (рис. 10, в). При вычислениях в качестве нормального поля использовались значения, типичные для участков профиля, проходящих над магматическими породами. Вычислительные формулы для Θ составлялись с таким расчетом, чтобы подчеркнуть положительными аномалиями присутствие объектов, представляющих первоочередной интерес.

Функция Θ_1 вычислялась по формуле $\Theta_1 = -\gamma_{ГР} - \gamma_m$ и отражает совместное проявление аномальности полей гравиметрии и магнитометрии. При структурных исследованиях интерес представляют выходы к дневной поверхности потенциально рудоносной толщи сланцев, и соответствующие им отрицательные аномалии этих полей являются положительными факторами контроля этих искомых объектов. Это обстоятельство учтено в формуле Θ_1 . График функции Θ_1 имеет картировочное значение и положительная аномалия Θ_{A1} хорошо соответствует выходам сланцев совместно с толщиной карбонатных пород среди тел магматитов.

Функция Θ_2 отражает аномальность методов электроразведки (КС, ВП и ЕП) и радиометрии, связанных с самим месторождением урана и близрасположенного рудопроявления, и вычислялась по формуле $\Theta_2 = \gamma_{ВП} + \gamma_{ЕП} - \gamma_{КС} + \gamma_r$. Результирующая аномалия этих методов подтверждает возможность применения данного комплекса методов для поисков урановых руд в геологических условиях близких тем, которые отражены на представленной ФГМ.

Таким образом, сформированная по данным геологии, измерений физических свойств в скважинах и полей на дневной поверхности ФГМ, позволяет расшифровать природу геофизических аномалий наземных методов, выявить те признаки, по совокупности которых можно обнаруживать урановые месторождения в районе с подобными геологическими условиями. Появляется возможность обосновать комплекс геофизических методов, при применении которого можно рассчитывать на успешные результаты поисков.

4. ФОРМИРОВАНИЕ ПЕТРОФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПО ДАННЫМ РУДНОГО КАРОТАЖА

В настоящее время сведения о физических свойствах при проектировании, поисках и разведке месторождений полезных ископаемых в основном получают по данным геофизических методов исследования скважин (ГИС). Одним из вариантов представления петрофизической модели объекта исследований является типовая геолого-геофизическая колонка разреза изучаемой геологической среды. В промысловой геофизике она получила название сводный геолого-геофизический разрез. Поскольку физические свойства осадочной толщи, изучаемой методами промысловой геофизики, достаточно стабильны по латерали, для формирования модели разреза используют диаграммы 2-3 скважин, имеющих пересечения всех структурных элементов разреза.

В рудных районах, характеризующихся высокой изменчивостью разнообразных признаков геологических образований, представление об их физических свойствах можно получить с помощью стохастической модели разреза.

Основными элементами структуры рудного поля являются геологические тела и зоны развития геологических процессов, мощности которых измеряются десятками метров. Отдельный элемент, исходя из опыта ГИС, представляет образование с включениями и его можно с некоторым приближением рассматривать как двухкомпонентную среду. Размеры включений обычно составляют первые метры. Роль включений играют мелкие чередующиеся пропластки пород иного состава по сравнению с вмещающей их средой. К включениям относят также локальные участки проявления выборочного эпигенетического преобразования в геологическом теле, останцы материнской породы, подвергшейся метаморфическим изменениям, и др.

Кодирование диаграмм ГИС

Рассматривая пересечение геологического тела в скважине как двухкомпонентную смесь, предложено выполнять кодирование диаграмм каротажа, позволяющее представить информацию о пересечении в виде характеристик изучаемого свойства (поля) A и долей содержания для каждого из компонентов [8]. Естественно полагать, что для одного из компонентов макросмеси присущи высокие значения

свойства A_B , а для другого – низкие значения этого свойства A_H . Коэффициенты, отражающие содержание каждого из компонентов, соответственно равны K_B и K_H .

Для реализации простейшего способа определения характеристик такой макросмеси необходимо провести в пределах пересечения три линии, осредняющие значения измеряемого свойства для каждого из компонентов (средние значения A_B и A_H) и диаграммы в целом (значение A_{cp}) (рис. 12). Первые два значения определяют свойства компонентов, а коэффициенты содержания каждого из компонентов находят по формулам:

$$K_B = (A_{cp} - A_H)/(A_B - A_H), K_H = (A_B - A_{cp})/(A_B - A_H) = 1 - K_B. \quad (4)$$

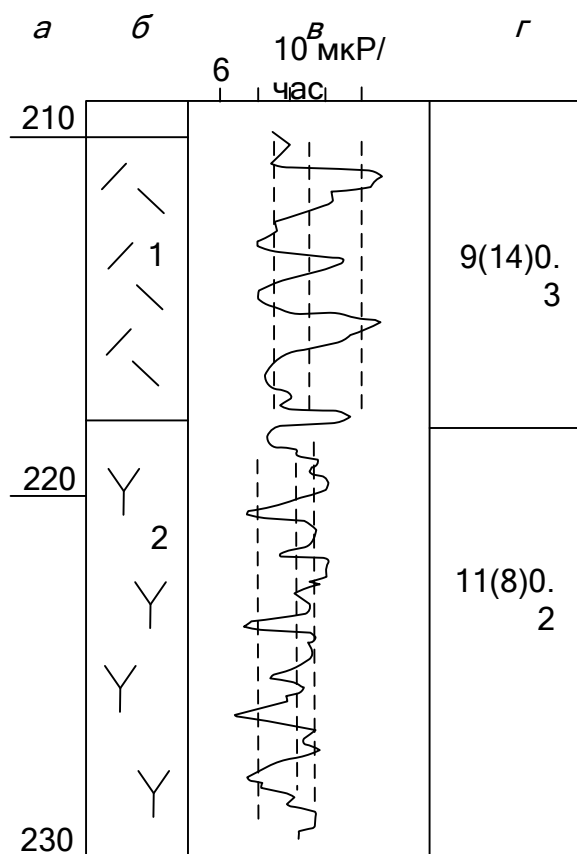


Рис. 12. Пример кодирования диаграммы ГК для двух интервалов участка скважины:
а – глубины; *б* – геологическая колонка; *в* – диаграмма; *г* – результаты кодирования; 1 – туфы; 2 – липариты

Очевидно, что, если мощность рассматриваемого пересечения составляет H метров, то доли компонентов в метрах равны: $H_B = HK_B$ и $H_H = HK_H$.

Информацию об измеренном физическом признаке для каждого пересечения геологического образования можно представить в виде кода следующего вида: $A_{ок}(A_{вкл})K_{вкл}$. Первое значение соответствует средней величине физического свойства основного компонента, доля

которого в макросмеси выше. Значение в скобках отражает среднее значение физического свойства компонента, рассматриваемого как включение, а последнее значение соответствует его доле в макросмеси. Следует заметить, что основной компонент также как и включения могут характеризоваться относительно высокими или низкими значениями свойства. Например, при кодировании данных измерений методом ГК естественной радиоактивности в мкР/час (рис. 12) для интервала 210-218 м (туфы) с помощью набора значений 9(14)0,3 фиксируется наличие среди основной части пласта мощностью 8 м включений (пропластков с повышенным содержанием кислой фации), на долю которых приходится 2,4 м. Основная масса туфов имеет радиоактивность 9 мкР/час, а более радиоактивные пропластки характеризуются значениями около 14 мкР/ч. Для липаритов, залегающих ниже туфов, пересечение которых зафиксировано в интервале 218-230 м, характерны средние значения для основного компонента 11 мкР/час, а для включений 8 мкР/час. Доля включений составляет 0,2, и поэтому результаты кодирования для этого интервала выражаются набором значений 11(8)0,2.

Имеется программа автоматического кодирования диаграмм методов ГИС, созданная В. А. Серковым при участии автора.

Результаты кодирования позволяют представить данные измерения физического свойства (поля) по скважине в компактной форме, удобной для хранения, трансляции, применения разнообразных способов обработки, построения петрофизических разрезов без потери информации о неоднородной структуре геологических образований, отражающей проявление определенных процессов. Например, имея данные кодирования диаграммы электрометрии с измерениями удельного сопротивления ρ в Ом·м, можно вычислить коэффициент электрической анизотропии λ . Для среды с двухосной анизотропией, характеризующейся удельным сопротивлением вкrest слоистости – ρ_n , по слоистости – ρ_t , справедливы следующие формулы:

$$\rho_n = K_v \rho_v + K_h \rho_h, \quad \rho_t = \rho_v \rho_h / (K_h \rho_v + K_v \rho_h), \quad \lambda = (\rho_n / \rho_t)^{1/2} \quad (5)$$

Статистическая обработка результатов кодирования

Данные кодирования диаграмм методов ГИС, зарегистрированных по нескольким скважинам изучаемого участка на стадии поисков или разведки, позволяют сформировать петрофизические модели каждого элемента структуры этого участка. Задача практически сво-

дится к получению представления о типичных горных породах и рудах участка, как объектах исследования геофизическими методами. При этом следует отразить те изменения в свойствах этих пород, которые вызывают процессы тектоники, метаморфизма и минерализации.

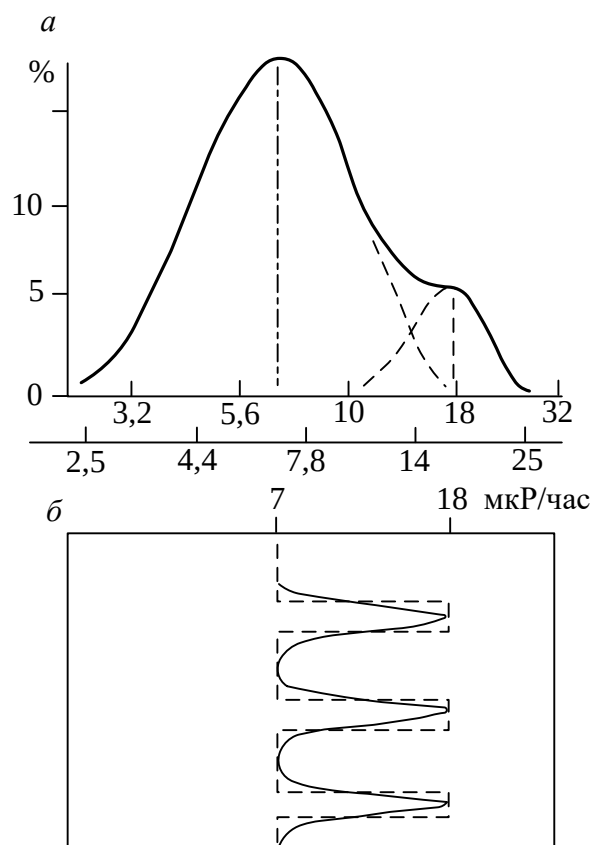
Петрофизические модели, присущих изучаемому разрезу литотипов горных пород, формируются на основе статистических исследований по выборкам для каждого из них путем построения кривых распределения изучаемых физических характеристик. В выборку для конкретного литотипа включаются все его пересечения, которые на геологических колонках классифицированы приблизительно одинаково. Статистика проводится для каждого изучаемого геофизического свойства отдельно, подобно тому, как это делается при оценке уровня нормального поля стохастическим способом (см. раздел 2). Поскольку распределение для большинства физических свойств статистически однородных совокупностей горных пород подчиняется логнормальному закону, рассмотрим этот случай детально.

Для построения дифференциальной кривой распределения признака (физического поля или свойства) A необходимо выполнить группирование данных о нем по классам (интервалам равной ширины на оси абсцисс), применяя логарифмическую шкалу. Для достаточно представительных (репрезентативных) выборок удобно разбивать один порядок на 4 класса. Например, границы классов могут соответствовать значениям: 1-1,8-3,2-5,6-10-18-32 и т. д. В случае применения второй смещенной шкалы границы классов: 1,4-2,5-4,4-7,8-14-25 ит. д. При таком подходе отпадает необходимость применять бланки с логарифмической шкалой.

В таблицу группирования заносятся значения мощности в метрах. Для двухкомпонентных макросмесей в таблицу заносятся мощности компонентов H_H и H_B в классы в соответствии с характерными для компонентов значениями A_H и A_B . В большинстве случаев они разносятся по разным классам, но при близких значениях измеряемого признака мощности компонентов могут попасть в один класс. Дифференциальная кривая распределения (функция частоты) строится по данным о суммарной мощности (ординаты) каждого класса (на оси абсцисс это середины классов). Пример дифференциальной функции распределения приведен на рис. 13, а.

Рис. 13. Пример построения статистической диаграммы для туфов смешанного состава:

а – дифференциальная кривая распределения естественной радиоактивности (выборка по 5 скважинам); *б* – статистическая диаграмма ГК (поле в логарифмическом масштабе)



В большинстве случаев кривые распределения отражают статистическую неоднородность изучаемых образований, которая проявляется в двухгорбности кривых, или они имеют другие особенности, также позволяющие сделать вывод о двухкомпонентной структуре этих образований. Пользуясь известными приемами статистики сложную кривую распределения можно представить в виде двух элементарных кривых, соответствующих логнормальному закону. По ним легко определить центральные значения признака для каждого компонента, а также долю каждого компонента в выборке (по соотношению площадей элементарных кривых). Эти данные и используют для статистической характеристики изучаемых объектов по геофизическим признакам путем построения прямоугольных диаграмм, которые затем могут быть скорректированы с учетом специфики вида аномалий измеряемого в скважинах поля. Так для метода ГК аномальными являются пропластки (включения) с максимумом аномалии в середине пропластков и полумаксимумом на их границах.

Рис. 13, *б* иллюстрирует принцип построения статистической диаграммы для объекта по данным, получаемым при использовании распределения естественной радиоактивности туфов смешанного состава (измерения по 5 скважинам на периферии медноколчеданного

месторождения). О соотношении долей основного компонента и включений можно судить по ширине площадок значений радиоактивности основного компонента и включений. В рассматриваемом примере это соотношение 1:3 и, следовательно, на статистической диаграмме $K_{\text{вкл}} = 0,25$.

Построение типовой физико-геологической колонки

Построение начинается с формирования типовой геологической колонки, которая отражает в разрезе весь комплекс геологических тел, участвующих в создании структуры изучаемого участка с отражением последовательности их залегания. При мелкомасштабных исследованиях можно использовать литолого-стратиграфическую колонку, которая создается геологической службой в каждом районе геологоразведочных работ. Такие колонки обычно не имеют масштаба, а сведения о мощностях толщ или геологических тел приводятся на колонке в виде диапазонов их мощностей. На геологических колонках отдельно выделяются объекты, которые развиты в районе не повсеместно, то есть появляются в виде локальных тел. В первую очередь это относится к малым интрузиям, рудным телам и зонам метаморфизма. Подобные объекты изображаются в виде включений в толще вмещающих пород.

На основе дифференциальных кривых распределения геофизических признаков для каждого литотипа формируются статистические диаграммы по изученным признакам для всего разреза в соответствии с геологической колонкой. В большинстве случаев все геологические тела представляются на статистических геофизических диаграммах как образования с включениями. Неоднородность объектов показывают путем изображения прямоугольных или скорректированных с учетом типичной формы диаграмм, подобных той, которая представлена на рис. 13, б. Пример типовой физико-геологической колонки (упрощенный вариант без отражения компонентов в горных породах) приведен на рис. 10.

Типовая физико-геологическая колонка дает представление о физических свойствах всего комплекса геологических образований в изучаемом районе и на ее основе могут решаться разнообразные задачи в период проведения геологоразведочных работ. Полученные данные используют при формировании петрофизической модели при исследовании участков с условиями близкими тем, которые учтены

при формировании типовой колонки, как на стадии проектирования работ, так при интерпретации измеренных полей. В период разведки типовая колонка помогает правильно классифицировать объекты, изученные методами ГИС.

5. ВЫБОР КОМПЛЕКСА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Выбор геофизического комплекса можно рассматривать как творческое решение сложной задачи, требующей высокой квалификации исполнителей. Поэтому недаром в вузах для выпускников геологического направления квалификационной работой обычно является проект поисково-разведочных работ, при защите которого судят о подготовленности выпускника умело обосновать необходимый комплекс методов для успешного решения конкретной задачи геолого-разведочного производства.

При выборе геофизического комплекса руководствуются следующими положениями.

1. Необходимо использовать всю имеющуюся информацию о результатах ранее проводившихся в районе проектируемых работ геологических, геофизических и геохимических исследованиях. Это могут быть материалы регионального и среднемасштабного геологического картирования, спутниковой и аэрогеофизической съемки, результаты бурения и изучения опорных или структурных скважин и др.

2. Учесть опыт предшественников по геофизическим исследованиям в схожих геологических условиях, давших в первую очередь положительные результаты. Познакомится с типовыми комплексами применения геофизических методов для целей картирования и поисково-разведочных работ на определенные полезные ископаемые.

3. Сформировать рациональный геофизический комплекс, включающий минимально достаточное число методов, сочетание и последовательное применение которых имеет наилучшие перспективы для решения поставленной задачи с оправданным расходом требуемых средств.

В комплекс включают методы, несущие разнородную информацию и позволяющие классифицировать (с определенной вероятностью) геологические объекты в пределах изучаемой среды. Методы подразделяют на основные и вспомогательные. Первые планируются

применять на всей площади работ, а вторые, часто рассматриваемые как детализационные, необходимы для определения природы и геометрических характеристик выявленных аномалиеобразующих объектов на участках ограниченных размеров.

Типовой комплекс включает избыточное число методов, поскольку обобщает опыт успешного применения геофизических методов для решения определенного класса задач в разнообразных условиях и при различной аппаратурной оснащенности исполнителей. Приводимые в справочной, учебной и научной литературы сведения дают возможность выбрать лишь оправданно необходимый минимум методов. Тем не менее, в проекте должно быть отражены данные о типовом комплексе и приведены обоснования для принятых решений о выбранном минимуме.

При некоторых геофизических исследованиях специальными документами регламентируется применение определенного обязательного комплекса с возможностью его дополнения методами, для применения которых имеется веские причины. Так, например, в промысловой геофизике результаты исследования скважин не считаются кондиционными, если не применялся обязательный для данной стадии комплекс методов.

Внутри рационального комплекса могут быть отдельно выделены целевые комплексы методов. Это круг методов, объединяемых для решения какой-то узкой задачи. В качестве примера можно привести целевой комплекс методов для выявления крутопадающих секущих разрывных нарушений. Комплекс включает высокоточную магниторазведку, комбинированное электропрофилирование, метод естественного электрического поля. Эффективность этого комплекса продемонстрирована в разделе 8.

При обосновании рационального комплекса следует привлекать количественные оценки геологической и экономической эффективности методов, а также учитывать временные факторы их применения.

Хорошо зарекомендовал себя на практике способ вычисления показателей контрастности отдельных методов γ_j (см. раздел 2) и функции комплексного показателя (ФКП) θ , представляющей сумму показателей контрастности нескольких методов для характеристики комплекса [1]. При обосновании выбора одного из конкурирующих методов предпочтение отдается тому, для которого при анализе условий выделения аномалиеобразующего объекта на материалах ФГМ

или на уже разведанном объекте – аналоге показатель γ_j по модулю больше.

Для комплекса методов составляется формула алгебраического суммирования показателей контрастности с таким расчетом, чтобы аномальные эффекты каждого измеряемого признака для главного объекта поисков или разведки давали увеличение функции θ . Это достигается изменением знака у показателей, соответствующих отрицательным аномалиям. Например, если сульфидное месторождение фиксируется положительными локальными аномалиями гравитационного поля (Γ_p) и вызванной поляризации (ВП), но отрицательными аномалиями кажущего сопротивления (КС) и магнитного поля (М), то формула для вычисления θ имеет вид:

$$\Theta = \gamma_{\Gamma p} + \gamma_{\text{ВП}} - \gamma_{\text{КС}} - \gamma_{\text{М}}. \quad (6)$$

Вычисление ФКП приводит к увеличению контрастности проявления искомого объекта и подавлению помех. Так при поисках сульфидных месторождений фиксируется много локальных положительных гравиметровых аномалий, не связанных с оруденением. С этими аномалиями часто коррелируются положительные аномалии КС и магнитного поля. В результате применения формулы (6) такие объекты-помехи будут сопровождаться низкими или даже отрицательными аномалиями ФКП, что позволит исключить их из рассмотрения.

Необходимо заметить, что для ФКП характерен некоторый фон, на величину которого влияет количество задействованных признаков, фактически число методов m , для которых определены показатели контрастности. В качестве фонового значения Θ_0 используется величина $\pm 2\sqrt{m}$, а в качестве аномальной рассматривается значение превышающее по модулю Θ_0 . Поэтому эффективность комплекса оценивают величиной аномалии ФКП – Θ_a .

Эффективность комплекса выше, если Θ_a больше модуля показателя контрастности любого метода. Увеличение числа методов в комплексе приводит к росту фона для ФКП и вполне возможно, что при этом величина Θ_a увеличится незначительно. Поэтому требуется ограничиться минимальным числом методов, применение которых гарантирует уверенное выделение искомого объекта достаточно контрастной аномалией ФКП.

Выбор геофизического комплекса для картирования разрывных нарушений

Тектонические нарушения относятся к важнейшим объектам геофизических исследований, поскольку часто имеют контролирующее значение при формировании месторождений полезных ископаемых. Изучение разрывных нарушений с одной стороны может привести к открытию рудных залежей, а с другой стороны связано с необходимостью установить строение изучаемых геологических объектов, в том числе и рудовмещающих структур.

Разрывные нарушения подчиняются определенной иерархии по размерам и глубине проникновения на глубину. К общим закономерностям можно отнести существование сеток из нарушений различного масштаба, разнородность проницаемости вдоль нарушений, способность к заполнению относительно молодыми геологическими телами.

Наиболее крупные разрывные нарушения, обычно классифицируемые как глубинные разломы, проникают на глубину в сотни километров и имеют ширину до десятков километров. Разломы этого типа представляют полосы, в пределах которых образовались крупные интрузии различного состава, возникли вулканические центры. Пример схемы, образующей сеть из глубинных разломов субмеридиального и субширотного простирания в пределах Оренбургского Урала показан на рис. 14, *а* [4]. Места пересечения разнонаправленных разломов очевидно являлись наиболее проницаемыми каналами поступления из глубины рудномагматических потоков, поэтому именно в узлах сетки из разломов отмечены интрузии, вулканические аппараты и проявления рудной минерализации.

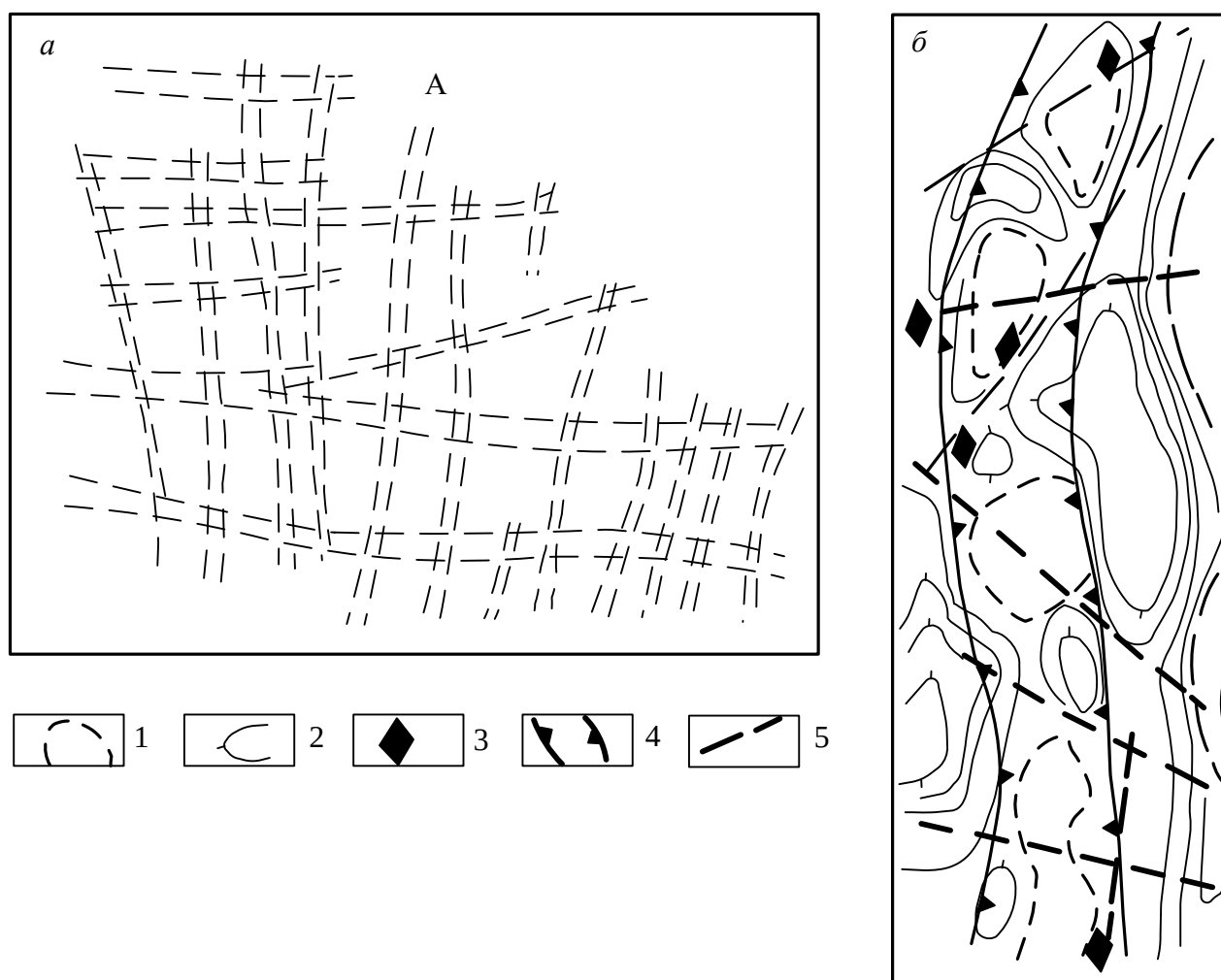


Рис. 14. Схемы сетки поясов глубинных разломов Оренбургского Урала (а) и Домбаровской рудной зоны в пределах Ащебутакского пояса (б), выделенные по данным гравиметрии (по А. М. Виноградову):

А – Ащебутакский глубинный разлом; б: 1 – участки отрицательных остаточных аномалий силы тяжести; 2 – некоторые изолинии положительных остаточных аномалий силы тяжести; 3 – медноколчеданные месторождения; 4 – зона магмовыводящего разлома; 5 – секущие разрывные нарушения

Гравиметрия является наиболее надежным геофизическим методом, обнаружения глубинных разломов, поскольку характеризуется наибольшей глубиной и способностью выявлять крупные геологические тела при относительно простой технологии съемки.

На примере Домбаровской рудной зоны (рис. 14, б), являющейся частью Ащебутакской полосы магмовыводящего глубинного разлома (рис. 14, а), видно, что известные медноколчеданные месторождения расположены на периферии отрицательных остаточных аномалий силы тяжести. Последние обусловлены установленными или предполагаемыми на глубине интрузиями гранитоидов. Такое представление о

связи корневых рудных месторождений с глубинными интрузиями преимущественно кислого состава, развиваемого П. Ф. Иванкиным (см. раздел 3), разделяет и крупный специалист в области рудной геофизики Урала А. М. Виноградов [4]. Отметим также приуроченность рудных месторождений Домбаровской зоны к более мелким секущим разломам (рис. 14, б), что подчеркивает важность картирования данных объектов. Свой вклад в решение этой задачи может вносить детальная гравиметровая съемка.

Существуют благоприятные предпосылки выявления разломов регионального значения по данным аэросъемки. Наиболее простым является случай, когда тектонический контакт разделяет две разнородные толщи (часто это мегаблоки) с различной магнитной восприимчивостью пород. Разлом определяется по линейной узкой полосе смены знака аномалии магнитного поля типа уступ. В областях смятия разломам соответствуют полосы несогласованности ориентировки локальных аномалий и другие отличительные признаки (см. раздел 8).

По магнитным данным часто картируются тектонические зоны, пересекающие однородный комплекс кристаллических пород. Появление аномального эффекта в подобных случаях связывается с интенсивной гидротермальной проработкой пород, в результате которой сильно намагниченные образования могут утратить свои магнитные свойства. В этом случае наблюдаются линейно-вытянутые локальные по ширине понижения магнитного поля. В других случаях гидротермальная деятельность может привести к значительному обогащению тектонических зон ферромагнитными минералами, что приводит к созданию цепочек вытянутых положительных аномалий.

Накоплен солидный опыт картирования разрывных нарушений по комплексу признаков в гравимагнитных полях, имеющих общие особенности. Подборка типичных проявления в аномальных полях уходящих на глубину разломов на картах площадных съемок приведена ниже в разделе 8 (рис. 24).

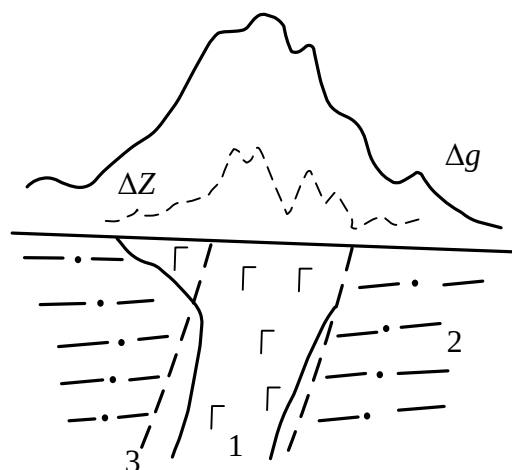
Как и при наземной съемке, благоприятные условия для картирования разломов аэросъемкой возникают при проникновении в тектонические зоны интрузий основного и ультраосновного состава. В результате формируются полосы чередующихся локальных для мелкомасштабных карт аномалий, подобных показанным на рис. 14, б.

В комплексе с магнитной часто применяют радиометрическую съемку в аэроварианте. Данные гамма-спектрометрических измерений помогают разделить блоки пород различного состава, отличающиеся содержанием радиоактивных элементов. Нередко разломы сопровождаются линейными аномалиями гамма-поля, знак и интенсивность которых зависят от целого ряда факторов.

Сейсморазведка весьма ограниченно используется для обнаружения глубинных разломов в районах перспективных на твердые полезные ископаемые. Исключения составляют работы по отдельным профилям ГСЗ (глубинное сейсмическое зондирование). Основной вклад в изучение глубинной тектоники сейсморазведка вносит в процессе поисковых работ на углеводороды.

Существует группа глубинных разломов более высокого порядка, чем рассмотренные выше, с меньшими размерами в пространстве. Их ширина измеряется сотнями метров. Они также образуют линейные пояса с локальными интрузиями преимущественно одного формационного типа. Подобные разломы нередко выделяются совпадающими гравитационными и магнитными линейными аномалиями. Пример такого разлома, фиксирующего раздвиг в массиве сланцев, показан на рис. 15.

Рис. 15. Пример проявления в гравимагнитных полях разлома, заполненного базальтоидной интрузией [4]:
1 – базальтоиды; 2 – сланцы;
3 – тектонические контакты



Часто разрывные нарушения являются границами относительно жестких участков земной коры, принявшей под действием тектонических сил блоковое строение. Блоки и разделяющие их разломы могут быть различной величины в пространстве и образовываться в результате горизонтальных и вертикальных сдвигов. В этом случае в пределах блоков геологические и геофизические характеристики обладают некоторыми стабильными признаками, а на границах блоков они из-

меняются резко. Примером в этом отношении могут служить материалы, представленные на рис. 16. По нему заметно, что на тектонических границах блоков происходит смена характера гравитационного, магнитного полей и поля электросопротивления.

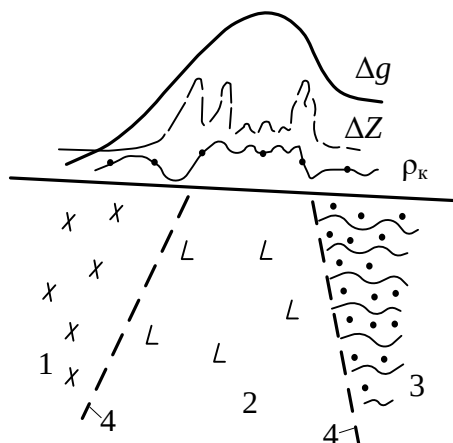


Рис. 16. Пример проявления в геофизических полях (силы тяжести, магнитном, удельного сопротивления) разрывных нарушений, являющихся границами блоков [4]:

1 – гранитоиды; 2 – вулканогенные породы основного состава; 3 – осадочные отложения; 4 – разрывные нарушения

Нередко блоковая структура проявляется в пределах однородных по составу массивов горных пород. Разрывные нарушения, являющиеся границами блоков, имеют относительно небольшую ширину (первые десятки метров и меньше) и представляют зоны трещиноватости с частично измененными дислокациями и другими процессами свойствами горных пород. В районах развития над коренными породами покровов рыхлых наносов и коры выветривания часто над зонами трещиноватости наблюдаются увеличения мощности покрова, что придает дополнительные аномальные свойства разрывным нарушениям. В верхних частях разреза, подвергшихся одновременному воздействию тектонических сил и агентов выветривания, происходит понижение значений многих физических свойств: плотности, магнитной восприимчивости, удельного сопротивления. Эти изменения обуславливают появление отрицательных аномалий гравимагнитных и электрических (кажущегося сопротивления при электропрофилировании и зондировании) полей.

Разрывные нарушения в зависимости от структуры участка и гидрогеологического режима подземных вод могут играть роль дренажной системы или, напротив, системы притока подземных вод. В первом случае над разрывным нарушением наблюдаются отрицательные, а во втором положительные аномалии естественного поля фильтрационной природы. Пример выделения разрывного нарушения комплексом геофизических методов приведен на рис. 17.

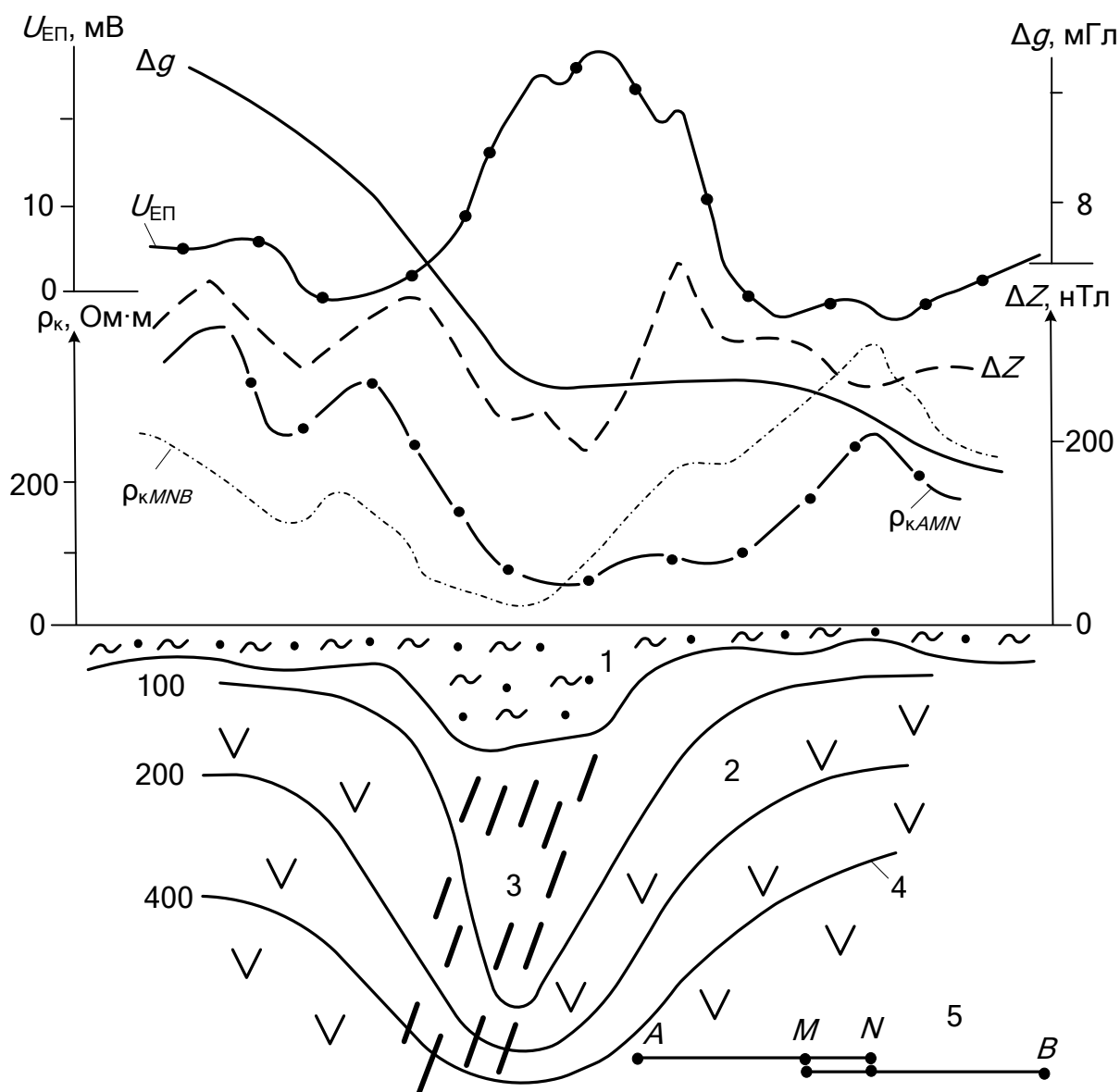


Рис. 17. Аномальные графики геофизических полей и геоэлектрический разрез, фиксирующие разрывное нарушение:

1 – рыхлые отложения; 2 – базальты; 3 – зона трещиноватости; 4 – изолинии кажущегося сопротивления геоэлектрического разреза (результаты метода ВЭЗ); 5 – установка комбинированного электропрофилирования

Приводимые на этом рисунке характеристики геофизических полей получены для относительно простой обстановки, когда тектоническое нарушение рассекает относительно однородные горные породы.

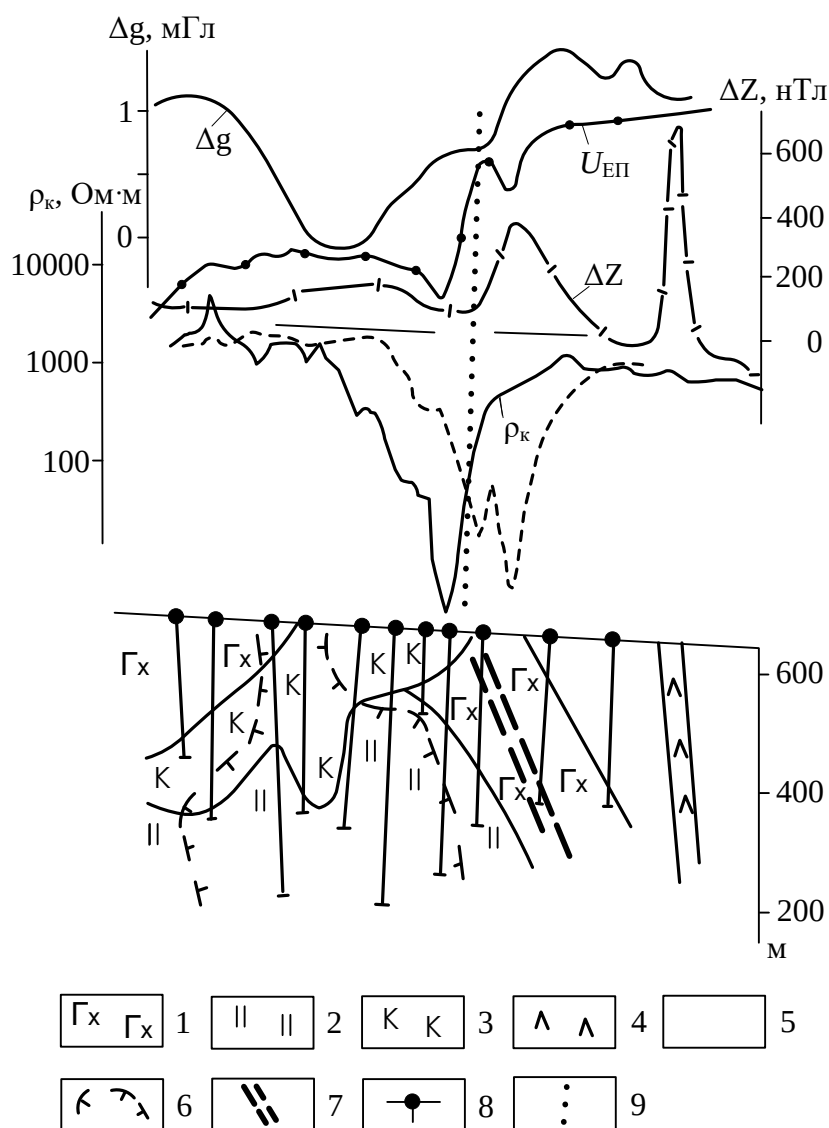


Рис. 18. Пример проявления в геофизических полях золоторудного месторождения в коре выветривания и разрывного нарушения, игравшего роль рудоподводящего канала (по материалам Северо-Енисейской геофизической экспедиции):

1 – кварц-графитистые сланцы; 2 – кварц-карбонатно-слюдистые сланцы; 3 – золотоносные коры выветривания; 4 – дайка пород основного состава; 5 – кварц-слюдистые сланцы; 6 – контур пород с повышенным содержанием золота; 7 – разрывное нарушение; 8 – скважины; 9 – корреляционная ось локальных аномалий геофизических полей над разрывом

Более интересен случай проявления разрыва на участке его действия как рудоподводящего канала. Примером в этом отношении являются материалы, представленные на рис. 18. На нем показаны графики геофизических полей, измеренные над золоторудным месторождением, сформировавшимся в коре выветривания. Рудоносные

породы отчетливо выделяются отрицательной аномалией силы тяжести как участок разуплотнения, который, видимо, существовал до начала рудообразования, и был подчеркнут изменениями при поступлении активных золотонесущих растворов. К индикаторным признакам изменений в горных породах также относятся понижения магнитного поля и удельного сопротивления, отрицательная аномалия естественного поля. Увеличивает вероятность проявления золоторудного месторождения существование в краевой части ореола измененных пород наклонного разрывного нарушения, которое фиксируется типичным набором локальных аномалий, близким по виду, тому, который наблюдается на рис. 17. Отличие состоит в том, что над разрывом в рудовмещающих породах локальные аномалии проявляются на более сложном фоне.

Наличие четких аномалий над разрывным нарушением подчеркивает важное значения этого объекта для формирования месторождения. С большой долей вероятности можно полагать, что по этому каналу трещиноватых пород и поступали к палеодневной поверхности рудоносные растворы. Просочившись в проницаемую среду они сформировали золоторудную зону, которая классифицируется как приуроченная к коре выветривания.

В условиях перекрытия разрывных нарушений мощным покровом осадочных пород или в случае слабой проявленности изменений физических свойств в зонах тектонических дислокаций существенную помощь в выявлении разрывных нарушений может оказать обобщение данных нескольких методов в форме функции комплексного показателя (см. раздел 2). В качестве примера на рис. 19 приведены результаты исследований над тектонической зоной дробления, включающей пегматитовую жилу. Тектоническая зона фиксируется четкой аномалией ФКП с максимумом равным 11,5 единиц при уровне фона для трехметодного комплекса в 3,4 единицы. По показаниям отдельных методов (радиометрии, магнитометрии и электропрофилирования) эта зона почти не проявлена.

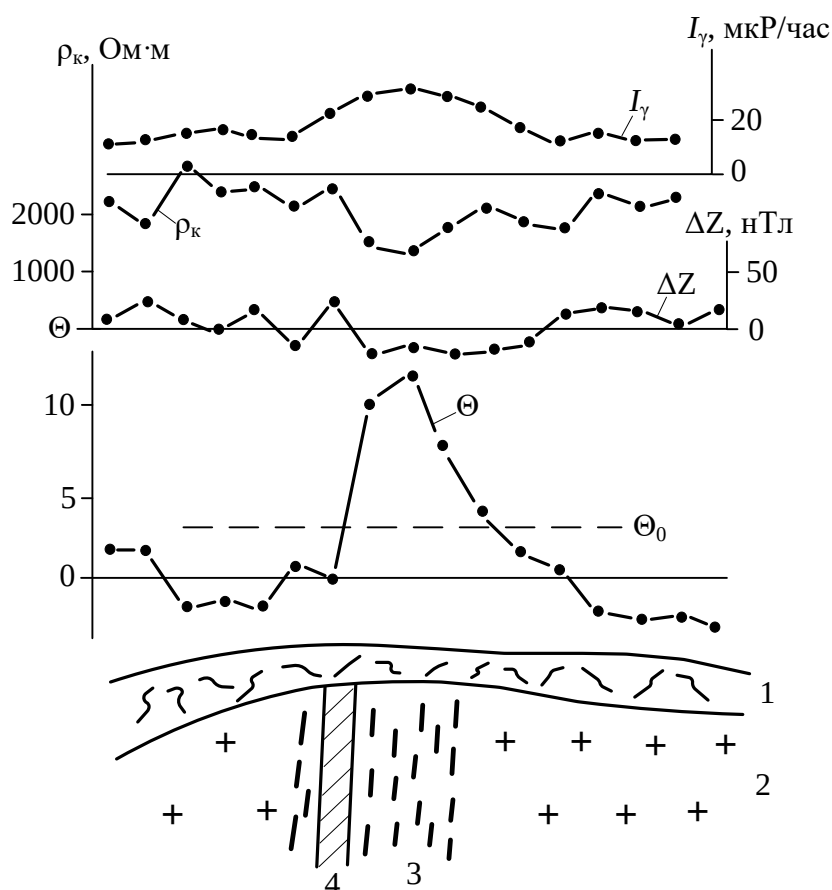


Рис. 19. Графики наземной гамма-съемки, электропрофилирования и магниторазведки над зоной дробления, включающей пегматитовую жилу, обобщенные способом построения ФКП (по Г. С. Вахромееву):

1 – элювиальные отложения, 2 – граниты; 3 – зона дробления; 4 – пегматиты

Определенную помощь в выделении разрывных нарушений особенно на стадии поисков рудных месторождений может оказать малоизвестный способ картирования горных пород по вектору градиента электропроводности [12]. Доказано, что многие геологические тела, включая зоны смятия, трещиноватости, ореолы окolorудных изменений и др., характеризуются областями изменений электропроводности, что, как было показано на приведенных ранее примерах (рис. 10, 17, 18), позволяет успешно применять для их выделения методы электрометрии. Отличительным свойством рассматриваемого метода является способность измерять новый параметр – градиент кажущегося удельного сопротивления (в дальнейшем сопротивления), а также выявлять геологические образования, когда над ними не окажется ни одной точки наблюдения.

Для практической реализации метода рекомендуется крестообразная установка. Она включает питающий электрод A , а также две

пары приемных электродов $M_1 N_1$ и $M_2 N_2$, расположенных на взаимно перпендикулярных линиях. Каждый из приемных электродов удален от центра (A) установки на одинаковое расстояние r . Отрицательный питающий электрод относят, как и в методе заряда на значительное расстояние. Для определения направления наиболее резкого падения сопротивления $\Delta\rho_r$ в окрестностях установки строят вектор по измеряемым составляющим (разностям потенциалов) ΔU_1 и ΔU_2 , оси для которых направлены из A на приемные электроды N_1 и N_2 . Значение $\Delta\rho_r$, которое согласно теории метода представляет разность сопротивлений в центре установки и минимальным сопротивлением на окружности радиуса r , вычисляют по формуле:

$$\Delta\rho_r = 2\pi r J^{-1}(\Delta U_1^2 + \Delta U_2^2)^{1/2}. \quad (7)$$

Величина градиента сопротивления равна $\delta\rho_r = \Delta\rho_r/r$.

Крестообразная установка рекомендуется не для детальных исследований, а для выделения на исследуемой площади главнейших аномальных по электропроводности объектов, к каким относятся и разрывные нарушения. Съемку можно проводить по редкой и нерегулярной сети с радиусами измеряемыми сотнями метров. При картировании геологических образований руководствуются типичными картинками поведения векторов градиента и перпендикулярным им изолиниям сопротивления [12]. Естественно, что изолинии должны оконтуривать участки, на которых происходит изменение электропроводности горных пород. Так разрывные нарушения должны иметь линейную форму изолиний сопротивления и систему векторов градиента, перпендикулярных простирацию разрыва.

На рис. 20 приведены результаты, полученные на территории, включающей медноколчеданное месторождение. Исходные данные для построения векторов градиента сопротивления получены И. М. Петруниным. В пределах изученной площади по векторам градиента и изолиниям сопротивления (перпендикулярным векторам) выделяются главные элементы рудоносной структуры: субмеридиональная зона смятия (фиксируемая комплексом геофизических методов и подтвержденная бурением), игравшая роль рудоподводящего канала, оперяющее секущее тектоническое нарушение со следами околорудных изменений в боковых породах (рудораспределяющий канал) и само месторождение. Отметим, что на изученной площади зафиксированы другими геофизическими методами многочисленные аномалии, создающие сложную для расшифровки картину.

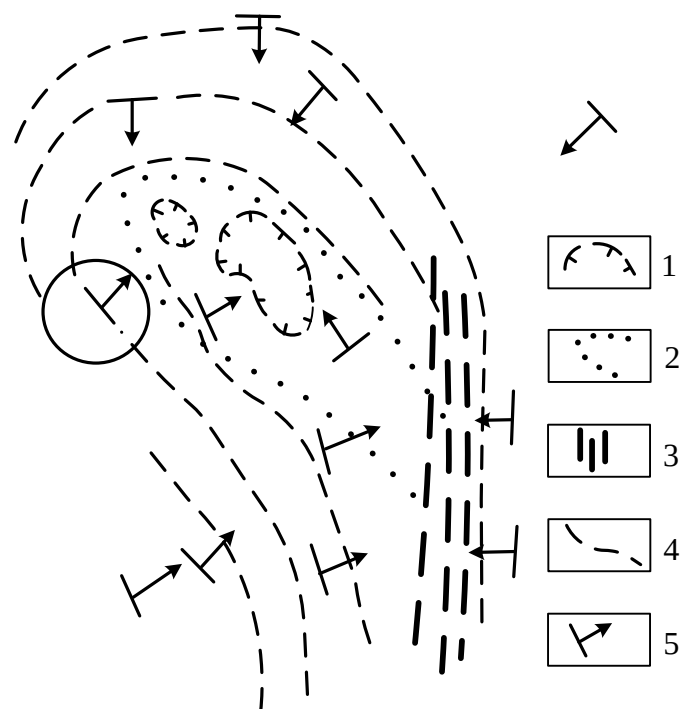


Рис. 20. Результаты измерений градиента электропроводности на южноуральском медноколчеданном месторождении:

1 – контуры рудных залежей; 2 – контуры ореола окolorудных изменений; 3 – тектоническая зона смятия; 4 – изолинии удельного сопротивления; 5 – векторы градиента электропроводности

Завершая тему выбора геофизического комплекса для выделения разрывных нарушений, еще раз подчеркнем необходимость учитывать их иерархию, сложность структуры объектов из-за насыщенности внедрившихся в ослабленные зоны более локальных по размерам геологических тел, типичные размеры разрывов различного порядка и возможности их выявления разноглубинными методами.

Пример формирования поискового комплекса геофизических методов

Рассмотрим пример формирования геофизического комплекса на примере детальных поисков урановых месторождений в условиях геологической среды, представление о которой дает геологическая модель, изображенная на рис. 6, а. Планируются поиски эндогенных месторождений секущего типа в пределах складчатой области в условиях развития разнообразных по составу и возрасту пород (субинтрузии магматических пород в толщах осадочных отложений и метаморфизованных комплексов). Мощность рыхлых отложений не пре-

вышает 30 м. Оруденение локализуется в пределах наиболее проницаемых разностей осадочных и метаморфических пород. Положение рудных залежей контролируется системами разрывных нарушений. Вдоль рудоконтролирующих систем развиты ореолы гидротермально измененных пород с проявлением сульфидной минерализации и процессов окисления продуктов метасоматоза. В периферийной части этих ореолов отмечается увеличение концентрации темноцветных минералов с повышенной магнитной восприимчивостью. Внутри ореолов, напротив, преобладают щелочные минералы с ухудшением магнитных свойств. Рудные скопления образуют крутопадающие линзо- и жиллообразные, реже штокверкоподобные залежи.

На основе опыта применения геофизических методов для поисков месторождений урана данного типа в справочной литературе рекомендуется следующий типовый комплекс для масштабов съемки 1:10000 и крупнее [2].

Геофизические методы, применяемые при детальном поиске урановых месторождений секущего типа

Метод	Решаемые задачи	Особенности геофизических полей
Гамма-съемка спектрометрическая	Обнаружение урановой минерализации, картирование интрузивных массивов	Гамма-аномалии
Эманационная съемка (шпуровая)	Выявление ореолов рассеивания урана	Локальные аномальные зоны
Гравиразведка	Картирование субинтрузий, крупных разрывных нарушений	Положительные аномалии над субинтрузиями, ослабление поля над зонами разломов
Магниторазведка	Картирование субинтрузий, обнаружение признаков ореолов гидротермалитов	Положительные аномалии над субинтрузиями, нарушение корреляции магнитных и гравиметровых аномалий над ореолами
Электроразведка (ЭП, ВЭЗ, ВП, заряд, ЕП, ЗСП, МПП и др.)	Литолого-петрографическое картирование, прослеживание рудоносных ореолов, зон трещиноватости, участков окисления и восстановления в зонах минерализа-	Дифференциация пород по удельному сопротивлению от высокоомных субинтрузий до низкоомных метасоматитов и зон трещиноватости, выявление участ-

	ции, определение мощностей рыхлых отложений и коры выветривания.	ков с сульфидной минерализацией как признака околорудных изменений
Сейсморазведка	Расчленение геологического разреза на глубину	Выделение границ толщ, фиксация зон тектонических нарушений в разрезе

Поиски начинаются со специализированного геологического картирования, задача которого является уточнение существующих геологических карт в масштабах 1:25000 и 1:10000 с последующей локализацией площадей под поиски. Основными являются гравиразведка, магниторазведка, электропрофилирование по системе редких профилей, метод ВЭЗ в отдельных точках в помощь электропрофилированию, радиометрия. По результатам предварительной интерпретации материалов съемки всех геофизических методов строятся прогнозные разрезы, для уточнения которых задаются мелкометражные скважины.

Интерпретация геофизических данных осуществляется с целью выделения и оконтуривания участков проявления поисковых признаков, преимущественно косвенных. На выявленных перспективных площадях проводятся детальные поиски масштаба 1:5000 и 1:2000 в комплексе с разведочным бурением, проходкой канав. На этих площадях сгущается сеть ранее применявшихся методов, в комплекс вводятся детализационные методы: заряда, ВП, ЕП, эманационная съемка в шпурах и мелких скважинах. В глубоких скважинах выполняются каротажные работы комплексом методов, включая метод ГК.

Эффективность комплекса поисковых геофизических методов показана на примере материалов, на основе которых сформирована ФГМ для одного из районов, в пределах которого было открыто урановое месторождение (см. раздел 3).

6. ТОЧНОСТЬ НАБЛЮДЕНИЙ

Вопрос о точности наблюдений возникает как в период проектирования геофизических работ, так и по их завершении. При планировании точности наблюдений необходимо знать уровень аномалий от объектов, представляющих интерес для решения стоящих задач, погрешности измерений, которые возникают при применении имеющейся аппаратуры и планируемой технологии измерений, а также вероятный диапазон геологических помех, типичный для фоновых образований из-за их неоднородности.

Сведения об интенсивности аномалий, подлежащих обнаружению, получают исходя из анализа сформированной ФГМ и опыта предшественников. Обычно ориентируются на некоторую минимальную по интенсивности аномалию, которая характерна для объекта, представляющего интерес при решении поисковой задачи.

Необходимо учитывать, что искомую аномалию придется обнаруживать на фоне нормального поля, присущего среде, вмещающей искомый аномалиеобразующий объект. Нормальное поле всегда имеет некоторую дисперсию D_0 , которую можно охарактеризовать через среднеквадратичную погрешность измерения нормального поля S_0 , поскольку $D_0 = S_0^2$. Как уже отмечалось в разделе 2, величину S_0 можно оценить несколькими способами. К стандартным относится аналитический способ, основанный на использовании данных n измерений поля A в пределах фоновой среды и формулы (1). В случае малой выборки вместо n применяют значение $n-1$.

Дисперсия значений в пределах нормального поля складывается из дисперсии геологических помех S_Γ , вызванных неоднородностью фонового объекта, и дисперсии показаний, связанных с аппаратурно-методическими (условно приборными) погрешностями измерений S_Π . Поэтому общая дисперсия измерений фона равна: $S_0^2 = S_\Gamma^2 + S_\Pi^2$.

Приборная погрешность оценивается по результатам независимых контрольных n измерений поля по формуле

$$S_\Pi = \pm \sqrt{\sum_1^n (A_1 - A_2)^2 / (2n - 1)},$$

A_1 и A_2 – соответственно первичное и контрольное измерение на i -ой точке.

По величине составляющей S_Γ , которая равна $S_\Gamma = (S_0^2 - S_\Pi^2)^{1/2}$, получают представление о влиянии геологических помех.

Для успешного выделения аномальных значений A_a , как это уже отмечалось в разделе 2, необходимо чтобы выполнялись условия: $A_a < (\bar{A}_0 - 2 S_0)$ или $A_a > (\bar{A}_0 + 2 S_0)$. В первом случае выделяется отрицательная, а во втором случае положительная аномалии.

Для снижения общей погрешности измерений S_0 руководствуются следующими положениями [1,3].

1. Если $S_{\Gamma} > S_{\Pi}$, то для снижения S_{Γ} полезным оказывается применение специальных методов обработки данных съемки с целью подавления геологических помех, носящих часто случайный характер. Например, простое сглаживание измеренного поля по N точкам уменьшает S_{Γ} почти в N раз.

2. Если $S_{\Pi} > S_{\Gamma}$, то есть смысл применить более точную аппаратуру или усовершенствовать технологию измерений. Например, за счет многократного (N кратного) измерения поля на одной точке и использования осредненного его значения удастся уменьшить величину S_{Π} приблизительно в $\sqrt{N}$ раз.

Среднеквадратичная приборная погрешность S_{Π} вычисляется по результатам каждой съемки. Обычно планируется для выполненного объема наблюдений провести приблизительно в 5 % точках контрольные измерения.

7. ОБОСНОВАНИЕ СЕТИ НАБЛЮДЕНИЙ

Как правило, сеть наблюдений представляет систему параллельных профилей, на которых намечаются с определенным шагом точки наблюдения. Условно принимают, что профили параллельны оси x и перпендикулярны оси y . Тогда расстояния между профилями – Δy , а между точками – Δx .

Обычно геофизическая съемка проводится в помощь геологическому картированию определенного масштаба. Исходя из этого масштаба расстояние между профилями должна составлять на отчетной карте съемки 1 см. Например, при масштабе 1:50000 необходимо иметь $\Delta y = 500$ м. Шаг наблюдений обычно в 2 раза меньше межпрофильного расстояния. В рассматриваемом примере $\Delta x = 250$ м.

При непрерывной регистрации характеристик физического поля (на борту самолета, вертолета, судна, автомобиля) в силу инерционности регистрирующей аппаратуры условным шагом съемки можно

считать величину $\Delta x = V \cdot \tau$, учитывающую скорость и постоянную времени движущегося измерителя.

В условиях резкой изменчивости свойств геологической среды масштаб геофизической съемки может быть принят вдвое крупнее, чем для геологического картирования.

При проектировании поисковых геофизических работ, проводимых, как правило, в масштабах 1:10000 и 1:5000, необходимо предвидеть вид и величину ожидаемых аномалий от объектов, представляющих первоочередной интерес для решения поисковой задачи. Этими объектами могут быть не только тела полезных ископаемых, но и связанные с ними генетически и пространственно малые интрузии, разрывные нарушения, ореолы окolorудных изменений и др., имеющие обычно меньшую контрастность по аномальным признакам. Представления о форме и размерах аномальных зон искомых геологических объектов формируются на основе анализа ФГМ.

Сеть наблюдений выбирают такой, чтобы в контур аномальной зоны попал хотя бы один профиль с двумя точками наблюдений, на которых аномальный объект будет зафиксирован.

Существует возможность теоретически оценить вероятность P обнаружения объекта [1, 6]. Обычно форму аномальной зоны объекта отождествляют с эллипсом, оси которого равны L (длина зоны) и B (ширина зоны). В наиболее простом случае вероятность пересечения аномальной зоны одним из профилей, ориентированных перпендикулярно большей оси (т.е. вкрест простирания), когда $L \leq \Delta y$, выражается простой дробью: $P = L / \Delta y$. При неизвестной ориентировке такого объекта вероятность его пересечения определяется классическим решением «задачи об игле», сформулированной монахом Ж. Бюффеном еще в 18 веке:

$$P = 2L / \pi \Delta y. \quad (7)$$

Можно отметить, что только за счет неизвестной ориентировки объекта поисков по отношению к направлению съемочных профилей при $L = \Delta y$ вероятность его обнаружения снижается с 1 до $P = 2/\pi = 0,637$.

Если известен угол β отклонения профилей от нормали к простиранию объекта в радианах, то при $L \leq \Delta y$ вероятность обнаружения объекта равна:

$$P = L \sin \beta / (\beta \Delta y). \quad (8)$$

Полезно заметить, что для значения $\beta = \pm \pi/6$ величина $\frac{\sin \beta}{\beta} = 0,955$, т.е. мало отличается от 1. Поэтому на практике достаточно чтобы сеть профилей была ориентирована только приближенно правильно. Если это условие соблюдается, то при $\Delta y = 0,9 L$ пересечение аномальной зоны профилем гарантировано.

Общее решение задачи о вероятности пересечения контура аномалии профилем при произвольном значении угла β , когда $L / \Delta y \geq 1$, приводит к выражению:

$$P = \frac{2}{\pi} \left[\frac{L}{\Delta y} + \cos^{-1} \frac{\Delta y}{L} - \sqrt{\left(\frac{L}{\Delta y} \right)^2 - 1} \right]. \quad (9)$$

При $L = \Delta y$ снова получаем $P = 2/\pi = 0,637$.

Общее выражение для вероятности пересечения аномальной зоны эллиптического вида с осями L , B и периметром Π при произвольной ориентировке профилей съемки имеет вид:

$$P = \Pi / \pi \Delta y, \quad (10)$$

$$\Pi = \frac{\pi}{2} [1,5(L + B) - \sqrt{L \cdot B}]. \quad (11)$$

Две точки профиля, пересекающего аномальную зону, окажутся внутри ее контура, если $\Delta x \leq B/2$.

Для более скупуплезной оценки вероятности P имеется серия номограмм, учитывающих возможные варианты соотношения размеров контура аномалии, параметров сети и углов β [1, 3].

Оценим для примера вероятность обнаружения аномальной зоны размером 200×50 м сетью с ячейкой 100×25 м при неизвестном простираии оси зоны. В этом случае $L = 200$ м, $\Delta y = 100$ м. и по формуле (9) получим $P = 0,83$. С использованием специальных номограмм можно установить, что объект будет обнаружен с вероятностью $P = 1$, если отклонение профилей от нормали к простираию объекта будет меньше 60° .

Следующая задача может быть сформулирована в виде задания. Необходимо определить какого минимального размера аномальная зона с неизвестным простираием может быть обнаружена с помощью сети размером в м 250×50 . Для решения найдем величину периметра зоны Π из формулы (10) для случая $P = 1$, полагая $B = 100$ м и $\Delta y = 250$ м. Эта величина равна $\Pi = 785$ м. Решая уравнение для Π от-

носителем L (методом подбора или составив квадратное уравнение относительно $\sqrt{L}$), получим искомую величину: $L = 360$ м.

На стадиях детальных поисков и разведки сеть наблюдений бывает самой разнообразной. Помимо прямоугольной сети при детальных съемках возможно проложение радиальных и криволинейных профилей, допустимо отклонения от равномерности изучения площади съемки. Повышенная детальность принята для интерпретационных профилей, шаг наблюдений на которых допустимо устанавливать таким, чтобы выявить характерные точки измеряемого физического поля (экстремумы, точки перегиба, перехода через ноль и т. п.). Обычно пункты наблюдения сгущают в районе эпицентра аномалий и разряжают на участках выхода в нормальное поле. В результате детальных работ необходимо установить конфигурацию, размеры аномалии, ее амплитуду и другие особенности, которые затем используют в процессе интерпретации.

Шаг наблюдений подбирают с таким расчетом, чтобы при аппроксимации поля между двумя фиксированными точками прямой линией отклонение фактических его значений от этой прямой не превышало 5 % средней величины значений поля. Например, при съемке естественного поля с шагом 20 м амплитуда аномалии составила 58 мВ, откуда следует, что среднее значение аномалии на профиле приблизительно равно 29 мВ. Между двумя рядовыми точками съемки, на которых получены значения 27 и 39 мВ, выполнено промежуточное измерение с результатом 36 мВ. Разница между последним значением и средней величиной рядовых измерений равна 3 мВ, что составляет 10,3 % от среднего значения аномалии. Следовательно, необходимо сгустить сеть, уменьшив шаг наблюдений по крайней мере в 2 раза.

8. ВЫДЕЛЕНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ И ИХ КОМПЛЕКСНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Конечным результатом геофизических съемок является выявление и геологическое истолкование тех неоднородностей геологической среды, которые по размерам и контрастности свойств способны создавать ощутимые аномалии.

Важнейшими проблемами анализа измеренных полей являются исключение или ослабление их составляющих, связанных с влиянием

геологических помех, разделение выделенных на фоне помех аномалий на региональные и локальные (возможно нескольких порядков). Необходимы классификация выделенных аномалий на перспективные (отвечающие целевым задачам) и неперспективные, выполнение качественной и количественной интерпретация аномалий и определение их геологической природы.

Выделение аномалий

При анализе поля A принимается аддитивная (суммирующая) его модель, согласно которой существующая в рядовой точке функциональная величина аномалии A_a имеет региональную A_{ap} , локальную $A_{ал}$ и случайную $A_{ас}$ (помеха) составляющие:

$$A_a = A_{ap} + A_{ал} + A_{ас}. \quad (12)$$

Помехи обычно отождествляют со случайными функциями и эта их особенность позволяет применять специальные методы математической фильтрации, основанные на исключении составляющих поля с высокочастотным спектром и некоррелируемостью характеристик поля по площади. Простейшей операцией по ослаблению случайной составляющей является сглаживание в окне из нескольких точек. Если взять 5 точек и применить полином третьей степени, то формула для сглаживания измеренных значений A в рядовой точке с номером i с использованием данных по соседним точкам имеет вид:

$$A_{сгл}(i) = 0,486A(i) + 0,343\{A(i+1) + A(i-1)\} - 0,086\{A(i+2) + A(i-2)\}. \quad (13)$$

Процедура сглаживания приводит к уменьшению дисперсии фона главным образом за счет снижения геологической погрешности при незначительном изменении неслучайной аномалии. В результате уменьшения общей среднеквадратической погрешности наблюдений увеличивается контрастность аномалии и, следовательно, улучшаются условия для ее выделения.

Примером могут служить результаты выделения слабой аномалии кажущейся поляризуемости, приводимые на рис. 21. Согласно исходным измерениям (график *a*), диапазон колебаний фоновых значений η_k составляет 0,5-2,5 %, а среднее значение равно 1,5 %. Выше верхнего предела фона зафиксированы 2 точки со значениями около 3 %. Полагая, что аномальные значения в этих точках равны 1,5 %, а среднеквадратичное отклонение для фона составляет 0,5 %, вычисленный показатель контрастности аномалии (см. (6)) для данных условий равен 3.

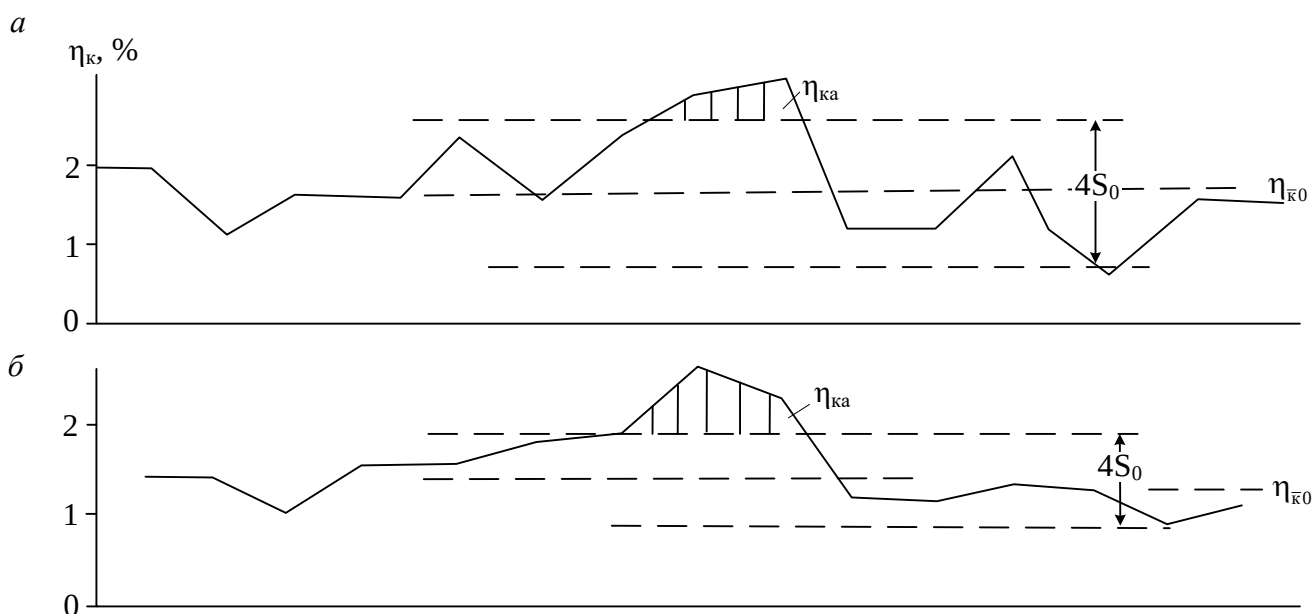


Рис. 21. Результаты выделения слабой аномалии кажущейся поляризуемости η_k по данным измеренного поля (график *а*) и после его сглаживания (график *б*)

После сглаживания исходного графика η_k по 5 точкам (график *б*), фоновые значения находятся в пределах 1-2 % при среднем 1,5 %, а аномальные значения остаются близкими к 3 %. Заметно, что на сглаженном графике аномалия проявляется более отчетливо. Этот эффект подтверждается и вычислением показателя контрастности, который становится близким к 6, то есть увеличивается в 2 раза относительно первоначального значения.

В инструкциях по ряду полевых методов к достоверной (надежность 99,5 %) аномалии относятся такие совокупности значений в не менее чем 3 точках, для каждого из которых выполняется условие: $A_a/S_0 \geq 3$. Если за аномалию принимать значения в 2 раза превышающее среднеквадратическую погрешность фона, то есть $A_a/S_0 \geq 2$, то надежность выделения такой аномалии согласно теории вероятности составляет 95 %. Оценивая надежность с точки зрения энергетического отношения аномалия/помеха, получим для последнего условия 82 %.

При выделении геофизических аномалий в общем случае проводится разделение региональных и локальных аномалий, отличающихся областью их проявления. Наилучшие условия разделения этих аномалий существуют в случае резкого их различия по размерам и интенсивности. В зависимости от целевой задачи подавляется либо одна либо другая составляющая геофизического поля. Нередко инте-

рес представляют как региональные аномалии, отражающие крупные структурные особенности геологической среды, так и локальные аномалии, которые связаны с влиянием мелких геологических тел, например рудных залежей.

Выделение региональных аномалий проводится на основе сглаживания наблюденного поля, предполагающего существенное ослабление влияния помех и локальных объектов. К основным способам выделения региональных аномалий относятся следующие.

1. Усреднение поля вдоль профилей или по площади. Часто используют поточечное усреднение в пределах круга определенного радиуса.

2. Тренд-анализ, под которым понимается процедура аппроксимации эмпирических данных вполне определенными функциями, аргументами которых являются координаты точек наблюдения. Аппроксимация может осуществляться с помощью алгебраических полиномов, как правило, невысоких степеней. При кусочно-полиномиальной аппроксимации применяют сплайн-функции, представляющие кубические полиномы для ограниченных участков площади.

3. Пересчет в верхнее полупространство позволяет существенно ослабить влияние небольших геологических неоднородностей и упростить процесс интерпретации региональной аномалии, которая проявляется более отчетливо.

Локальные аномалии определяют после исключения из измеренного поля региональной составляющей. Для того чтобы подчеркнуть существование локальной аномалии осуществляют пересчет измеренного поля в нижнее полупространство и вычисляют производные высшего порядка. Это позволяет усилить высокочастотную составляющую, связанную с геологическими телами небольших размеров.

Пример совместного проявления региональной и локальных аномалий в поле силы тяжести в районе медноколчеданного месторождения показан на рис. 22. На фоне плавного почти линейного уменьшения поля Δg в краевой части крупного массива базальтов (основные породы с повышенной плотностью) фиксируется локальная отрицательная аномалия (условно первого порядка), связанная с субинтрузией гранитоидов (породы кислого состава менее плотные по сравнению с базальтами). Региональная аномалия от массива ба-

зальтов показана на рис. 22, б штриховой линией (Δg_p). Висячем боку субинтрузии гранитоидов внутри зоны гидротермально измененных пород (метасоматиты с минимальной для разреза плотностью) находится рудная залежь (с максимальной для разреза плотностью). Ореол метасоматитов создает отрицательную аномалию (условно второго порядка), на фоне которой проявляется локальная положительная аномалия (условно третьего порядка) от рудной залежи. Для наглядности все три локальные аномалии (1, 2, 3) изображены отдельно на рис. 22, в.

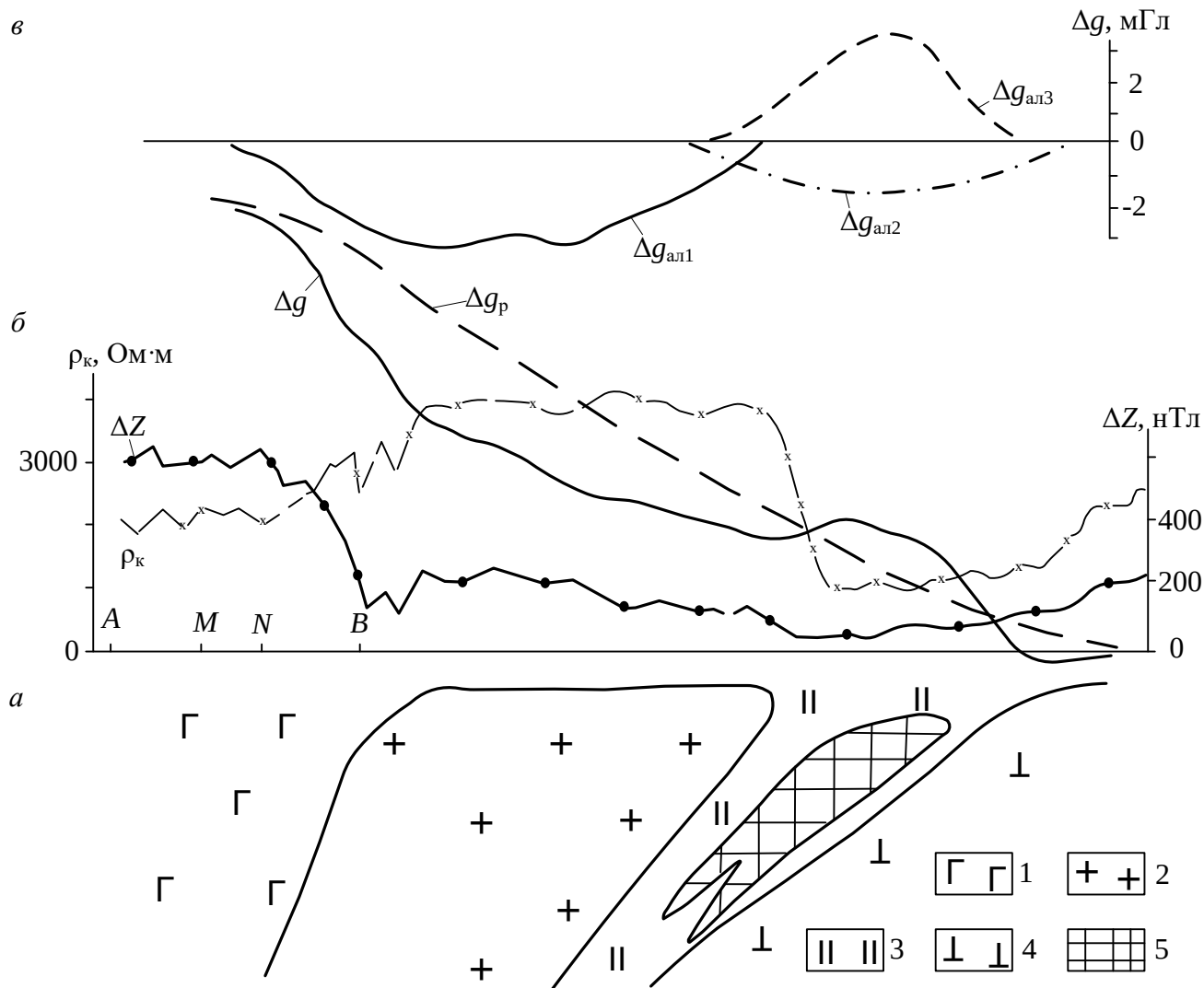


Рис. 22. Пример сложной аномалии силы тяжести, которая в совокупности с данными магниторазведки и электроразведки отражает присутствие в разрезе медноколчеданного месторождения комплекса геологических тел:

а – геологический разрез: 1 – базальты; 2 – гранитоиды; 3 – гидротермально измененные породы; 4 – туфы; 5 – руды; б – графики измеренного поля силы тяжести (Δg) и его регионального фона (Δg_p), магнитного поля (ΔZ), удельного сопротивления (ρ_k); в – графики локальных аномалий поля силы тяжести, отражающие присутствие в раз-

резе субинтрузии ($\Delta g_{ал1}$), зоны гидротермально измененных пород ($\Delta g_{ал2}$), рудной залежи ($\Delta g_{ал3}$)

О существовании нескольких локальных аномалий поля силы тяжести можно предположить по данным других геофизических методов. Так присутствие субинтрузии гранитоидов, которым соответствует обширная отрицательная локальная аномалия гравитационного поля (1), отчетливо фиксируется ступенчатым понижением магнитного поля относительно уровня, характерного для базальтов, и увеличением в этом районе кажущегося сопротивления. Выход к дневной поверхности зоны гидротермально измененных пород, которому соответствует локальная отрицательная аномалия (2), совпадает с областью минимальных значений магнитного поля и кажущегося сопротивления, что является довольно типичным признаком для ореолов околорудных изменений. Существование в этой же области слабой локальной положительной аномалии силы тяжести (3) является следствием влияния рудных масс с аномально высокой плотностью. Слабость влияния рудной залежи связано с тем, что над ее верхней кромкой залегают низкоплотные породы (метасоматиты и кора выветривания), а также эффектом наложения положительной аномалии от руды на более обширную отрицательную аномалию от зоны гидротермалитов.

Необходимо подчеркнуть важность разделения аномалий силы тяжести, поскольку результаты их количественной интерпретации позволяют сформировать представления о пространственных контурах геологических тел, создающих эти аномалии. Данные же большинства других методов имеют значение для картирования неоднородностей в верхней части разреза.

Принципы комплексной интерпретации геофизических аномалий

Цель комплексной интерпретации данных различных методов состоит в том, чтобы выполнить классификацию геологических объектов, создающих достоверные аномалии, уделяя первоочередное внимание перспективным аномалиям.

Использование эталонных аномалий. Комплексная интерпретация может осуществляться с помощью как аналитических, так и вероятностно-статистических методов. Первым этапом интерпретации является построение рабочих (интерпретационных) физико-геологических моделей, которые позволяют задать некоторые априорные рамки и сузить неопределенность решения обратной задачи, выбрав

наиболее вероятные варианты. В аналитических способах комплексной интерпретации геологические объекты и их параметры для ФГМ задаются в виде начальных приближений итерационного цикла решения обратной задачи. Интерпретатор должен представлять вид типичных аномалий, характерных для некоторого класса моделей геологических тел, подходящих для условий изучаемой среды. При этом учитываются ограничения, которые вытекают из представлений об априорной ФГМ и данных, полученных применявшимися геологическими (результаты проходки канав, шурфов, скважин), геохимическими и геофизическими методами.

Примером приемов решения обратных задач на участке проведения съемки методом заряда служит геологический разрез, построенный на основе комплексной интерпретации аномального поля заряда с учетом данных измерений магнитного поля и проходки скважин глубокого и картировочного бурения (рис. 5, б). При интерпретации аномального поля заряда использован набор некоторых теоретических аномалий электрического потенциала над типовыми объектами геологических разрезов рудных полей, приведенный на рис. 23.

Пособием по интерпретации локальных аномалий комплекса геофизических методов может служить таблица-схема, представляющая подборку аномалий от тел простейшей геометрической формы с аналитическими выражениями для вычислений полей в некоторых характерных точках (приложение 1).

Традиционными являются приемы визуального сопоставления аномалий, выделяемых по различным измеренным физическим полям. При анализе аномалий ориентируются по совпадению определенных признаков на установлении меры аналогии исследуемых и эталонных объектов. В качестве эталонов используют геологические тела, детально изученные как геофизическими, так и геологическими методами, подтвержденные бурением и горными выработками.

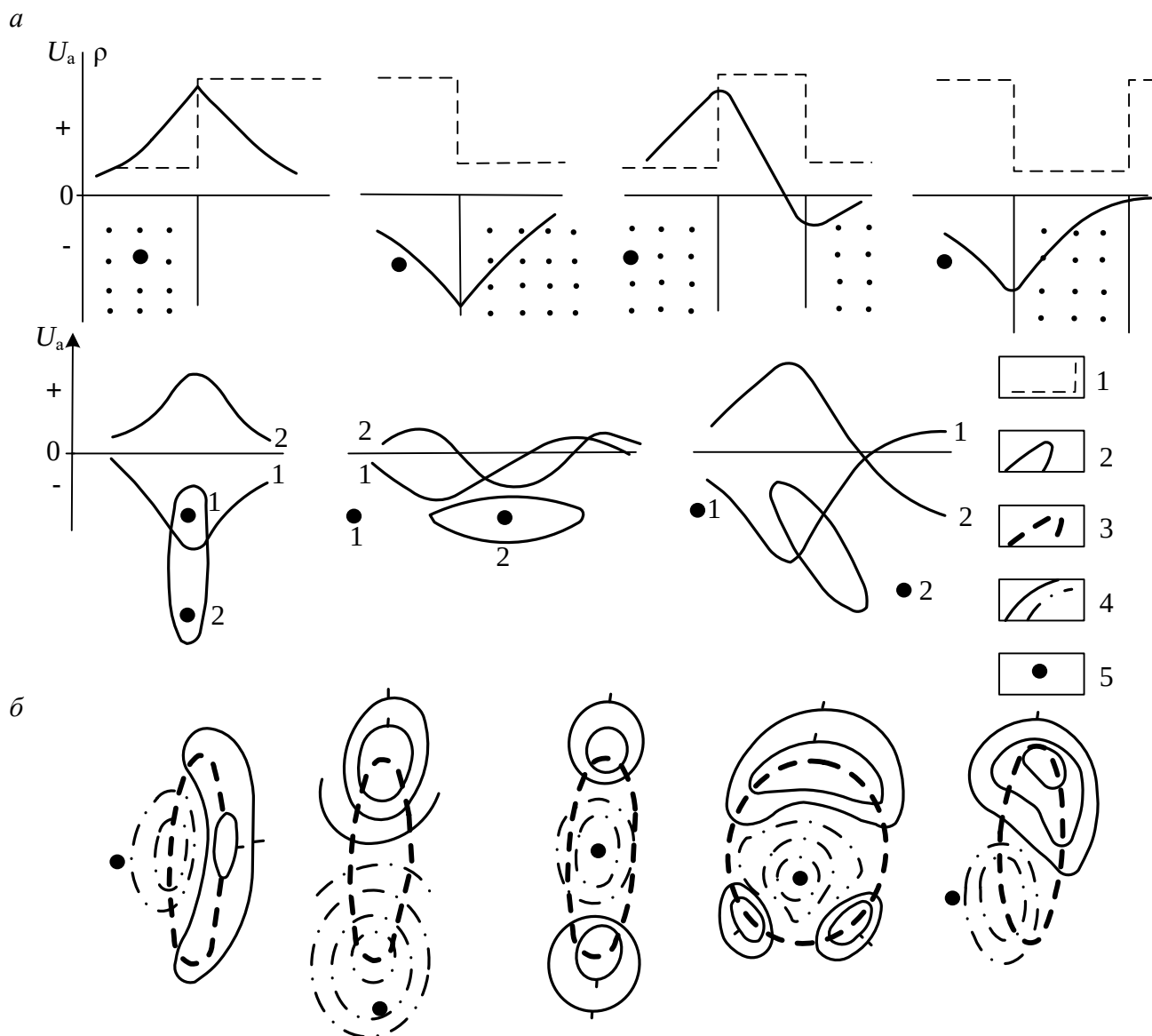


Рис. 23. Графики (а) и планы изолиний (б) аномального электрического потенциала (U_a) поля заряда в присутствии пластовых и сфероидальных тел:

1 – графики удельного сопротивления (ρ) слоистых сред; 2, 3 – погруженный сфероидальный проводник в разрезе (2) и плане (3); 4 – изолинии положительного (сплошные линии) и отрицательного (штрихпунктирные линии) аномального потенциала; 5 – заряд

Фактически задача подготовки к комплексной интерпретации сводится к созданию физико-геологических моделей типовых объектов-эталонов. Например, составляется сводка признаков, по которым могут быть откартированы тектонические нарушения. К их признакам обычно относят: отрицательные аномалии гравитационного, магнитного полей, кажущегося сопротивления, связанные с разрыхлением пород в зоне нарушения, увеличением над ним коры выветривания. В ряде случаев нарушениям в плане соответствуют узкие полосы

резкого изменения поля, связанного с различием свойств двух блоков, разделенных разрывом. Для тектонических нарушений характерна линейность в проявлении отмеченных признаков. В качестве эталонных аномалий гравитационных и магнитных полей, фиксирующих проявления разрывной тектоники, может служить подборка, приведенная на рис. 24. Признаки разрывов выражаются в сгущении изолиний, смене ориентировки большой группы локальных аномалий, повторяющимся изломом аномалий, наличием линейно вытянутых аномалий большой протяженности, смещении осей локальных аномалий или характерные деформации изолиний в определенном направлении. Все эти особенности аномальных полей можно видеть на рис. 24.

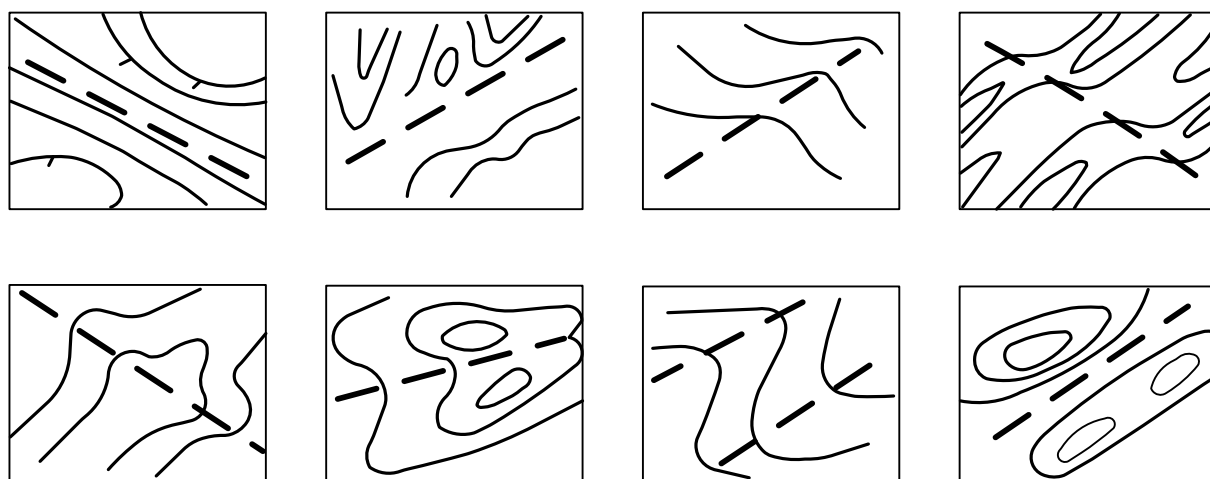


Рис.24. Примеры проявления тектонических нарушений (штриховые линии) в аномальных гравитационном и магнитном полях (по Г. Г. Кассину)

Разработаны специальные программы, позволяющие выделять и классифицировать комплексные аномалии в автоматическом режиме на основе некоторого набора эталонных образов типовых объектов. Результатом компьютерных способов распознавания образов являются прогнозные карты изученной территории с разбиением на несколько классов, характеризующихся различным набором признаков и имеющие определенное геологическое значение [2].

Одним из путей решения задачи диагноза геофизических аномалий является вычисление функций комплексного показателя (ФКП) θ , интегрировано обобщающих результаты измерений несколькими методами одновременно. Они служат для: 1) свертывания информации, полученной несколькими методами исследования; 2) приведения

наблюдений к уровню нормального поля; 3) выделения слабых аномалий; 4) разделения выявленных комплексных аномалий на перспективные и неперспективные [1].

Техника вычисления ФКП рассмотрена в разделах 3 и 5, а пример ее использования рассмотрен на материалах, послуживших основой при построении ФГМ для поисков месторождений урана (см. раздел 3, рис. 6). Полезность определения ФКП продемонстрирована также на рис 19.

Приводимое на рис. 6 отдельное вычисление ФКП для данных гравимагнитных исследований и поисковых методов электроразведки и радиометрии связано с различием задач, которые ставятся перед этими комплексами. С помощью первых методов можно картировать выходы к дневной поверхности потенциально рудоносных сланцев и подстилающих карбонатных отложений. Как показано на рис.6, эта задача решается успешно и выявляемые аномалии ФКП (Θ_1) являются перспективными и локализуют участки для детальных поисков.

В случае применения поискового комплекса обнаружение аномалий ФКП для этого комплекса (Θ_2), подобной той, которая изображена на рис. 6, позволяет отнести ее к перспективным и рассматривать как признак присутствия уранового оруденения.

Количественная комплексная интерпретация наиболее эффективна для сильных аномалий, то есть при больших значениях показателей контрастности. Данные совокупности методов позволяют более надежно установить возможные ограничения, которые необходимо учитывать при применении интерпретационного аппарата математической физики. Наиболее успешным является метод подбора параметров аномалиеобразующих объектов, позволяющий получить решение прямой задачи, соответствующее эмпирическим данным об изучаемых полях.

Прежде чем перейти к построению детальной ФГМ осуществляется экспресс-интерпретация полей путем оценочных вычислений ожидаемых для модели аномалий и их сопоставления с реально измеренными полями на участке работ. Для этих целей можно воспользоваться уже упоминавшейся выше таблицей-схемой аномалий для тел правильной геометрической формы. Таблица дает представление о виде геофизических аномалий и их амплитуде при известных форме, размерах, условиях залегания и аномальности физических (плотност-

ных, магнитных, электрических) свойств большой группы объектов, моделирующих геологические тела.

Способ подбора. Для уточнения форм аномалиеобразующих геологических тел используется способ подбора, который предполагает отыскание их границ по полям для отдельных методов с учетом ограничений, вытекающих из данных других методов. Например, при интерпретации сложных гравиметровых аномалий по профилю необходимо предварительно определиться с уровнем региональной аномалии и создающей ее неоднородностью, а также с количеством и видом локальных аномалий, подлежащих количественной интерпретации. Существенную помощь при этом могут оказать данные других геофизических методов. Например, как это показано по материалам рис. 22, можно обосновать возможность выделения локальных аномалий от нескольких объектов и высказать предположения об их геологической природе.

По данным электрозондирования часто удается установить положение кровли коренных горных пород и вероятные физические характеристики скрытых под наносами геологических тел (на основе корреляционных зависимостей между электрическими и другими физическими свойствами). Часто по аномалиям методов естественного электрического поля и вызванной поляризации проявляются участки рассеянной сульфидной минерализации, типичные для окколорудно-измененных пород. Пример подобных аномалий приведен в разделе 3 на рис. 10. Естественно, что имеет смысл геометризовать в пространстве эти участки, данные о выходах к дневной поверхности которых устанавливаются электроразведкой. Особый интерес представляет задача определить положение в пространстве рудных залежей, признаки существования которых заметны в аномальном поле силы тяжести и могут проявиться по данным специальных методов, например метода переходных процессов.

Для реализации способа подбора в рамках каждого метода разработаны разнообразные программы. Например, применительно к методу ВЭЗ разработан набор программ, как для ручной, так и машинной (компьютерной) интерпретации. Подбор сводится к сопоставлению наблюдаемых кривых с теоретически рассчитанными графиками для горизонтально-слоистой среды с известными параметрами (удельное сопротивление и мощность) слоев. Для снижения неоднозначности интерпретации используют данные о сопротивлении не-

которых опорных слоев или точно установленных границах на отдельных участках работ. Наиболее достоверные данные получают при наличии скважин.

Классификация геологических объектов на принципе самообучения

Этот принцип позволяет по совокупности геофизических данных разделить площадь исследований на некоторое число однородных (по совокупности признаков) классов (объектов), причем их геологическая природа может до определенного времени оставаться неясной. Для установления природы таких классов требуется выполнить геологические исследования (анализ проб, проходка скважин и др.), однако объем заверочных исследований невелик. Достаточно проанализировать данные по типичным представителям классов.

Примером реализации такого подхода могут служить материалы петрофизической классификации и картирования горных пород по данным измерений физических полей в скважинах [10]. Так при разведке медноколчеданного месторождения Осеннее на Южном Урале было установлено, что рудовмещающая структура представляет сложно построенную вулcano-тектоническую депрессию, осложненную крутопадающими и межслоевыми нарушениями. Всего в разрезе месторождения выделялось около десятка разновидностей литотипов [11], представлявших сложный комплекс геологических тел. Определенные сложности возникали с установлением наименования пород, подвергшихся гидротермальному метасоматозу, а также с определением роли субвулканических липарито-дацитов в формировании месторождения.

Для классификации геологических объектов на месторождении были привлечены данные каротажа естественной радиоактивности (ГК), которые, как известно, наиболее тесно связаны с литологическими особенностями горных пород. По этому свойству легче всего определить тип породы, подвергшейся эпигенетическим преобразованиям и принявшей черты метаморфизованной разновидности. Построенная по результатам статистической обработки диаграмм ГК, по методике изложенной в разделе 3, дифференциальная кривая распределения радиоактивности изображена на рис. 25. Из этой кривой следует, что все рудовмещающие породы можно разделить на три статистически однородные совокупности (А, Б, В) и определить границы

между ними (9 и 25 мкР/час) для построения петрорадиоактивных разрезов.

Результаты анализа химического состава показали, что радиоактивность рудовмещающих пород возрастает пропорционально увеличению кремнезема (47,6, 57,3, 65,7 %) и калия (1,9, 3,3, 4,8 % K_2O) и положительно коррелируется с повышением кислотности пород, которая в свою очередь отражает последовательность поступления в изучаемый массив магматических инъекций. Построенные петрофизические разрезы значительно проще геологических разрезов и наглядно отражают структурные особенности и историю формирования месторождения. Для этого на петрорадиоактивный разрез наложены контуры зон, отражающие степень сульфидной минерализации пород, установленные в результате статистической обработки диаграмм метода электродных потенциалов (МЭП). Данные метода фиксируют степень рудной концентрации ($>0,65$, $0,65-0,3$, $<0,3$), соответствующей уровню сплошных руд (класс Р), сильно измененных и сульфидизированных пород (класс С) и слабо измененных околорудными процессами участков разреза.

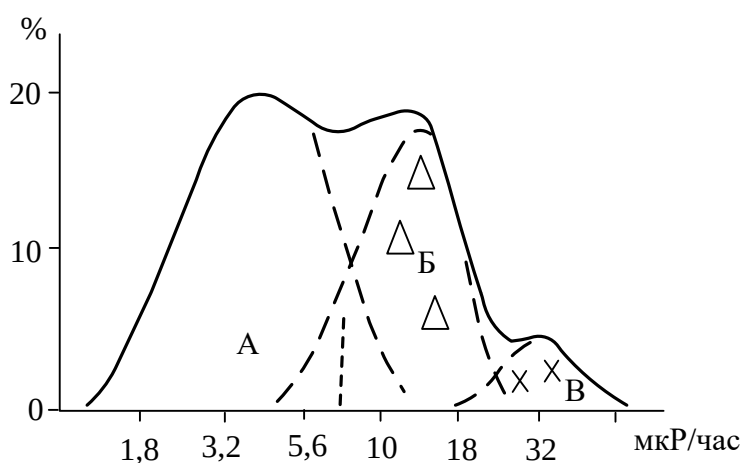


Рис. 25. Дифференциальная кривая распределения гамма-активности рудовмещающих пород медноколчеданного месторождения Осеннее

Результаты классификации геологических объектов по данным измерений двух геофизических полей на принципах самообучения с помощью статистического способа позволили построить петрофизические разрезы, на которых породы разделены на обоснованное огра-

ниченное число классов, отражающих главные черты рудоносной структуры.

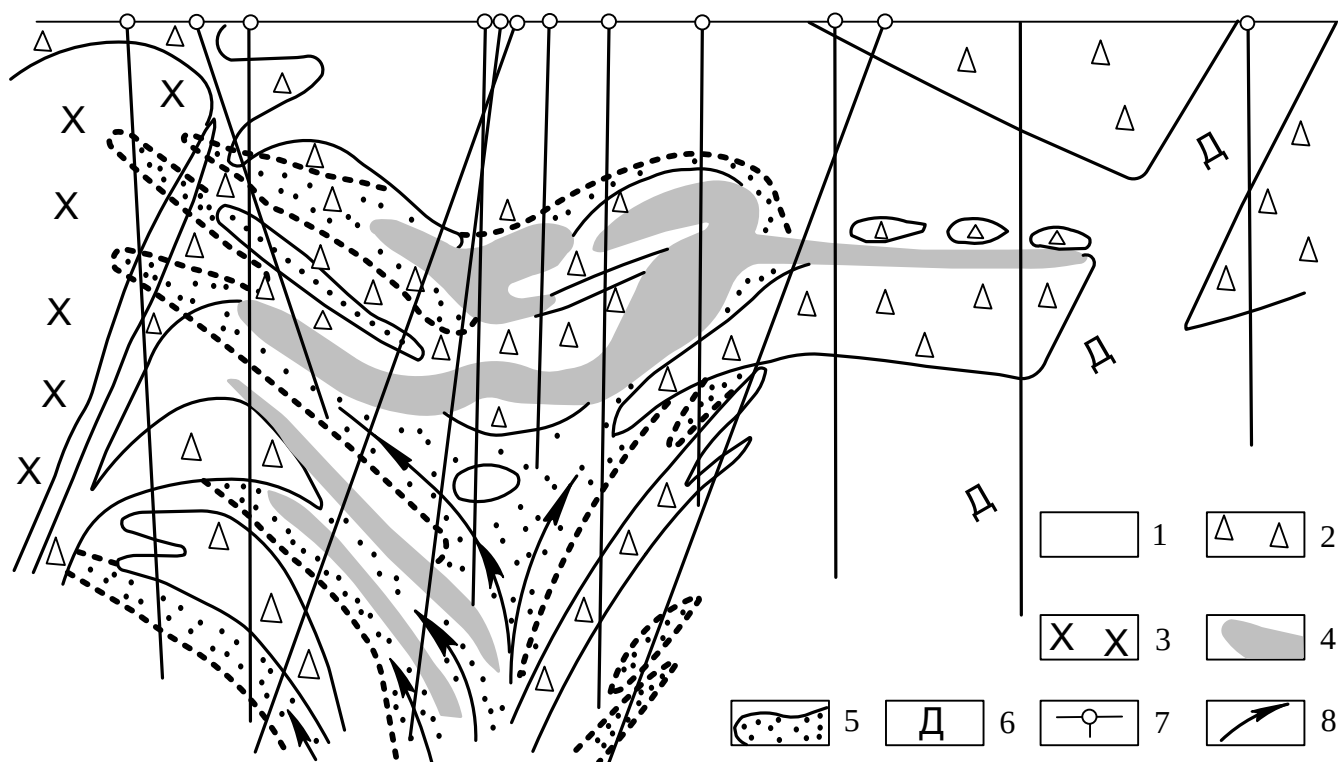


Рис. 26. Петрофизический разрез (классификация по двум геофизическим полям: ГК и МЭП) медноколчеданного месторождения Осеннее:

1, 2, 3 – петрорадиоактивные группы пород А, Б и В, соответственно; 4 – сплошные руды (класс Р); 5 – богатая сульфидная минерализация (класс С); 6 – дайка основных пород; 7 – скважины; 8 – предполагаемые пути движения рудоносных растворов

Один из таких разрезов приведен на рис. 26. Из него видно, что в массив, сложенный комплексом вулканогенных пород основного состава (комплекс пород класса А с низкой радиоактивностью) на завершающей стадии активного вулканизма по субвертикальной тектонической зоне внедрились субинтрузии кислых пород (липарито-дацитовые порфиры – класса Б по радиоактивности). Эти породы имеют силлобразную форму с корнями, уходящими на глубину. На заключительной стадии вулканизма ранее сформированная толща была прорвана интрузией (сиенит-диориты класса В с наибольшей радиоактивностью). Поступление рудоносных растворов происходило по каналу уже пройденному субинтрузиями липарит-дацитов, кото-

рые перекрыли сквозную тектоническую зону, образовав экранированную структуру с участками повышенной проницаемости на контактах кислых и основных пород. Эти участки брекчирования и явились теми самыми резервуарами, в которых накапливались руообразующие смеси.

Контуры зон, отражающих классы пород с высокой и умеренной степенью сульфидной минерализации (классы Р и С, соответственно) фиксируют картину проникновения рудных растворов с глубоких горизонтов вверх по узкому субвертикальному каналу. Очевидно, что в верхней части разреза происходило распределение этих растворов по экранированным пологим участкам брекчирования на контактах вулканогенных и субинрузивных пород, где увеличивалась концентрация рудного вещества. По данным комплексной интерпретации геофизических полей медноколчеданное месторождение Осеннее является типичным представителем корневых рудных полей II рода, геологические модели которых рассмотрены в разделе 3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основной

1. *Вахромеев Г. С.* Основы методологии комплексирования геофизических исследований при поисках рудных месторождений. М.: Недра, 1978. 152 с.

2. *Комплексирование методов разведочной геофизики: Справочник геофизика* / под ред. В. В. Бродового, А. А. Никитина М.: Недра, 1984, 384 с.

3. *Никитин А. А., Хмелевской В. К.* Комплексирование геофизических методов: учебник для вузов. Тверь: ООО Изд. «ГЕРС», 2004, 294 с.

Дополнительной

4. *Виноградов А. М.* Геополя и колчеданы Южного Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 2004, 187 с.

5. *Геофизические методы разведки рудных месторождений.* / В. В. Бродовой, В. Д. Борцов, Л. Е. Подгорная и др. под ред. В. В. Бродового. М.: Недра, 1990, 296 с.

6. *Геофизические методы поисков и разведки неметаллических полезных ископаемых* / под ред. П. В. Вишневого, Г. С. Вахромеева, И. Л. Шаманского. М.: Недра, 1984, 223 с.

7. *Геофизические поиски рудных месторождений* / под ред. В. А. Кличникова. Алма-Ата: Каз.ФВИРГ, 1970, 610 с.

8. *Кассин Г. Г.* Геофизические методы на региональном этапе геологоразведочного процесса. Екатеринбург: УГГА, 1996, 104 с.

9. *Рудные месторождения СССР* / под ред. В. И. Смирнова. Том 3. М.: Недра, 1974, 392 с.

10. *Сапожников В. М.* Использование диаграмм каротажа для петрофизического картирования рудовмещающих горных пород. / Методика поисков и разведки глубокозалегающих рудных месторождений. Вып.1. Межвуз. науч. темат. сб. Свердловск: изд. УПИ, 1977, с. 11-19.

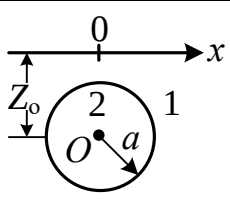
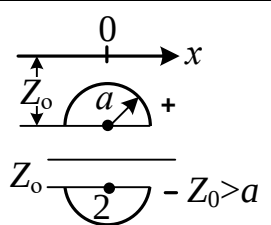
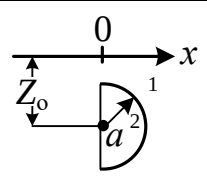
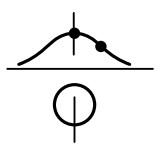
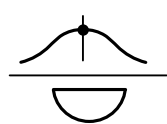
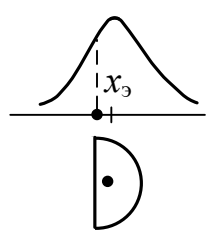
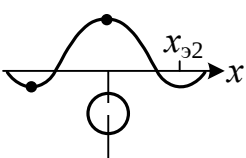
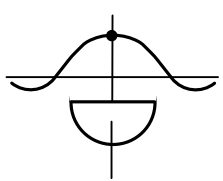
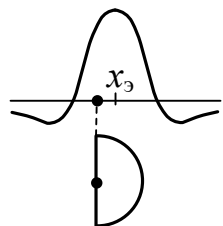
11. *Сапожников В. М., Голиков Ю. В., Берг Л. Я.* Опыт объемного петрофизического картирования рудовмещающих пород месторождения Осеннее / Методика поисков и разведки глубокозалегаю-

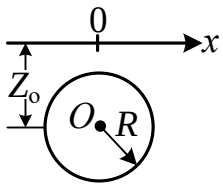
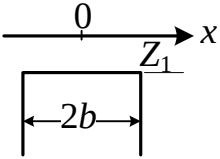
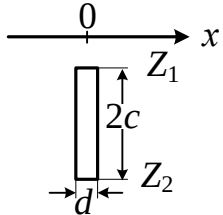
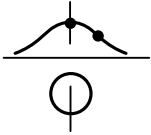
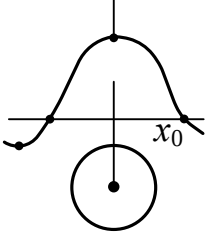
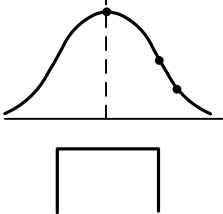
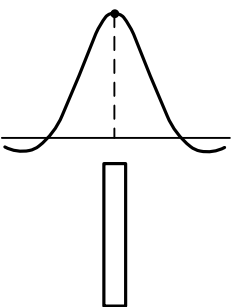
щих рудных месторождений. Вып.1. Межвуз. науч. темат. сб. Свердловск: изд. УПИ, 1977, с. 20-27.

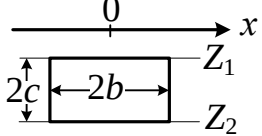
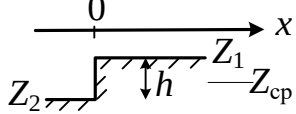
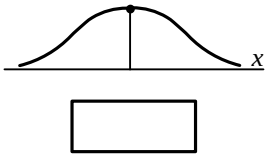
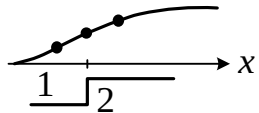
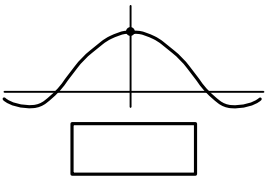
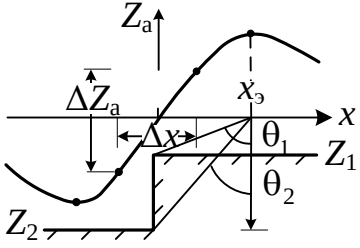
12. Сапожников В. М., Шевченко В. Г. Теория и методика электроразведки в градиентных средах. Л.: Недра, 1992, 135 с.

13. *Электроразведка рудных полей методом заряда* / М. В. Семенов, В. М. Сапожников, М. М. Авдевич, Ю. В. Голиков. Л.: Недра, 1984, 216 с.

**Сводка формул для вычисления значений
аномальных полей в характерных точках**

1		III	III _Г	III _В
2	разрез			
3	Δg_a^3	$\frac{4G\pi a^3 \Delta \sigma}{3Z_0^2}$ $x_{1/2} = 0,77Z_0$ 	$\frac{2G\pi a^3 \Delta \sigma}{3Z_0^2} \left(1 \pm \frac{3a}{4Z_0} \right)$ 	$\frac{2G\pi a^3 \Delta \sigma}{3Z_0^2}$ $x_3 = \frac{3}{8}a$ 
4	Z_a^3	$\frac{8\pi a^3 J}{3Z_0^3}$ $x_0 = \pm Z_0 \sqrt{2}$ $x_{32} = \pm 2Z_0$ $Z_{a2}^3 = -0,036Z_a^3$ 	$\frac{4\pi a^3 J}{3Z_0^3} \left(1 \pm \frac{9a}{8Z_0} \right)$ 	$\frac{4\pi a^3 J}{3Z_0^3}$ $x_3 = \frac{3}{8}a$ 
5	ρ_k^3 η_k^3	$\frac{2\kappa_1 \rho_1 a^3}{Z_0^3}$	$\frac{2\rho_1(\mu-1)a^3}{5\mu+1} \times$ $\times \left(\frac{1}{Z_0^3} \pm \frac{9a}{8Z_0^4} \right)$	$\frac{\rho_1(\mu-1)a^3}{(\mu+2)Z_0^3}$

1		Ц	МП	ТП
2	разрез			
3	Δg_a^3	$\frac{2G\pi R^2 \Delta \sigma}{Z_0^2}$ $x_{1/2} = \pm Z_0$ 	$\pm \infty$	$2Gd\Delta\sigma \ln \frac{Z_2}{Z_1}$ $x_{1/2} = \pm \sqrt{Z_1 Z_2}$ 
4	Z_a^3	$\frac{2\pi R^2 J}{Z_0^2}$ $x_{\min} = \pm Z_0 \sqrt{3}$ $x_0 = \pm Z_0$ 	$4J \operatorname{arctg} \frac{b}{Z_1}$ $x_{1/2} = \pm \sqrt{b^2 + Z_1^2}$ $x_{1/4} = \pm \sqrt{x_{1/2}^2 + 2Z_1 x_{1/2} }$ 	$2J d \left(\frac{1}{Z_1} - \frac{1}{Z_2} \right)$ 
5	ρ_k^3 η_k^3	$\frac{2\kappa \rho_1 R^2}{Z_0^2}$	$\frac{2\rho_1(\mu-1)}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{b}{Z_1}$	$\frac{\rho_1 d}{\pi m} \left(\frac{1}{Z_1} - \frac{1}{Z_2} \right)$ $m = \frac{\mu}{\mu-1} - \frac{c}{b+c}$ $d = 2b$

1		Пр	У
2	разрез		
3	Δg_a^3	$2G\Delta\sigma\left\{b\ln\frac{Z_2^2+b^2}{Z_1^2+b^2} + 2(f_2 - f_1)\right\}$ $f_i = Z_i \operatorname{arctg} \frac{b}{Z_i}$ 	$2\pi Gh\Delta\sigma$ $x_3 \rightarrow \infty$ $x_{1/2} = 0$ $x_0 \rightarrow -\infty$ $x_{1/4} = -Z_{cp}$ $x_{3/4} = Z_{cp}$ 
4	Z_a^3	$4J\left(\operatorname{arctg} \frac{Z_2}{b} - \operatorname{arctg} \frac{Z_1}{b}\right)$ 	$Z_a = 2J(\theta_1 - \theta_2)$ $\theta_{1,2} = \operatorname{arctg} \frac{x}{Z_{1,2}}$ $x_0 = 0$ $x_3 = \pm\sqrt{Z_1 Z_2}$ $x = 0 \quad \Delta Z_a / \Delta x = \frac{2J}{Z_1}$ 
5	ρ_k^3 η_k^3	$\frac{2\rho_1}{\pi m} \left(\operatorname{arctg} \frac{Z_2}{b} - \operatorname{arctg} \frac{Z_1}{b} \right)$ $m = \frac{\mu}{\mu - 1} - \frac{c}{b + c}$	$\rho_{ка} = \rho_1 \frac{(\mu - 1)(\theta_1 - \theta_2)}{\mu\pi}$ при $\rho_2 = \rho_1$ $\eta_{ка} = (\eta_2 - \eta_1) \frac{\theta_1 - \theta_2}{\pi}$

Пояснения

Аномальные геофизические поля: гравитационное (Δg_a), магнитное (Z_a), удельное сопротивление ($\rho_{ка}$) и поляризуемость ($\eta_{ка}$).

Тела: шар (Ш), полушары вертикальный (ПШВ) и горизонтальный (ПШГ), цилиндр (Ц), мощный пласт (МП), тонкий пласт (ТП), прямоугольная прямая призма (ПР), вертикальный уступ (У).

Размерности: линейные величины в м, $\Delta\sigma$ -избыточная плотность в г/см³; $G=6.67\cdot 10^3$ внесистемный вариант гравитационной постоянной, позволяющий получать Δg_a в мГл.; $\Delta\chi$ -избыточная магнитная восприимчивость в системе СГС ($\Delta\chi_{СГС}=4\pi\cdot\Delta\chi_{СИ}$); J_i -интенсивность вертикального намагничивания: $J_i=\Delta\chi\cdot Z_n$; Z_n – нормальное поле Земли: $Z_n\approx 0.5$ Э; 1 Эрстед=10⁵ нТл.; $\text{artg } x$ в радианах; ρ_1 и ρ_2 – удельное сопротивление вмещающей среды и тела, соответственно; $\mu=\rho_2/\rho_1$; $K=(\mu-1)/(\mu+1)$; $K_1=(\mu-1)/(2\mu+1)$; $\rho_k=\rho_1+\rho_{ка}$; $\eta_k=1-\rho_k/\rho_k^*$; $\rho_1^*=\rho_1/(1-\eta_1)$; $\rho_2^*=\rho_2/(1-\eta_2)$; $\mu^*=\rho_2^*/\rho_1^*$; $\rho_k^*=\rho_1^*+\rho_{ка}^*$; $\eta_{ка}=\eta_k-\eta_1$; графики $\rho_{ка}$ и $\eta_{ка}$ подобны графикам Z_a ; $x_э=0$ (кроме уступа).

Учебное издание

Сапожников Вадим Михайлович

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ
ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Учебное пособие

Редактор _____
Компьютерная верстка Г. А. Косаревой,

Подписано в печать _____ 2019 г. Бумага писчая. Формат 60х84 1/16.
Печать офсетная. Гарнитура Times New Roman.
Печ. л. _____. Уч.-изд. л. _____. Тираж _____. Заказ № _____

Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Уральский государственный горный университет
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ



Министерство образования и науки РФ

ФГБОУ ВО

**«Уральский государственный
горный университет»**

А. Г. Талалай

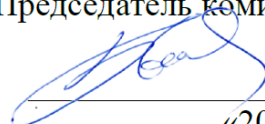
Комплексная интерпретация геофизических данных

**Методические указания
по выполнению индивидуальных заданий курса
«Комплексная интерпретация
геофизических данных»
для студентов специальности
21.05.03 Технология геологической разведки
специализации
Геофизические методы исследования скважин**

**Екатеринбург
2020**

Министерство образования и науки РФ
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

ОДОБРЕНО
методической комиссией
факультета геологии и геофизики
Председатель комиссии



В. И. Бондарев
«20» марта 2020 г.

Комплексная интерпретация геофизических данных

**Методические указания
по выполнению индивидуальных заданий курса
«Комплексная интерпретация
геофизических данных»
для студентов специальности
21.05.03 Технология геологической разведки
специализации
Геофизические методы исследования скважин**

Методические указания по
выполнению индивидуальных
заданий по курсу
«Комплексная интерпретация
геофизических данных»
для студентов специальности
21.05.03 Технология
геологической разведки,
специализации «Геофизические
методы исследования скважин»

Методические указания содержат работы по построению физико-геологической модели объекта поисков, статистической обработке результатов измерений физических свойств горных пород, оценке геологической информативности геофизических методов, выделению аномалий на фоне нормальных значений геофизических полей и комплексной интерпретации геофизических наблюдений с использованием функции комплексного показателя.

Методические указания предназначены для студентов 21.05.03 Технология геологической разведки, специализации Геофизические методы исследования скважин.

Составитель: А. Г. Талалай, проф., д.г.-м.н.

I. Работа В. И. ПОСТРОЕНИЕ АПРИОРНОЙ ФГМ ОБЪЕКТА ПОИСКОВ

Под физико-геологической моделью объекта геофизических поисков (ФГМ) понимается абстрактное возмущающее тело, обобщенные размеры, форма и физические свойства которого с той или иной степенью приближения аппроксимируют реальные геологические и рудные образования, подлежащие обнаружению. ФГМ является обобщенным, типизированным и формализованным представлением о целой группе подобных геологических объектов. Это абстракция типа "описание-обобщение".

От реальных геологических объектов ФГМ отличается определенными размерами и обобщенной формой. Сложные по морфологии и вещественному составу геологические объекты заменяются сочетанием геометрически правильных объектов (сфера, цилиндр) с измененными статистически усредненными физическими свойствами. Это позволяет использовать простые алгоритмы для решения обратных задач на ЭВМ.

ФГМ характеризуется следующими свойствами: носит вероятностный характер, обусловленный стохастичностью используемых для ее построения геологических и петрофизических данных, отличается простотой расчета ожидаемых физических полей, характеризуются схематизированным и обобщенным характером полей, которые отражают наиболее существенные черты данного класса объектов.

Физико-геологическая модель должна соответствовать целям и задачам геофизических исследований, типу района поисков и условиям ведения работ, отражать состояние геолого-геофизической изученности данного класса объектов, отличаться по физическим свойствам от вмещающих пород и характеризоваться оптимальной сложностью.

Отличительной чертой ФГМ является ее полиморфность в отношении физических свойств и геометрических параметров объекта. Количественные параметры ФГМ зависят от факторов, которые можно объединить в три группы: физические свойства пород и руд (ϵ , μ , ρ , σ , γ , $\dots$), размеры объекта (x , y , z , $\dots$) и его форма (z_1 , z_2 , z_3 , $\dots$). Например, крутонаклонная линза сплошных медноколчеданных руд является в одно и то же время проводящим электрический ток пластом с положительной избыточной плотностью,

сжатым эллипсоидом с повышенной поляризуемостью, генератором естественного электрического поля, источником формирования ореолов рассеяния меди и т.д. Пример физико-геологической модели линзы медноколчеданных руд (по данным Г.С. Вахромеева) приведен на рис. 1.

Построение априорной ФГМ объекта поисков производится на базе справочных и литературных источников. При построении используются принципы аналогии, корреляции и обратной связи.

Принцип аналогии состоит в том, что выбор модели объекта исследований производится на основе данных, полученных на объектах со сходными геолого-геофизическими условиями. Как показывает практика ФГМ, разработанная на примере месторождения определенного класса крупности по запасам (например, среднего), может быть справедлива для аналогичных месторождений других классов крупности (например, мелких) при условии кратного изменения размеров, формы и физических свойств модели и сохранения общих условий залегания месторождений (мощность рыхлых отложений, перекрывающих и подстилающих пород).

Принцип корреляции состоит в использовании регрессионных зависимостей параметров и физических свойств объекта исследований от наблюдаемых физических полей и от других физических свойств того же объекта. Например, при разведке железорудных месторождений можно использовать связь между магнитной восприимчивостью и содержанием железа в руде. Установлены связи между скоростью распространения продольных волн и плотностью, между электрическим сопротивлением, скоростью продольных волн и плотностью, между плотностью и магнитной восприимчивостью. Например, Н.Н. Пузыревским установлена взаимосвязь скорости и плотности в виде $V = 6\sigma - 11$, связь эта может меняться в зависимости от возраста горных пород и района исследований. В поверженных породах по мере роста основности возрастают плотность и намагниченность. Породы осадочного происхождения характеризуются обратной зависимостью плотности, электрического сопротивления и скорости распространения упругих волн от пористости и т.д.

Принцип обратной связи заключается в использовании результатов обработки и интерпретации материалов экспериментальных полевых исследований с целью совершенствования ФГМ. Полученные в результате интерпретации геофизических измерений геологические выводы используются для уточнения физических свойств, размеров и формы

объекта исследований.

Физические свойства пород и руд определяются путем исследования образцов, по данным каротажа, параметрических измерений в обнажениях и по итогам интерпретации полевых геофизических методов. Данные о физических свойствах должны характеризовать все необходимые физические параметры, обеспечивающие построение комплексной ФГМ, обеспечивать по точности измерений решение поставленной геологической задачи, иметь пространственную и геологическую привязку, быть представленными для статистической обработки, т.е. замеры должны быть массовыми и достаточно представительными. Сведения о размерах и форме объекта поисков получают при его разведке.

1.1. Задание

Построить априорную физико-геологическую модель объекта геофизических поисков, используя для этой цели основные принципы построения ФГМ, материалы преддипломной производственной практики, материалы по физическим свойствам и литературные источники.

1.2. Содержание работы

Составить объяснительную записку, в которой сформулировать геологические задачи, которые ставятся перед геофизическими исследованиями в районе работ, например: поиски и разведка месторождений полезных ископаемых, опробование горных пород и руд, определение процентного содержания полезных компонентов, уточнение геологического разреза по измерениям в скважинах и т.д. Разделить геологические задачи на основные и дополнительные. Перечислить материалы, на основе которых строится ФГМ.

Оценить геологические условия региона и участка работ. Дать характеристику горных пород региона и участка, проанализировать размеры и условия залегания геологических объектов, вещественный состав и наличие минералов, оказывающих влияние на физические свойства горных пород района. Охарактеризовать предполагаемый объект поисков: его физические свойства, размеры, форму, глубину залегания рудных тел, запасы руд, наличие перепревающих и подстилающих горных пород, глубины и типы коры выветривания, мощность поверхностных рыхлых отложений, наличие ореолов рассеяния элементов, рельеф местности и т.д.

Проанализировать результаты предшествующих геофизических работ в районе и аналогичных районах, физические и геологические предпосылки, характер аномальных и нормальных полей, установить регрессионные зависимости параметров и физических свойств объекта поисков от наблюдаемых физических полей и других физических свойств того же объекта. Обработать и проинтерпретировать данные предшествующих экспериментальных геофизических исследований с целью уточнения физических свойств, размеров и формы объекта исследований.

На основании имеющихся материалов и литературных источников составить априорную физико-геологическую модель объекта поисков. Результаты работы обобщить и представить в форме таблицы 1.

1.3. Материалы и оборудование

1.3.1. Геологические карты региона и участка работ

Результаты геофизических исследований района работ: графики измерений физических полей по профилям, карты физических полей с нанесенными изолиниями равных значений потенциала поля, карты векторов напряженностей физических полей, вариационные кривые и histograms физических свойств горных пород и руд, корреляционные зависимости физических свойств от вещественного состава горных пород и другие материалы производственных практик.

1.3.2 Микрокалькулятор типа БЗ-21

1.4. Порядок выполнения работы

- 1) Ознакомиться с понятием физико-геологической модели по настоящей инструкции.
- 2) Сформулировать геологические задачи.
- 3) Оценить физические свойства, размеры и форму предполагаемого объекта поисков.
- 4) Проанализировать, обработать и проинтерпретировать результаты предшествующих геофизических работ в районе. Рассчитать вариационные кривые и построить histograms физических свойств объекта поисков.

5. Составить объяснительную записку.

1.5. Содержание отчета

В отчете следует сформулировать геологические задачи, стоящие перед геофизическими методами в районе работ.

Кратко указать значение выбранного объектом поисков полезного ископаемого для народного хозяйства. Дать определение ФГМ. Привести сведения о физических свойствах, размерах и форме искомого объекта. Отчет должен содержать графики исходных данных, необходимых для построения ФГМ, результаты измерений геофизических полей по профилям или в плане, расчетные или взятые из справочников таблицы физических свойств и итоговое, схематизированное обобщенное описание комплексной полиморфной ФГМ в виде таблицы I.

Таблица I

Параметры физико-геологической модели
объекта геофизических поисков

Физические свойства ($\chi_1, \chi_2, \chi_3 \dots$)	Размеры ($y_1, y_2, y_3 \dots$)	Форма ($z_1, z_2, z_3 \dots$)
χ_1 Магнитная восприимчивость χ	y_1 Горизонтальная мощность $2b$	z_1 Показатель горизонтальной протяженности
χ_2 Остаточная намагниченность J_r	y_2 Глубина залегания верхней кромки h	$L/2b$
χ_3 Избыточная плотность $\Delta \sigma$	y_3 Глубина залегания нижней кромки H	z_2 Показатель вертикальной протяженности $\frac{H-h}{h}$
χ_4 Удельное электрическое сопротивление ρ	y_4 Длина по пространству L	z_3 Показатель погруженности $\frac{H-h}{2b}$
χ_5 Поляризуемость η	y_5 Угол падения α	
χ_6 Естественная радиоактивность γ	y_6 Радиус (для изометрических тел) R	z_4 Показатель изометричности $c:d:l$
χ_7 Скорость распространения упругих колебаний v	y_7 Размеры по большой c , средней d и малой l осям (для трехмерных объектов)	
χ_8 Длина замедления быстрых нейтронов L_1		
χ_9 Длина диффузии тепловых нейтронов L	y_8 Расстояние до центра H_0	
.....		

Физико-геологическая модель линзы медноколчеданных руд
(по Г.С.Вахромееву)

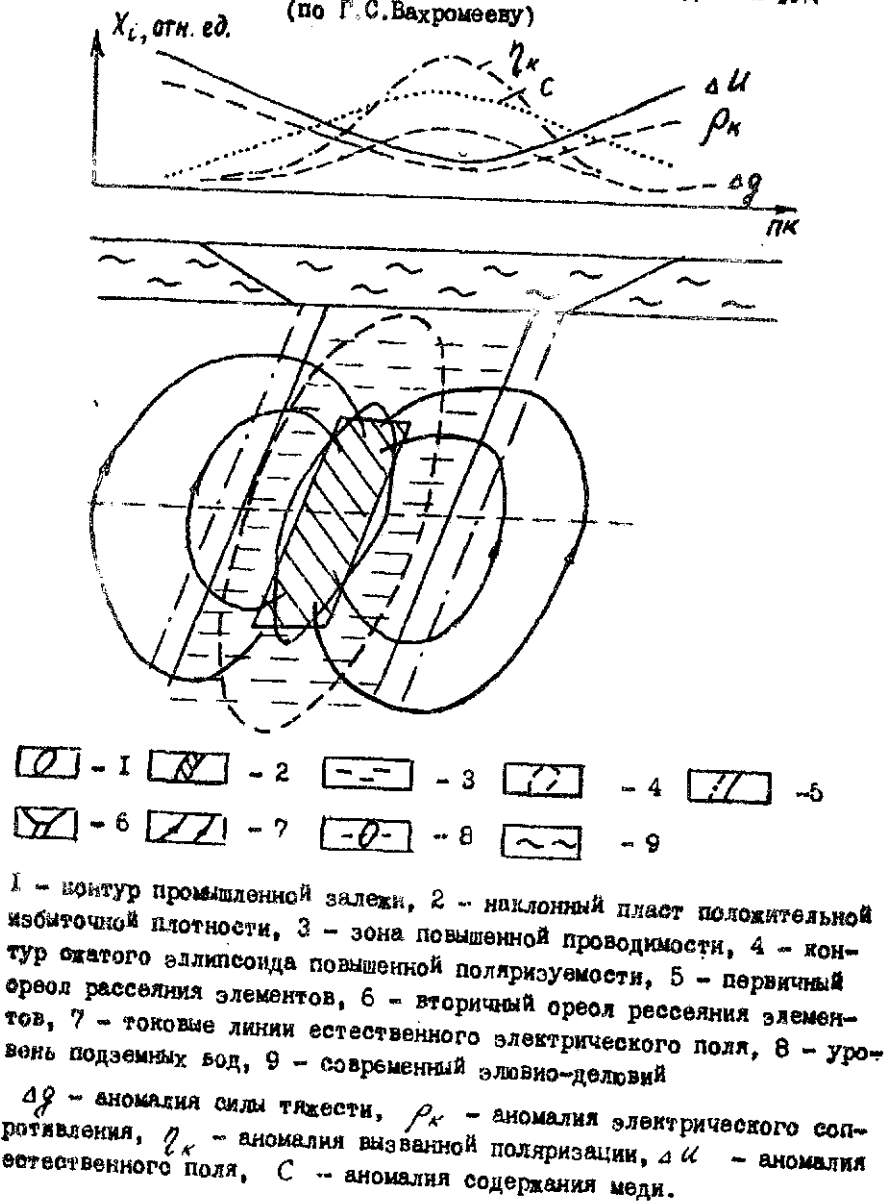


Рис. I

10

2. РАБОТА № 2

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

Необходимым и достаточным условием успешного применения геофизических методов является заметная дифференциация (контрастность) физических свойств горных пород в районе работ. Физические свойства пород зависят от многих геологических факторов: возраста, глубины залегания, метаморфизма горных пород, степени их выветренности, пористости, влагонасыщенности и т.д. По этой причине частные значения физических параметров обычно колеблются в широких пределах. Для получения достаточной представительности результатов необходимо, чтобы измерения носили массовый характер. Для каждой разновидности горных пород желательно иметь не менее 30-50 определений.

Перечень основных физических свойств горных пород и руд приведен в таблице 2.

Физические свойства определяются обычно путем исследований на образцах, в естественном залегании (параметрические замеры), по данным каротажа и по итогам интерпретации результатов полевых геофизических наблюдений соответствующими методами. Образцы берут из коренных обнажений пород и руд, по возможности слабо затронутых вторичными процессами. Места отбора образцов равномерно распределяют по площади и отмечают на карте с целью изучения закономерностей изменения физических параметров по площади исследований.

Изменчивость физических свойств пород и руд обуславливает широкое использование статистических методов обработки с целью компактного представления данных о физических свойствах, выявления в общей совокупности самостоятельных групп пород, определения доверительных границ изменения физических параметров горных пород, установления корреляционной зависимости между различными физическими параметрами и изучения зависимости физических свойств от состава и структуры горных пород.

2.1. Эмпирические распределения

Множество значений физического признака, обладающего свойствами случайной величины, будем называть статистической совокупностью. В статистической совокупности значения физического признака располагаются в порядке их получения и записи при изучении геологического

Таблица 2

Перечень основных физических свойств горных пород

Метод	Физический параметр	Единица измерения
Магниторазведка	1. Магнитная восприимчивость, χ	СИ
	2. Остаточная намагниченность, J	А/м
Гравиразведка	1. Плотность, ρ	г/см ³
Электроразведка	1. Удельное электрическое сопротивление, ρ	Ом м
	2. Поляризуемость, η	%
Сейсморазведка	1. Скорость распространения упругих колебаний, v	м/с
	2. Модуль Юнга	кг/м ²
Радиометрия	1. Естественная радиоактивность, γ	мкр/ч
	2. Коэффициент радиоактивного равновесия, K_{pp}	
	3. Коэффициент экранирования, α	%
Ядерная геофизика	1. Длина замедления быстрых нейтронов, L_s	см
	2. Длина диффузии тепловых нейтронов, L_d	см
	3. Время замедления быстрых нейтронов, τ_s	с
	4. Время жизни тепловых нейтронов, τ	с

объекта поисков. Для удобства математической обработки производят упорядочение статистической совокупности, которое заключается в том, что отдельные значения признака располагают в возрастающем или убывающем порядке. Упорядочение совокупностей непрерывных физических признаков производится методом группирования и последующего построения вариационных рядов и соответствующих им графиков.

Упорядочение непрерывных физических признаков производится в интервальной форме. Число интервалов K можно оценить по формуле $K = \sqrt{N}$, где N — объем совокупности равный общему числу наблюдений. Для выбора ширины интервала группирования используется формула Стрессека:

$$\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{1 + 3,3 \lg N}$$

где $x_{\max}$, $x_{\min}$ — максимальное и минимальное значения физического параметра x . Вычисленные значения Δx округляют до удобной величины.

Вариационный ряд статистической совокупности непрерывного физического признака представляется в виде таблицы, в которой в возрастающем порядке перечислены интервалы или середины интервалов группирования и соответствующие им частоты и частоты встречи физических признаков. Перед составлением таблицы вычисляют значения середины интервалов $x_i = \frac{a_i + b_i}{2}$, где a_i и b_i соответственно, начало и конец i -го интервала группирования, подсчитывают частоту n_i и частоту $\omega_i = n_i / N$ попадания физического признака на i -ый интервал группирования. Пример построения вариационного ряда приведен в таблице 3. Проверка правильности построения вариационного ряда осуществляется по формулам $\sum_{i=1}^K n_i = N$, $\sum_{i=1}^K \omega_i = 1$.

Для компактного и наглядного представления результатов массовых измерений физических свойств горных пород вариационный ряд может быть представлен графически в виде полигона, гистограммы или кумуляты.

Полигоном называется ломаный график, построенный в декартовой системе координат. По оси абсцисс откладываются в возрастающем порядке середины интервалов группирования физического параметра, а по оси ординат соответствующие им частоты или частоты.

Таблица 3

Вариационный ряд распределения плотности перидотитов
Баженовского месторождения хризотил-асбеста

Номера интерва- лов,	Границы интерва- лов, г/см ³	Середина интервалов X_i , г/см ³	Частоты n_i	Частоты $\omega_i = \frac{n_i}{N}$
1	2,5-2,7	2,6	2	0,04
2	2,7-2,9	2,8	6	0,12
3	2,9-3,1	3,0	8	0,16
4	3,1-3,3	3,2	13	0,26
5	3,3-3,5	3,4	11	0,22
6	3,5-3,7	3,6	7	0,14

 $N = 50$

$$\sum_{i=1}^K \omega_i = 1,0$$

Гистограммой вариационного ряда называется ступенчатый график, состоящий из серии примыкающих друг к другу прямоугольников с основаниями на оси абсцисс, равными ширине интервала группирования, и высотами по оси ординат, соответствующими значениями частот или частотостей.

Кумулятой называют монотонно растущий график, который образуется, если по оси абсцисс откладывать середины интервалов группирования, а по оси ординат сумму частот или частотостей с нарастающим итогом.

Пример построения полигона, гистограммы и кумуляты вариационного ряда распределения плотности перидотитов Баженовского месторождения хризотил-асбеста приведен на рис. 2.

Наряду с построением вариационных рядов и графиков при обработке результатов измерений физических свойств вычисляются статистические характеристики положения (средняя величина, медиана, мода) и рассеяния результатов измерений (дисперсия, стандарт, коэффициент вариации, показатель асимметрии и показатель эксцесса).

Средняя величина $\bar{X}$ характеризует массовый уровень физического признака в статистической совокупности. Для вариационных рядов совокупностей с непрерывным или дискретным признаком средняя величина признака подсчитывается, как средняя взвешенная по формуле

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^K n_i X_i}{N} \quad (2.1)$$

где K — число интервалов или отдельных значений вариант.

Медиана (Me) — значение признака, соответствующее середине упорядоченного вариационного ряда. Медиана делит упорядоченную совокупность физических признаков на две равные по объему части.

Мода (Mo) — значение признака, которое характеризуется наибольшей частотой или частотостью и совпадает с абсциссой максимума вариационной кривой.

Статистические характеристики рассеяния указывают на степень и характер концентрации или рассеяния отдельных значений физического параметра относительно характеристик положения.

Дисперсия (S^2) — это средний квадрат отклонения отдельных вариантов от средней величины. Для упорядоченной в вариационный ряд

Пример построения полигона (а), гист.граммы (б) и кумуляты (в) вариационного ряда распределения плотности перидотитов Баженовского месторождения хризотил-асбеста:

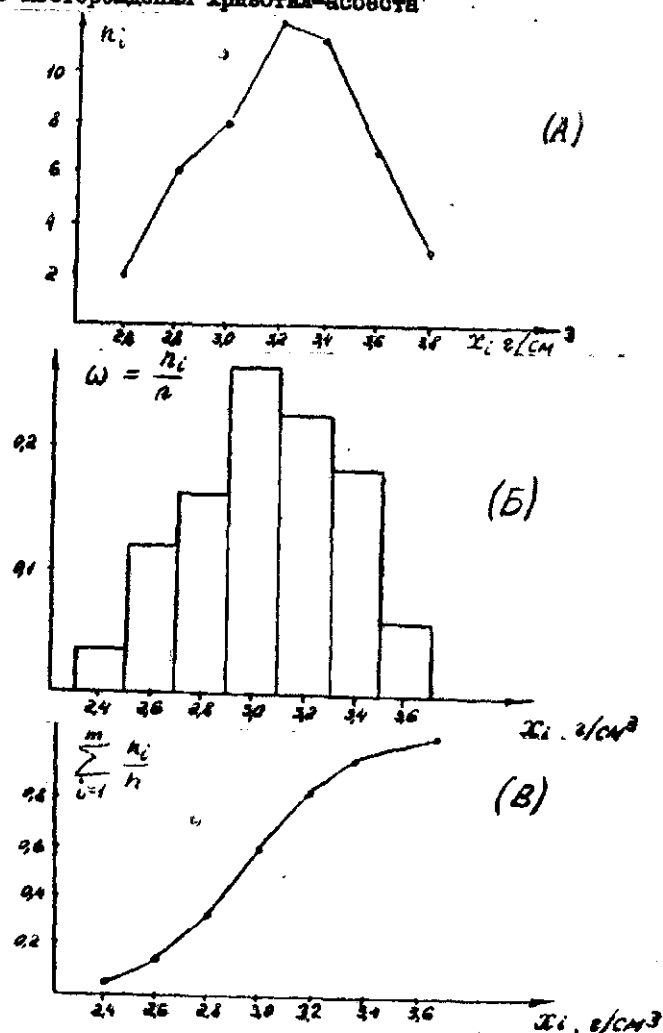


Рис. 2

совокупности дисперсия вычисляется по формуле:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^k n_i (x_i - \bar{x})^2}{N} \quad (2)$$

Стандарт (S) - среднее квадратическое отклонение, равное корню квадратному из дисперсии.

Коэффициент вариации (V) - это относительное среднее квадратическое отклонение, которое подсчитывается в процентах по формуле:

$$V = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (3)$$

Показатель асимметрии (A) указывает на характер и степень симметрии вариационной кривой. Для упорядоченной совокупности показатель асимметрии вычисляется по формуле:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^k n_i (x_i - \bar{x})^3}{S^3 N} \quad (4)$$

Показатель эксцесса ($\mathcal{E}$) характеризует степень крутовершинности вариационной кривой по отношению к вершине кривой нормального распределения. Для вариационных рядов эксцесс вычисляется по формуле:

$$\mathcal{E} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i (x_i - \bar{x})^4}{S^4 N} - 3 \quad (5)$$

Все статистические характеристики, кроме моды и медианы, вычисляются методом моментов. Статистический момент порядка p подсчитывается по формуле:

$$M_p = \frac{\sum_{i=1}^k n_i \sigma_i^p}{N} \quad (6)$$

где $\sigma_i = x_i - x_0$ - отклонение i -го интервала вариационного ряда x_i от интервала x_0 , принятого за начало отсчета, k - количество интервалов вариационного ряда.

Различают начальные m_p и центральные M_p моменты вариационного ряда. Момент называется начальным, если начало отсчета совпадает с нулем $x_0 = 0$ и центральным, если начало отсчета

совпадает со средней величиной ряда $x_0 = \bar{x}$.

Первый начальный момент совпадает со средним взвешенным значением измеряемого физического параметра. Второй центральный момент совпадает с дисперсией значений физического параметра.

Частные от деления центральных моментов ρ -го порядка на стандарт в ρ -ой степени называют основными моментами $\rho_p = \mu_p / S^p$. Второй основной момент ρ_2 соответствует показателю асимметрии, четвертый основной момент ρ_4 используется для вычисления показателя эксцесса.

Вычисление статистических характеристик выполняется в следующем порядке. После составления вариационного ряда и занесения данных в таблицу вычисляют условные варианты, нормированные к ширине интервала группирования, по формуле:

$$\delta_i = \frac{x_i - x_0}{\Delta x} \quad (7)$$

где x_i - середина i -го интервала вариационного ряда, x_0 - принятое начало отсчета, Δx - ширина интервала группирования.

Вычисляют начальные моменты условных вариантов m_p^{δ} до четвертого порядка включительно по формуле:

$$m_p^{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i \delta_i^p}{N} \quad (\rho = 1, 2, 3, 4) \quad (8)$$

Вычисляют среднее значение физического параметра по формуле:

$$\bar{x} = x_0 + \Delta x m_1^{\delta} \quad (9)$$

Вычисляют второй, третий и четвертый центральные моменты, используя формулы их связи с начальными моментами условных вариантов

$$\mu_2 = (\Delta x)^2 [m_2^{\delta} - (m_1^{\delta})^2] = S^2 \quad (10)$$

$$\mu_3 = (\Delta x)^3 [m_3^{\delta} - 3m_2^{\delta} m_1^{\delta} + 2(m_1^{\delta})^3] \quad (11)$$

$$\mu_4 = (\Delta x)^4 [m_4^{\delta} - 4m_3^{\delta} m_1^{\delta} + 6m_2^{\delta} (m_1^{\delta})^2 - 3(m_1^{\delta})^4] \quad (12)$$

Вычисляют стандарт S , показатель асимметрии A и показате-

тель эксцесса $\mathcal{E}$ по формулам:

$$S = \sqrt{\mu_2} \quad (13)$$

$$A = \rho_3 = \frac{\mu_3}{S^3} \quad (14)$$

$$\mathcal{E} = \rho_4 - 3 = \frac{\mu_4}{S^4} - 3 \quad (15)$$

Для вариационного ряда нормального распределения $\rho_4 = 3$. Поэтому при оценке крутовершинности вариационной кривой из основного момента четвертой степени вариационной кривой вычитается основной момент четвертой степени нормального распределения физического параметра.

Вычисляют коэффициент вариации по формуле (2.3).

Подсчитывают значение моды по формуле:

$$M_0 = X_{M_0} + \Delta x \left(\frac{\Delta_1}{\Delta_1 + \Delta_2} \right) \quad (16)$$

где X_{M_0} - начало интервала группирования, в котором находится мода, Δx - ширина интервала, Δ_1 - разность частот модального и немодального интервала, Δ_2 - разность частот модального и послемодального интервала.

Подсчитывается значение медианы по формуле:

$$M_e = X_{M_e} + \Delta x \left(\frac{\frac{N}{2} - n_{sM_e}}{n_{Me}} \right) \quad (17)$$

где X_{M_e} - начало медианного интервала, N - объем совокупности, n_{sM_e} - накопленная частота интервала, предшествующего медианному, n_{Me} - частота медианного интервала. Под накопленной частотой для данного интервала понимается сумма частот, начиная с первого интервала, включая данный. Накопленная частота подсчитывается по формуле:

$$n_{s_i} = \sum_{j=1}^i n_j \quad (18)$$

Накопленные частоты служат основой для построения интегрального полигона (кумуляты) вариационного ряда.

Пример. Вычислить статистические характеристики вариационного ряда распределения содержания железа в сплошных медноколчеданных рудах Гайского месторождения меди.

Составим таблицу для вычисления исходных данных.

Таблица 4

Вариационный ряд распределения содержания железа в сплошных медноколчеданных рудах Гая

Интервалы, %	n_i	x_i	δ_i	$n_i \delta_i$	$n_i \delta_i^2$	$n_i \delta_i^3$	$n_i \delta_i^4$
1 38-40	6	39	-2	-12	+24	-48	+96
2 40-42	10	41	-1	-10	+10	-10	+10
3 42-44	15	43	0	0	0	0	0
4 44-46	13	45	+1	+13	+13	+13	+13
5 46-48	6	47	+2	+12	+24	+48	+96
Сумма	50			+3	+71	+3	+215

Выберем место нуля совпадающим с серединой центрального интервала $x_0 = 43$ и подсчитаем условные варианты δ_i . Проверка правильности вычисления исходных данных производится по формуле Шарлье:

$$\sum_{i=1}^k n_i (\delta_i + 1)^4 = \sum_{i=1}^k n_i \delta_i^4 + 4 \sum_{i=1}^k n_i \delta_i^3 + 6 \sum_{i=1}^k n_i \delta_i^2 + 4 \sum_{i=1}^k n_i \delta_i + \sum_{i=1}^k n_i \quad (9)$$

При правильной подготовке данных формула Шарлье обращается в тождество. Вычисляем начальные моменты ряда в условных вариантах

$$m_1^{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^5 n_i \delta_i}{N} = \frac{+3}{50} = +0,06$$

$$m_2^{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^5 n_i \delta_i^2}{N} = \frac{+71}{50} = +1,42$$

$$m_3^{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^5 n_i \delta_i^3}{N} = \frac{+3}{50} = +0,06$$

$$m_4^{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^5 n_i \delta_i^4}{N} = \frac{+215}{50} = +4,3$$

Вычисляем среднее значение содержания железа $\bar{x}$, стандарт S и центральные моменты μ_3 и μ_4 , используя формулы связи начальных моментов в условных вариантах m_p^{δ} с центральными моментами μ_p .

$$\bar{x} = m_1 = x_0 + \Delta x m_1^{\delta} = 43 + 2(+0,06) = 43,12 \% \text{ Fe}$$

$$S = \sqrt{\mu_2} = \Delta x \sqrt{m_2^{\delta} - (m_1^{\delta})^2} = 2 \sqrt{1,42 - (0,06)^2} = 2,38 \% \text{ Fe}$$

$$\mu_3 = (\Delta x)^3 [m_3^{\delta} - 3 m_2^{\delta} m_1^{\delta} + 2 (m_1^{\delta})^3] =$$

$$= 2^3 [0,06 - 3(+1,42)(+0,06) + 2(+0,06)^3] = -1,56$$

$$\mu_4 = (\Delta x)^4 [m_4^{\delta} - 4 m_3^{\delta} m_1^{\delta} + 6 m_2^{\delta} (m_1^{\delta})^2 - 3 (m_1^{\delta})^4] =$$

$$= 2^4 [4,3 - 4(+0,06)(+0,06) + 6(+1,42)(+0,06)^2 - 3(+0,06)^4] =$$

$$= 69,12$$

Определяем основные моменты и показатели асимметрии A и эксцесса E .

$$A = \rho_3 = \frac{M_3}{S^3} = \frac{-1,56}{(2,38)^3} = -0,12$$

$$\varepsilon = \rho_4 - 3 = \frac{M_4}{S^4} - 3 = \frac{69,12}{(2,38)^4} - 3 = 2,15 - 3 = -0,85$$

Находим коэффициент вариации:

$$V = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100 = \frac{2,38}{43,12} \cdot 100 = 5,5\%$$

По формуле (2.16) определяем модальное значение:

$$M_0 = x_{M_0} + \Delta x \frac{\Delta_1}{\Delta_1 + \Delta_2} = 42 + \frac{2(15-10)}{(15-10) + (15-13)} = 43,43\% \text{ Fe}$$

Для вычисления медианы составим таблицу накопленных частот исследуемого вариационного ряда:

Таблица 5

Интервалы вариационного ряда, %	38-40	40-42	42-44	44-46	46-48
Частоты, n_i	6	10	15	13	6
Накопленные частоты, $N_{\Sigma i}$	6	16	31	44	50

По формуле (17) находим значение медианы:

$$M_e = x_{M_e} + \Delta x \frac{\left(\frac{N}{2} - N_{\Sigma M_e}\right)}{n_{M_e}} = 42 + \frac{2(25-16)}{15} = 43,2\% \text{ Fe}$$

Таким образом вариационный ряд распределения содержания железа в сплошных медноколчеданных рудах Гайского месторождения меди практически симметричный, так как значение средней величины содержания, моды и медианы совпадают друг с другом в пределах погрешности $\pm 1,0\%$ нейтронного активационного метода опробования, который использовался для определения содержания железа в рудах. О симметрии вариационного ряда свидетельствует также

небольшое значение показателя асимметрии $A = -0,12$. Степень изменчивости содержания железа в сплошных медных колчеданах весьма равномерная, так как вычисленные значения коэффициента вариации $V = 5,5\%$ не превышают 6% . По значению показателя эксцесса $\varepsilon = -0,84$ вариационный ряд относится к плосковершинному.

2.2. Теоретические распределения

Результаты измерений физических свойств горных пород осложнены погрешностями наблюдений, поэтому они носят случайный характер и обладают свойствами случайной величины. Случайной величиной называется величина, которая в результате опыта может принять то или иное значение, заранее неизвестное.

Если перечислить все возможные значения случайной величины и указать вероятности этих значений, то получится распределение случайной величины. Характеристикой непрерывной случайной величины является плотность вероятности с которой распределяются ее значения в окрестности данной точки $f(x)$. Плотность распределения вероятностей называют дифференциальной функцией распределения или дифференциальным законом распределения. Кривая, изображающая плотность распределения случайной величины, называется дифференциальной кривой распределения.

Вероятность того, что случайная величина x примет значение, лежащее в границах от a до b , равна определенному интегралу в тех же пределах от плотности вероятности

$$P(a < x < b) = \int_a^b f(x) dx$$

Геометрически эта вероятность выражается площадью криволинейной фигуры (рис.3).

Кроме дифференциальной функции распределения вероятностей часто используется кумулятивная функция распределения случайной величины, которая подсчитывается по формуле:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx \quad (18)$$

Кумулятивная функция непрерывной случайной величины харак-

характеризует вероятность того, что случайная величина X примет значение меньше $X < x$.

Кумулятивная функция распределения называется также интегральной функцией или интегральным законом распределения. Она является универсальной характеристикой случайной величины. Кумулятивная функция монотонно возрастает в пределах $0 \leq F(x) \leq 1$. При $x \rightarrow -\infty$ она убывает до нуля, при $x \rightarrow +\infty$ стремится к единице (рис. 3).

Аналогично статистическим характеристикам при описании случайных величин вводятся их числовые характеристики (математическое ожидание, дисперсия, среднее квадратическое отклонение, коэффициент вариации, показатель асимметрии и показатель эксцесса).

Математическое ожидание M_x непрерывной случайной величины определяется по формуле:

$$M_x = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx \quad (I1)$$

По смыслу математическое ожидание является мерой положения и эквивалентно среднему значению вариационного ряда.

Дисперсия $D(x)$ непрерывной случайной величины характеризует степень рассеяния отдельных значений от математического ожидания случайной величины и подсчитывается по формуле:

$$D_x = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - M_x)^2 f(x) dx \quad (I2)$$

Среднее квадратическое отклонение σ_x и коэффициент вариации V_x являются мерами рассеяния случайной величины около её математического ожидания и определяются по формулам $\sigma_x = \sqrt{D_x}$ и $V_x = \sigma_x / M_x$. Мерами рассеяния случайной величины являются также показатель асимметрии A_x и показатель эксцесса $\mathcal{E}_x$, которые по своему смыслу аналогичны показателям асимметрии и эксцесса вариационного ряда. Для непрерывной случайной величины:

$$A_x = \frac{1}{\sigma_x^3} \int_{-\infty}^{+\infty} (x - M_x)^3 f(x) dx \quad (I3)$$

$$\mathcal{E}_x = \frac{1}{\sigma_x^4} \int_{-\infty}^{+\infty} (x - M_x)^4 f(x) dx \quad (I4)$$

График дифференциальной и интегральной функции распределения непрерывной случайной величины

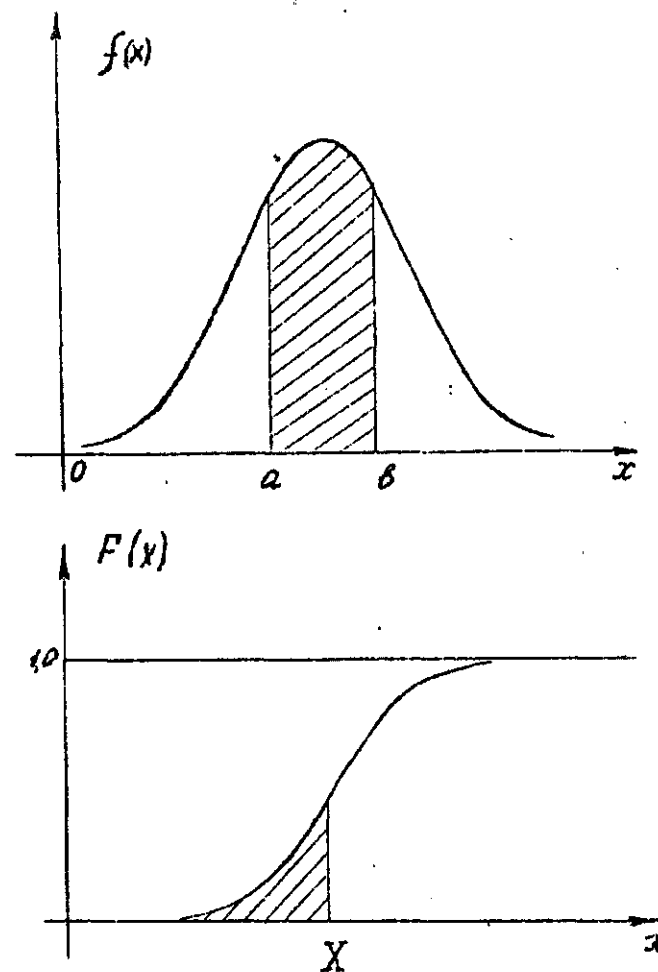


Рис. 3

Статистические характеристики вариационных рядов при достаточной статистике отсчетов стремятся, как к пределу, к числовым характеристикам случайных величин, распределение которых является предметом исследования теории вероятностей и носит закономерный характер.

Законы распределения случайной величины могут быть различными. Для непрерывных случайных величин, к которым относятся физические свойства горных пород, чаще всего встречается нормальное (Гауссово) распределение и логарифмически нормальное распределение случайной величины.

Случайная величина x распределена нормально, если функция плотности вероятности $f(x)$ имеет вид

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - M_x)^2}{2\sigma_x^2}\right] \quad (15)$$

где M_x - математическое ожидание, σ_x - среднее квадратическое отклонение (стандарт). Математическое ожидание соответствует среднему арифметическому отдельных измерений случайной величины:

$$M_x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (16)$$

Стандарт подсчитывается по формуле:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - M_x)^2}{n}} \quad (17)$$

Функция нормального распределения характеризуется двумя параметрами M_x и σ_x и имеет колоколообразную форму. При всех значениях x функция $f(x)$ принимает только положительные значения. Ветви кривой асимптотически приближаются к оси абсцисс $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} f(x) = 0$. При $x = M_x$ нормальное распределение достигает максимума $f(x)_{\max} = 1/\sigma_x \sqrt{2\pi}$. Ветви кривой симметричны относительно прямой $x = M_x$, так как $x - M_x$ содержится в формуле (15) в квадрате. Параметр M_x не оказывает влияния на форму кривой $f(x)$, но сдвигает её вдоль оси x . Параметр σ_x определяет вытянутость или статость кривой по оси x . Математическое ожидание величины x совпадает с модой и медианой $M_x = M_o = M_e$. Асимметрия и эксцесс нормального распределения равны нулю $A = E = 0$ (Рис 4).

Внешний вид дифференциальной функции нормального распределения

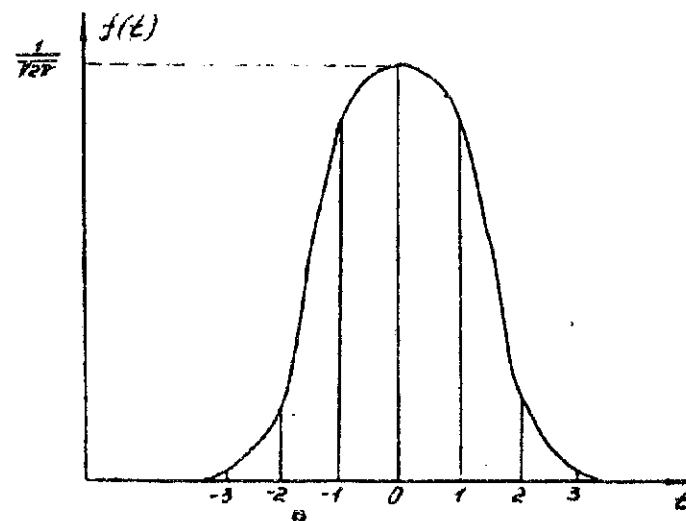
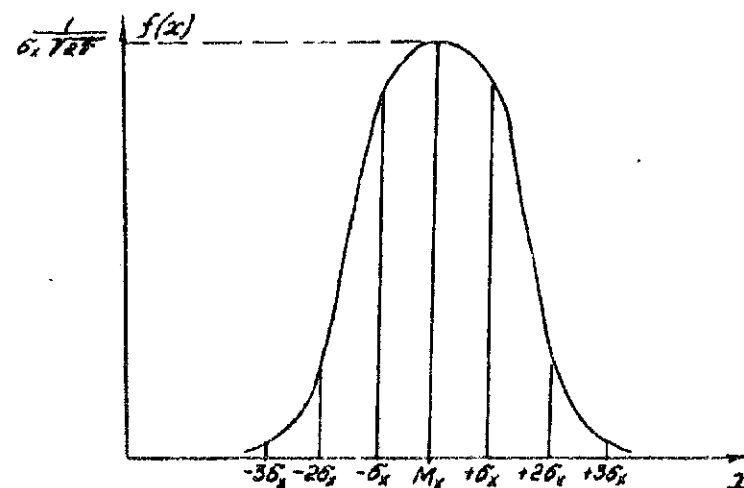


Рис. 4

Заменой переменных $t = \frac{x - M_x}{\sigma_x}$ любое нормальное распределение может быть приведено к простейшему виду

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (18)$$

Такое преобразование переменной называется нормированием случайной величины x её среднему квадратическому отклонению. При этом начало отсчета переносится в точку M_x , а в качестве единицы масштаба используется среднее квадратическое отклонение σ_x . Функция нормированного нормального распределения зависит от одного параметра, аргумента $t = (x - M_x)/\sigma_x$. Кривая простейшего нормального распределения симметрична относительно оси ординат. При $t=0$ она имеет максимум равный $f(t)_{max} = 1/\sqrt{2\pi} \approx 0,4$. Площадь, ограниченная кривой $f(t)$ и осью t равна 0,683 в пределах от -1 до +1, 0,954 в пределах от -2 до +2, 0,997 в пределах от -3 до +3 и единица в пределах от $-\infty$ до $+\infty$ (рис. 4).

Кумулятивная функция нормального распределения имеет вид:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-M_x)^2}{2\sigma_x^2}} dx \quad (19)$$

Нормированная кумулятивная функция нормального распределения подсчитывается по формуле

$$F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (20)$$

Функция табулирована [1, 2].

Непрерывная случайная величина x распределена логарифмически нормально, если логарифмы её значений распределены по закону Гаусса

$$f(y) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(y - M_y)^2}{2\sigma_y^2}\right] \quad (21)$$

где $y = \lg x$, M_y - математическое ожидание случайной величины y , σ_y - среднее квадратическое отклонение y от его математического ожидания (логарифмический стандарт), M - переводной коэффициент от натуральных логарифмов к десятичным.

Математическое ожидание $\lg x$ соответствует среднему гео-

метрическому самой случайной величины x .

$$\text{antlg}(M_{\lg x}) = \tilde{x} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n x_i} \quad (22)$$

Логарифмический стандарт подсчитывается по формуле

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\lg x_i - M_{\lg x})^2}{n}} \quad (23)$$

Кривая логарифмически нормального распределения имеет положительную (правостороннюю) асимметрию, причем $M_0 < M_0 < M_x$ тем сильнее, чем больше σ_y . Эта кривая симметризуется с помощью логарифмического масштаба по оси абсцисс (рис. 5).

Кумулятивная функция логарифмически нормального распределения имеет вид

$$F(x) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \int_0^{\lg x} e^{-\frac{(\lg x - M_{\lg x})^2}{2\sigma_y^2}} d \lg x \quad (24)$$

2.3. Сопоставление эмпирических и теоретических распределений

Распределение физических параметров однородного геологического объекта чаще всего подчиняется нормальному закону (например, плотность горной породы) или логнормальному закону (магнитная восприимчивость, удельное электрическое сопротивление, концентрация химических элементов). Для правильной обработки результатов измерений необходимо знать какому закону соответствует распределение данного физического свойства. В соответствии с законом распределения при построении вариационных кривых интервалы группирования физических свойств выбираются равными между собой в линейном масштабе при нормальном распределении. При построении полигонов и кумулят всегда показывают точки, по которым они строятся.

Для сравнения распределений графики накопления частот удобно строить на вероятностном трафарете, который характеризуется вероятностной шкалой по оси ординат. На вероятностном трафарете нормальное распределение описывается прямой линией.

Сопоставление результатов эксперимента в виде гистограммы и графика накопления частот с теоретическим нормальным распределением проводится следующим образом.

Кривые плотности вероятностей логарифмически нормального распределения

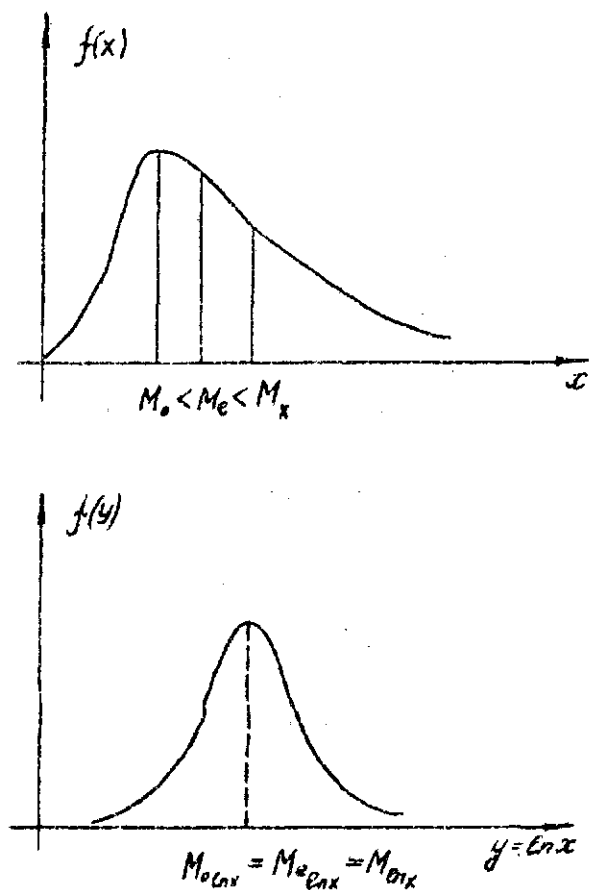


Рис. 5

Характер экспериментального (1) и теоретического нормального (2) распределения физического свойства X в виде гистограммы (а), графиков накопления частот в обычном масштабе (б) и на вероятностном бланке (в)

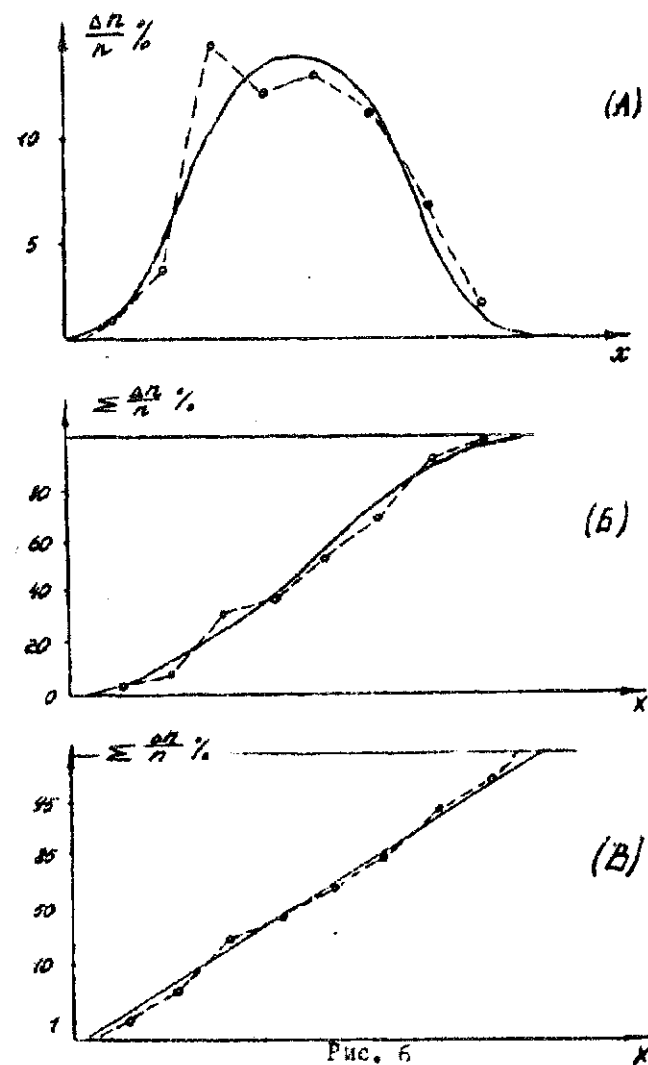


Рис. 6

Для проверки близости эмпирического и теоретического распределений используются критерии согласия χ^2 (хи-квадрат) Пирсона или А.Н. Колмогорова.

Критерий Пирсона основан на оценке статистической значимости расхождений эмпирических частот n_i вариационного ряда и частот n_i' соответствующего теоретического распределения, рис. 6, а. Разности $n_i - n_i'$ возводятся в квадрат и делятся на n_i откуда получают формулу критерия согласия χ^2

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(n_i - n_i')^2}{n_i} \quad (25)$$

где χ^2 - найденное значение критерия Пирсона, N - число интервалов вариационного ряда.

Критерий Пирсона зависит от числа степеней свободы f и уровня значимости α . Число степеней свободы определяют по формуле

$$f = N - C \quad (26)$$

в которой C - количество наложенных связей при вычислении теоретических частот. Для нормального распределения количество наложенных связей равно двум, так как при расчете теоретических частот необходимо знать два параметра: математическое ожидание M_x и стандарт σ_x . Поэтому при оценке близости эмпирической кривой к нормальному распределению число степеней свободы определяется по формуле $f = N - 2$. Уровень значимости обычно задается в виде $\alpha = 0,05$ или $\alpha = 0,01$. Зная α и f определяют теоретическое значение $\chi^2_{\alpha, f}$ для чего используют специальные таблицы / 1 /.

Найденное значение χ^2 сравнивают с табличным $\chi^2_{\alpha, f}$. Если $\chi^2 < \chi^2_{\alpha, f}$, то эмпирическое распределение не противоречит теоретическому, если $\chi^2 > \chi^2_{\alpha, f}$, то наблюдается статистически значимое различие между эмпирическим распределением и теоретическим. Если гипотеза о нормальном распределении не подтверждается, то необходимо провести проверку исходных данных и выявить причины приводящие к нарушению нормального распределения.

Для проведения вычисления составляется специальная таблица 6. В качестве примера рассмотрим вариационный ряд распределения

таблица 6

Расчет исходных данных для определения критерия согласия χ^2

№ п/п	Интервалы содержания, %	X_i	n_i	...	$A_i = X_i - \bar{X}$	$\frac{A_i}{S}$	$\varphi(t)$	$n_i' = N \varphi(t)$	$n_i - n_i'$	$(n_i - n_i')^2$	$\frac{(n_i - n_i')^2}{n_i}$
1	38-40	39	6	...	-4,12	1,73	0,0893	3,75	2,25	5,06	1,35
2	40-42	41	10	...	-2,12	0,89	0,2685	11,28	1,28	1,64	0,15
3	42-44	43	15	...	-0,12	0,05	0,3984	16,73	1,73	2,99	0,18
4	44-46	45	13	...	+1,88	0,80	0,2897	12,17	0,83	0,69	0,06
5	46-48	47	6	...	+3,88	1,63	0,1057	4,44	1,56	2,43	0,55
Σ	2	3	4	...	8	9	10	11	12	13	14
Сумма											$\chi^2 = 2,29$

Примечание. $\bar{X} = 43,12\% Fe$, $S = 2,38\% Fe$, $K = \frac{N \cdot X}{S} = \frac{50 \cdot 2}{2,38} = 42$, $f = 5 - 2 = 3$

содержания железа в окисных медноколчеданных рудах Гайского месторождения меди (таблица 4). Первые семь графов таблицы 6 совпадают с графами таблицы 4. Эти графы необходимы для нахождения среднего значения содержания железа $\bar{X} = 43,12\%$ и стандарта $S = 2,38\%$. Затем вычисляют для каждого интервала вариационного ряда отклонение Δ_i значений середины интервалов X_i от среднего значения $\bar{X}$ $\Delta_i = X_i - \bar{X}$ (графа 8). Подсчитывают нормированное отклонение $\epsilon = \frac{\Delta_i}{S}$, где S - стандарт вариационного ряда (графа 9). Подсчитывается нормированная плотность вероятности нормального распределения $\varphi(\epsilon)$ без учета знака ϵ (графа 10). Значения функции $\varphi(\epsilon)$ приведены в таблице 8. Подсчитывается переходный коэффициент K от функции $\varphi(\epsilon)$ к теоретическим частотам нормального распределения по формуле

$$K = \frac{N \Delta X}{S} \quad (.27)$$

где N - объем выборки, ΔX - ширина интервала группирования, S - стандарт. Вычисляются теоретические частоты n'_i нормального распределения $n'_i = K \varphi(\epsilon)$ (графа 11). Находятся отклонения эмпирических частот от теоретических $n_i - n'_i$ (графа 12), квадраты этих отклонений (графа 13) и частные от деления этих квадратов на n'_i (графа 14). Наблюдаемое значение критерия Пирсона находится как сумма значений четырнадцатой графы.

Найденное значение критерия Пирсона χ^2_n сравнивается с теоретическим $\chi^2_{\alpha, f}$, приведенным в таблице 9. При уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $f = 5 - 2 = 3$ $\chi^2_{0,05,3} = 7,82 > 2,28 = \chi^2_n$. Следовательно, вариационный ряд распределения содержания железа в рудах Гайского месторождения не противоречит нормальному закону. Вероятность случайного расхождения между теоретическим и статистическим распределением достаточно велика и можно считать правдоподобной гипотезу о нормальном распределении статистической совокупности.

Критерий согласия λ А.Н. Колмогорова основан на подсчете максимального значения модуля разности между графиком накопленных частот (кумулятой) вариационного ряда (рис. 6) и теоретической функцией распределения

$$D = \max |W - F(x)| \quad (.28)$$

W - кумулята вариационного ряда, $F(x)$ - нормированная кумулятивная функция нормального распределения (интеграл вероятности).

Значения кумулятивной функции нормального распределения подсчитываются по формуле

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (.29)$$

В таблице 10 приведены значения функции

$$F'(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (.30)$$

Используя эту таблицу можно найти кумулятивную функцию нормального распределения по формулам

$$\begin{aligned} F(x) &= 0,5 + F'(x) \\ F(-x) &= 0,5 - F'(x) \end{aligned} \quad (.31)$$

Критерий согласия А.Н. Колмогорова определяется соотношением $\lambda = D\sqrt{N}$, где N - число независимых наблюдений (объем выборки). Найденное значение критерия λ_n сравнивается с теоретическим при уровне значимости $\alpha = 0,05$ $\lambda_{0,05} = 1,36$. Если найденное значение $\lambda_n < \lambda_{0,05}$, то вариационный ряд не противоречит нормальному распределению. Если $\lambda_n > \lambda_{0,05}$, то вариационный ряд не согласуется с нормальным распределением.

Для проведения вычислений составляется таблица 7.

Максимальное значение модуля разности между кумулятой вариационного ряда и нормированной кумулятивной функцией распределения в рассматриваемом случае равно $D = \max |W - F(x)| = 0,025$. При этом найденное значение критерия А.Н. Колмогорова равно

$\lambda_n = D\sqrt{N} = 0,025\sqrt{59} = 0,18$. Поскольку найденное значение λ_n меньше критического для 5% -ного уровня значимости $\lambda_n < \lambda_{0,05}$ (1,36), то вариационный ряд распределения содержания железа в рудах Гайского месторождения не противоречит нормальному закону.

Способ построения кумулятивных кривых на вероятностном графике рис. 6.8 имеет ряд преимуществ перед методом построения

Таблица 7

Расчет исходных данных для определения критерия согласия χ^2

Номер г/г	Интервал содержания, % $a - b$	n_i	Частота $n_i = \frac{N_i}{N}$	Наполненная частота w	$z = \frac{b - \bar{x}}{S}$	$F(z)$	$ w - F(z) $
1	2	3	4	5	6	7	8
1	38-40	6	0,12	0,12	-1,31	0,095	0,025
2	40-42	10	0,20	0,32	-0,47	0,319	0,001
3	42-44	15	0,30	0,62	0,37	0,644	0,024
4	44-46	13	0,26	0,88	+1,21	0,889	0,007
5	46-48	6	0,12	1,00	+2,05	0,998	0,020
Сумма		50					

Примечание. a и b - соответственно начало и конец i -го интервала,
 $\bar{x} = 43,12\% Fe$, $S = 2,38\% Fe$ $N = 50$

вариационных кривых. Главными преимуществами являются: универсальность, пригодность для обработки нормального и логнормального распределений, простота аппроксимации семейства точек прямой линией, особенно в краевых частях распределения, возможность группировки в неравных интервалах группирования, возможность простой, но строгой оценки гипотезы нормальности (или логнормальности) с использованием критериев А.Н. Колмогорова.

ЗАДАНИЕ

по статистической обработке результатов измерения физических свойств горных пород.

1. Выполнить статистическую обработку результатов измерения физических свойств горных пород медноколчеданного месторождения Абей-Саз-Тай-Тай (Баймакский район ГяССР). Составить вариационные ряды значений электропроводности и плотности кварцевых альбитофиров, которые приведены в таблице II. Построить графики, вычислить статистические характеристики, подсчитать критерии согласия эмпирических вариационных рядов и теоретических распределений.

2. Выполнить статистическую обработку результатов измерения физических свойств горных пород. Для этого построить графики, вычислить статистические характеристики и подсчитать критерии согласия эмпирических вариационных рядов с нормальным распределением физических параметров.

Варианты заданий по статистической обработке.

Вариант 1. Распределение плотности хромовой руды, г/см³.

Вариант 2. Распределение плотности силикатной никелевой руды, г/см³.

Вариант 3. Распределение влажности силикатной никелевой руды, %.

Таблицы вариационных рядов

Таблица 8.

Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3	
классы	частоты	классы	частоты	классы	частоты
3,0-3,1	I	I-I,2	I	10-20	I
3,1-3,2	2	I,2-I,4	2	20-30	8
3,2-3,3	7	I,4-I,6	3	30-40	29
3,3-3,4	II	I,6-I,8	8	40-50	23
3,4-3,5	19	I,8-2,0	33	50-60	10
3,5-3,6	16	2,0-2,2	14	60-70	3
3,6-3,7	8	2,2-2,4	10	70-80	2
3,7-3,8	7	2,4-2,6	4		
3,8-3,9	2	2,6-2,8	I		
	$\Sigma = 73$		$\Sigma = 76$		$\Sigma = 76$

Таблица № 9

Таблица значений функции $\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$

x	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0,0	0,3989	3989	3989	3988	3986	3984	3982	3980	3977
0,1	0,3970	3970	3970	3968	3966	3964	3962	3960	3957
0,2	0,3940	3940	3940	3937	3935	3933	3931	3928	3925
0,3	0,3894	3894	3894	3890	3888	3886	3884	3881	3878
0,4	0,3853	3853	3853	3848	3846	3844	3842	3839	3836
0,5	0,3814	3814	3814	3808	3806	3804	3802	3799	3796
0,6	0,3775	3775	3775	3768	3766	3764	3762	3759	3756
0,7	0,3735	3735	3735	3728	3726	3724	3722	3719	3716
0,8	0,3695	3695	3695	3687	3686	3684	3682	3679	3676
0,9	0,3655	3655	3655	3647	3646	3644	3642	3639	3636
1,0	0,3613	3613	3613	3604	3604	3602	3600	3597	3594
1,1	0,3570	3570	3570	3561	3561	3559	3557	3554	3551
1,2	0,3527	3527	3527	3517	3517	3515	3513	3510	3507
1,3	0,3483	3483	3483	3473	3473	3471	3469	3466	3463
1,4	0,3439	3439	3439	3428	3428	3426	3424	3421	3418
1,5	0,3395	3395	3395	3384	3384	3382	3380	3377	3374
1,6	0,3350	3350	3350	3339	3339	3337	3335	3332	3329
1,7	0,3305	3305	3305	3293	3293	3291	3289	3286	3283
1,8	0,3260	3260	3260	3248	3248	3246	3244	3241	3238
1,9	0,3215	3215	3215	3202	3202	3200	3198	3195	3192
2,0	0,3170	3170	3170	3157	3157	3155	3153	3150	3147
2,1	0,3125	3125	3125	3111	3111	3109	3107	3104	3101
2,2	0,3080	3080	3080	3066	3066	3064	3062	3059	3056
2,3	0,3035	3035	3035	3020	3020	3018	3016	3013	3010
2,4	0,2990	2990	2990	2975	2975	2973	2971	2968	2965
2,5	0,2945	2945	2945	2929	2929	2927	2925	2922	2919
2,6	0,2900	2900	2900	2884	2884	2882	2880	2877	2874
2,7	0,2855	2855	2855	2838	2838	2836	2834	2831	2828
2,8	0,2810	2810	2810	2793	2793	2791	2789	2786	2783
2,9	0,2765	2765	2765	2747	2747	2745	2743	2740	2737
3,0	0,2720	2720	2720	2702	2702	2700	2698	2695	2692
3,1	0,2675	2675	2675	2656	2656	2654	2652	2649	2646
3,2	0,2630	2630	2630	2611	2611	2609	2607	2604	2601
3,3	0,2585	2585	2585	2565	2565	2563	2561	2558	2555
3,4	0,2540	2540	2540	2520	2520	2518	2516	2513	2510
3,5	0,2495	2495	2495	2474	2474	2472	2470	2467	2464
3,6	0,2450	2450	2450	2429	2429	2427	2425	2422	2419
3,7	0,2405	2405	2405	2383	2383	2381	2379	2376	2373
3,8	0,2360	2360	2360	2338	2338	2336	2334	2331	2328
3,9	0,2315	2315	2315	2292	2292	2290	2288	2285	2282
4,0	0,2270	2270	2270	2247	2247	2245	2243	2240	2237

Таблица 10
Значения статистики χ^2 -квadrat ($\chi^2_{\alpha, f}$)

f	χ^2	f	χ^2	f	χ^2
Уровень значимости $\alpha = 0,05$					
I	3,84	II	19,67	21	32,67
2	5,99	12	21,03	22	33,92
3	7,82	13	22,36	23	35,17
4	9,49	14	23,68	24	36,41
5	11,07	15	25,00	25	37,65
6	12,59	16	26,30	26	38,88
7	14,07	17	27,59	27	40,11
8	15,51	18	28,87	28	41,34
9	16,92	19	30,14	29	42,56
10	18,31	20	31,41	30	43,77
Уровень значимости $\alpha = 0,01$					
I	6,63	II	24,73	21	38,93
2	9,21	12	26,22	22	40,29
3	11,34	13	27,69	23	41,64
4	13,28	14	29,14	24	42,96
5	15,09	15	30,58	25	44,31
6	16,81	16	32,00	26	45,64
7	18,48	17	33,41	27	46,96
8	20,09	18	34,80	28	48,28
9	21,67	19	36,19	29	49,59
10	23,21	20	37,57	30	50,89

Таблица значений функции $F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{z^2}{2}} dz$

x	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0,0	0,00000	00399	00798	01197	01595	01994	02392	02790	03188
0,1	03583	04380	04776	05172	05567	05962	06356	06750	07143
0,2	07926	08317	08706	09095	09483	09871	10257	10642	11026
0,3	11791	12172	12552	12930	13307	13683	14058	14431	14804
0,4	15542	15910	16276	16640	17003	17364	17724	18082	18439
0,5	19146	19497	19847	20194	20540	20884	21226	21566	21904
0,6	22575	22907	23237	23565	23891	24215	24537	24857	25175
0,7	25804	26115	26424	26730	27035	27337	27637	27935	28230
0,8	28814	29103	29389	29673	29955	30234	30511	30786	31058
0,9	31594	31859	32121	32381	32639	32894	33147	33398	33646
1,0	34134	34375	34614	34850	35083	35314	35543	35769	35993
1,1	36433	36650	36864	37076	37286	37493	37698	37900	38100
1,2	38493	38686	38877	39065	39251	39435	39617	39796	39973
1,3	40320	40490	40658	40824	40988	41149	41309	41466	41621
1,4	41924	42073	42220	42364	42507	42647	42786	42922	43056
1,5	43319	43448	43574	43699	43822	43943	44062	44179	44295
1,6	44520	44630	44738	44845	44950	45053	45154	45252	45352
1,7	45543	45637	45728	45818	45907	45994	46080	46164	46246
1,8	46407	46485	46562	46638	46712	46784	46856	46926	46995
1,9	47128	47193	47257	47320	47381	47441	47500	47558	47615
2,0	47725	47778	47831	47882	47932	47982	48030	48077	48124
2,1	48214	48257	48300	48341	48382	48422	48461	48500	48537
2,2	48610	48645	48679	48713	48745	48778	48809	48840	48870
2,3	48928	48956	48983	49010	49036	49061	49086	49111	49134
2,4	49180	49202	49224	49245	49266	49286	49306	49324	49343
2,5	49379	49396	49413	49430	49446	49461	49477	49492	49506
2,6	49534	49547	49560	49573	49585	49598	49609	49621	49632
2,7	49653	49664	49674	49683	49693	49702	49711	49720	49728
2,8	49744	49752	49760	49767	49774	49781	49788	49795	49801
2,9	49813	49819	49825	49831	49836	49841	49846	49851	49856
3,0	0,49865		3,1	49903	3,2	49931	3,3	49952	3,4
3,5	49977	3,6	49984	3,7	49989	3,8	49993	3,9	49997
4,0	499968								
4,5	499997								
5,0	4999997								

Таблица 12

Физические свойства кварцевых альбитофиров месторождения
Абей-Саяз-Тай-Тай

Номер	ρ (Ом·м)	σ (г/см ³)	Номер	ρ (Ом·м)	σ (г/см ³)
1	920	2,67	31	1100	2,74
2	970	2,69	32	1300	2,75
3	1200	2,63	33	700	2,73
4	1300	2,65	34	560	2,81
5	4200	2,61	35	1100	2,64
6	3700	2,64	36	1500	2,72
7	2200	2,71	37	810	2,80
8	3500	2,71	38	1300	2,94
9	5700	2,68	39	740	2,77
10	5800	2,69	40	920	2,90
11	6000	2,68	41	560	2,75
12	4800	2,71	42	940	2,75
13	3900	2,73	43	900	2,74
14	7600	2,71	44	1300	2,74
15	3900	2,58	45	450	2,59
16	840	2,72	46	2400	2,68
17	420	2,65	47	5800	2,67
18	660	2,74	48	1600	2,73
19	3000	2,95	49	5400	2,77
20	800	2,75	50	3200	2,68
21	1000	2,75	51	420	2,97
22	670	2,81	52	1600	2,89
23	1200	2,74	53	1600	2,83
24	1403	2,75	54	1500	2,71
25	750	2,91	55	400	2,72
26	2500	2,75	56	370	2,75
27	1900	2,74	57	2000	2,68
28	1000	2,75	58	480	2,73
29	1700	2,74	59	690	2,76
30	1000	2,75	60	5000	2,68

Номер	ρ (Ом·м)	σ (г/см ³)	Номер	ρ (Ом·м)	σ (г/см ³)
61	1300	2,77	91	350	2,71
62	1500	2,64	92	450	2,61
63	2500	2,78	93	190	2,77
64	9500	2,72	94	300	2,60
65	680	2,73	95	640	2,90
66	5000	2,80	96	160	2,74
67	500	2,75	97	890	2,70
68	1500	2,75	99	1200	2,70
69	890	2,76	99	1100	2,73
70	1000	2,70	100	1000	2,72
71	3500	2,72	101	750	2,73
72	2900	2,73	102	610	2,23
73	7700	2,58	103	990	2,73
74	1100	2,60	104	1100	2,74
75	1200	2,74	105	8500	2,72
76	5700	2,70	106	10700	2,73
77	580	2,66	107	10000	2,70
78	230	2,75	108	12000	2,60
79	240	2,70	109	2000	2,77
80	200	2,87	110	4100	2,66
81	200	2,84	111	8700	2,63
82	350	2,73	112	12000	2,59
83	1100	2,82	113	10000	2,67
84	220	2,73	114	8200	2,69
85	220	2,70	115	9000	2,56
86	91	2,71	116	9500	2,65
87	160	2,83	117	2200	2,72
88	300	2,66	118	9200	2,68
89	400	2,87	119	4200	2,70
90	17	2,86	120	7700	2,75

Номер	ρ (мм)	σ (г/см ³)	Номер	ρ (мм)	σ (г/см ³)
I21	3700	2,67	I51	610	2,60
I22	4400	2,66	I52	360	2,90
I23	6100	2,71	I53	940	2,82
I24	9300	2,65	I54	660	2,84
I25	1400	2,73	I55	900	2,75
I26	6400	2,67	I56	1000	2,83
I27	210	2,68	I57	930	2,93
I28	260	2,76	I58	150	2,89
I29	220	2,83	I59	470	2,81
I30	460	2,81	I60	630	2,84
I31	360	2,85	I61	770	2,82
I32	270	2,81	I62	690	2,79
I33	490	2,76	I63	300	2,83
I34	370	2,77	I64	63	2,86
I35	400	2,82	I65	290	2,85
I36	170	2,72	I66	310	2,84
I37	400	2,78	I67	380	2,80
I38	240	2,80	I68	5200	2,81
I39	210	2,81	I69	5500	2,80
I40	450	2,79	I70	3300	2,81
I41	310	2,84	I71	7100	2,69
I42	260	2,63	I72	4400	2,79
I43	260	2,81	I73	4800	2,71
I44	410	2,87	I74	4000	2,81
I45	400	2,86	I75	59	2,75
I46	270	2,84	I76	41	2,77
I47	980	2,83	I77	193	2,90
I48	820	2,83	I78	220	2,70
I49	630	2,86	I80	316	2,71
I50	720	2,89	I81	396	2,79
			I82	270	2,77
			I83	340	2,72

3. Работа № 3. ОЦЕНКА ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАТИВНОСТИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

При картировании горных пород геологическая эффективность геофизических методов может быть оценена по их информативности. Расчет информативности основан на оценке среднего количества информации о системе горных пород Y , содержащейся в сообщении о состоянии системы значений физического поля X . Для численных расчетов необходимо ознакомиться с некоторыми понятиями теории информации.

3.1. Теоретические предпосылки

Из курса теории информации известно понятие физической системы [1]. Для геофизиков-разведчиков физической системой может быть система значений физического поля, набор геологических объектов, система типов горных пород и т.д.

Пусть X физическая система, которая случайным образом может оказаться в том или ином состоянии, т.е. системе X присуща какая-то степень неопределенности. Мера неопределенности состояния физической системы будем называть энтропией. Сведения тем ценнее и содержательнее, чем больше была неопределенность системы X априори до их получения.

Степень неопределенности состояния системы определяется числом ее возможных состояний и вероятностью этих состояний. Например, монета может оказаться в одном из двух состояний "герб" или "решка". Кубик имеет шесть возможных состояний. Степень неопределенности состояний кубика больше, чем монеты. Априорные вероятности состояний монеты равны 0,5. Двигатель внутреннего сгорания тоже может оказаться в одном из двух состояний рабочем или нерабочем. Однако вероятность запущенного двигателя оказаться в рабочем состоянии равна 0,99. Степень неопределенности такой системы значительно меньше, чем у монеты. Таким образом, для описания неопределенности состояния системы необходимо знать количество возможных состояний и их вероятности.

В общем случае система X принимает состояния $x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n$ с вероятностями $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$, где $p_i = P(X \sim x_i)$ - вероятность того, что система X примет состояние x_i . Символом $X \sim x_i$ будем обозначать событие, состоящее в том, что система X находится в состоянии x_i . При этом все состояния образуют полную группу попарно несовмест-

ных событий, которые в сумме дают достоверное событие

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1.$$

Запишем данные о состоянии системы X в виде таблицы:

x_i	x_1	x_2	x_3	...	x_n
p_i	p_1	p_2	p_3	...	p_n

В верхней строке таблицы записаны возможные состояния системы, а в нижней строке вероятности возможных состояний. Эта таблица сходна с рядом распределения непрерывной случайной величины X с возможными значениями $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, имеющими вероятности $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$. Для того, чтобы свести состояния физической системы к случайной величине X , достаточно приписать каждому состоянию какое-то числовое значение, например, его номер.

Мерой априорной неопределенности состояния системы является энтропия. Энтропией системы называется сумма произведений вероятностей различных состояний системы на логарифмы этих вероятностей, взятая с обратным знаком

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p_i \log_a p_i \quad (3.1)$$

Знак минус перед суммой поставлен для того, чтобы энтропия была положительной, т.к. $p_i < 1$ и $\log p_i < 0$. Основание логарифма может быть любым $a > 1$. Перемена основания равносильна умножению энтропии на постоянное число, а выбор основания равносильно выбору единицы измерения энтропии. Например, при $a = 10$ единицы называются десятичными, при $a = 2$ единицы называются двоичными.

Двоичные единицы хорошо совпадают с двоичной системой счисления ЭВМ. При выборе основания логарифма $a = 2$ за единицу измерения энтропии принимается энтропия физической системы X , которая имеет два равновероятных состояния, например, энтропия монеты, ячейки памяти на ферритах или энтропия одного разряда двоичного числа, которое может принимать значения 0 или 1.

Систему с двумя равновероятными состояниями можно представить в виде:

x_i	x_1	x_2
p_i	0,5	0,5

Энтропия такой системы равна единице, которая называется двоичной единицей энтропии

$$H(X) = - \left(\frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{2} \right) = 1$$

Двоичная единица энтропии называется битом, от слова *bit* (сокращения от *binary digit* - двоичный знак). Это энтропия одного разряда двоичного числа.

В качестве примера подсчитаем в двоичных единицах энтропию системы X , имеющую n равновероятных состояний:

X_1	X_2	X_3	$\dots$	X_n
p_i	$\frac{1}{n}$	$\frac{1}{n}$	$\dots$	$\frac{1}{n}$

По формуле (3.1)

$$H(X) = -n \frac{1}{n} \log_2 \frac{1}{n} = -\log_2 1 + \log_2 n = \log_2 n \quad (3.2)$$

т.е. энтропия такой системы равна двоичному логарифму числа состояний.

Энтропия физической системы, подсчитанная по формуле (3.1), удовлетворяет трем основным свойствам:

- она обращается в нуль, когда одно из состояний системы достоверно, а другие состояния невозможны;
- при заданном числе состояний n , она обращается в максимум, когда состояния равновероятны;
- обладает свойством аддитивности, т.е. при объединении независимых систем их энтропии складываются.

Таким образом, подсчет энтропии по формуле (3.1) правильно характеризует степень неопределенности физического состояния системы, что и обусловило выбор формулы (3.1) для количественных подсчетов энтропии.

Для подсчета энтропии удобно использовать функцию:

$$\eta(p) = -p \log_2 p,$$

значения которой табулированы от нуля до единицы через 0,01 и приведены в приложении (таблица 3.1). Используя функцию $\eta(p)$, выражение (3.1) можно переписать в виде

$$H(X) = \sum_{i=1}^n \eta(p_i) \quad \forall \quad (3.3)$$

Рассмотрим примеры количественных подсчетов энтропии геофизических систем.

Пример 1. Определить энтропию системы, состоящей из двух методов магниторазведки и гравиразведки, привлеченных в помощь геологическому картированию участка работ. В результате съемки система геофизических измерений X может оказаться в одном из четырех возможных состояний: $X \sim X_1$ - оба измерения высокие, $X \sim X_2$ - магниторазведка представлена высокими значениями, а гравиразведка низкими, $X \sim X_3$ - магниторазведка представлена низкими значениями, а гравиразведка высокими, $X \sim X_4$ - оба измерения низкие. Вероятности этих состояний, соответственно равны 0,2, 0,3, 0,4, 0,1.

Решение. Запишем условие задачи в виде таблицы состояний

X_i	X_1	X_2	X_3	X_4
p_i	0,2	0,3	0,4	0,1

По формуле (3) находим:

$$H(X) = \sum_{i=1}^n \eta(p_i) = \eta(0,2) + \eta(0,3) + \eta(0,4) + \eta(0,1)$$

Используя таблицу (3.1) получаем

$$H(X) = 0,4644 + 0,5211 + 0,5288 + 0,3322 = 1,85 \text{ bit}$$

Пример 2. Определить максимальную возможную энтропию системы из трех геофизических методов (магниторазведка, гравиразведка и электроразведка), каждый из которых может быть в четырех возможных состояниях.

Решение. Общее число возможных состояний равно $n = 4 \cdot 4 \cdot 4 = 64$. Максимальная возможная энтропия системы будет в том случае, когда все состояния системы равновероятны. При этом по формуле (3.2) находим $H(X) = \log_2 64 = 6 \text{ bit}$.

Под объединением двух систем X и Y с возможными состояниями $X_1, X_2, \dots, X_n$ и $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$ понимается сложная система (X, Y) , состояния которой (X_i, Y_j) представляет собой набор всех возможных состояний X_i и Y_j . Число таких комбинаций будет $n \cdot m$.

Обозначим $P_{ij} = P(X \sim X_i, Y \sim Y_j)$ вероятностью того, что система (X, Y) будет в состоянии (X_i, Y_j) . Вероятности P_{ij} можно представить в виде таблицы.

y_j	x_i			
	x_1	x_2	...	x_n
y_1	p_{11}	p_{21}	...	p_{n1}
y_2	p_{12}	p_{22}	...	p_{n2}
...	...	...	...	...
y_m	p_{1m}	p_{2m}	...	p_{nm}

Энтропия сложной системы по определению равна

$$H(X, Y) = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p_{ij} \log p_{ij} \quad (3.4)$$

Если X и Y независимы, то при объединении систем их энтропии складываются

$$H(X, Y) = H(X) + H(Y) \quad (3.5)$$

Если объединяются зависимые системы, то энтропия объединения меньше энтропий составных частей.

Обозначим $P(y_j/x_i)$ условную вероятность того, что система Y примет состояние y_j при условии, что система X находится в состоянии x_i :

$$P(y_j/x_i) = P(Y \sim y_j / X \sim x_i)$$

Условную энтропию системы Y при условии, что система X находится в состоянии x_i , обозначим $H(Y/x_i)$.

По определению

$$H(Y/x_i) = - \sum_{j=1}^m P(y_j/x_i) \log P(y_j/x_i) \quad (3.6)$$

Условная энтропия системы Y зависит от того, какое состояние x_i приняла система X . Таких состояний n . Вероятность этих состояний известна. Система Y может принимать разные состояния с вероятностью p_i .

Полную (среднюю) энтропию системы Y обозначим $H(Y/X)$. По определению среднего

$$H(Y/X) = \sum_{i=1}^n p_i H(Y/x_i) = - \sum_{i=1}^n p_i \sum_{j=1}^m P(y_j/x_i) \log P(y_j/x_i) \quad (3.7)$$

Условная энтропия $H(Y/X)$ характеризует степень неопределенности системы Y , оставшуюся после того, как состояние системы X полностью определится. Это полная условная энтропия системы Y . Порядок выполнения расчетов по формуле (3.7) проиллюстрируем на примере.

Пример. Имеются две системы Y и X , объединенные в одну (X, Y) , где Y - система типов горных пород, X - система интервалов значений физического поля.

Каротажные диаграммы измерений радиоактивности и электрического поля исследуемых типов горных пород приведены на рис. 3.1. Горные породы сложены глинами y_1 , песчаниками y_2 и известняками y_3 . По скважине выполняется каротаж ГК (гамма-каротаж), ПС (каротаж потенциалов собственной поляризации горных пород), КС (каротаж кажущегося сопротивления) и НГК (нейтронный гамма-каротаж).

Требуется оценить степень неопределенности состояния системы горных пород Y , оставшуюся после того, как состояние системы интервалов значений физического поля X полностью определится, т.е. все измерения выполнены.

Для определенности в качестве системы X выберем интервалы значений радиоактивного поля. Глины имеют повышенное значение радиоактивности 20-30 мкР/ч и выше, песчаники средние значения 10-20 мкР/ч, известняки имеют низкую радиоактивность 0-10 мкР/ч. Учитывая сказанное, интервалы значений естественной радиоактивности горных пород выберем следующим образом: x_1 в пределах 20-30 мкР/ч и выше, x_2 в пределах 10-20 мкР/ч, x_3 в пределах 0-10 мкР/ч.

Решение. Подсчитаем вероятности состояний $P_{ij} = P(X \sim x_i, Y \sim y_j)$ объединенной системы (X, Y) . Для этого воспользуемся геометрической трактовкой понятия вероятности. Геометрическая вероятность обобщает классическое определение вероятности, как частоты появления события при многократном воспроизведении эксперимента, на бесконечное множество исходов эксперимента.

К понятию геометрической вероятности применима задача о бросании точки в некоторую ограниченную область G , содержащую

в себе меньшую по размерам область g . Если событие A состоит в попадании точки в область g , то $P(A) = \text{mes } g / \text{mes } G$, где $\text{mes } g$ и $\text{mes } G$ - меры областей g и G : Это могут быть отрезки длин, площади, объемы. В нашем случае это отрезки длин по оси скважины.

С учетом сказанного, вероятность встречи горной породы j -го типа y_j равна:

$$P(y_j) = L(y_j) / L, \quad (3.8)$$

вероятность наблюдения гамма-поля в i -том интервале значений x_i равна

$$P(x_i) = L(x_i) / L \quad (3.9)$$

вероятность одновременной встречи горной породы j -го типа и наблюдения гамма-поля в i -ом интервале значений x_i равна

$$P(y_j, x_i) = L(y_j, x_i) / L \quad (3.10)$$

где $L(y_j)$ - суммарный интервал встречи скважины с породой j -го типа, $L(x_i)$ - суммарный интервал наблюдения гамма-поля в интервале значений x_i , L - полная длина профиля наблюдений.

Составим таблицу P_{ij} вероятностей состояния системы (X, Y)

y_j		X_i			$p_j = p(y \sim y_j)$
		$X \sim x_i$			
		x_1 (0-10)	x_2 (10-20)	x_3 (20-30)	
$y \sim y_j$	y_1 (глина)	0	0,02	0,43	0,45
	y_2 (песчаник)	0	$p_{ij}=0,39$	0,03	0,42
	y_3 (известняк)	0,12	0,01	0	0,13
	$p_i = p(X \sim x_i)$	0,12	0,42	0,46	1,0

По теории умножения вероятностей

$$p_i P(y_j/x_i) = P_{ij} \quad (3.11)$$

откуда следует, что условные вероятности того, что система типов горных пород Y примет состояние y_j при условии, что система интервалов радиоактивного поля X находится в состоянии x_i , будут равны

$$P(y_j/x_i) = P_{ij}/p_i \quad (3.12)$$

Поделив каждое значение таблицы P_{ij} на вероятности появления интервалов значений радиоактивного поля p_i , получим таблицу условных вероятностей $P(y_j/x_i)$, которая имеет вид:

y _j		X _i			
		X ~ X _i			
		x ₁ (0-10)	x ₂ (10-20)	x ₃ (20-30)	
Y ~ y _j	y ₁ (глина)	0	0,05	0,94	
	y ₂ (песчаник)	0	P(y _j /x _i)=0,93	0,06	
	y ₃ (известняк)	1	0,02	0	
P _i = P(X ~ x _i)		0,12	0,42	0,46	

Подсчитаем условную энтропию системы типов горных пород Y , оставшуюся после того, как состояние системы интервалов значений радиоактивного поля X полностью определилось. Для этого используем формулу полной условной энтропии (2.7):

$$H(Y/X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p_i \gamma [P(y_j/x_i)] \quad (3.13)$$

где $\eta(p) = -p \log_2 p$ - табулированная функция, приведенная в таблице 3.1.

Воспользовавшись таблицей 3.1, находим:

$$\begin{aligned} H(Y/X) &= 0,12[\eta(0) + \eta(1) + \eta(2)] + 0,42[\eta(0,05) + \eta(0,93) + \\ &+ \eta(0,02)] + 0,46[\eta(0,94) + \eta(0,06) + \eta(0)] = 0,42[0,2161 + \\ &+ 0,0974 + 0,1128] + 0,46[0,0839 + 0,2436] = 0,328 \text{ bit} \end{aligned}$$

Таким образом, неопределенность системы Y , оставшаяся после того, как состояние системы X полностью определилось, характеризуется энтропией 0,328 bit.

Установим связь между энтропией и информацией. Любые сведения (информация) уменьшают неопределенность системы (энтропию). Поэтому, естественно, количество информации измерять уменьшением энтропии.

Если до получения информации (априори) энтропия была $H(X)$, а после получения сведений состояние системы полностью определилось, т.е. энтропия стала равной нулю, то

$$I_X = H(X) - 0 = H(X) \quad (3.14)$$

где I_X - информация о системе X .

Таким образом, количество информации, приобретаемое при полном выяснении состояния системы равно энтропии этой системы

$$I_X = - \sum_{i=1}^n p_i \log p_i \quad (3.15)$$

где $p_i = P(X \sim x_i)$ - вероятность того, что система находится в состоянии x_i .

Естественно, каждое слагаемое выражения (3.15) рассматривать как частную информацию I_{x_i} отдельного сообщения о том, что система X находится в состоянии x_i

$$I_{x_i} = - \log p_i \quad (3.16)$$

Тогда I_X будет средней (полной) информацией, получаемой от всех возможных отдельных сообщений с учетом их вероятностей. Если все возможные состояния априори равновероятны $p_1 = p_2 = \dots = p_n = \frac{1}{n}$, то частная информация от отдельного сообщения $I_{x_i} = -\log p_i = \log n$ равна средней информации $I_X = -n \frac{1}{n} \log \frac{1}{n} = \log n$.

Измеряя информацию в двоичных единицах, мы характеризуем ее числом ответов "да" или "нет".

Действительно, для того чтобы выяснить состояние системы X , которая может оказаться в одном из двух состояний

x_1	x_1	x_2
p_1	p_1	p_2

Надо задать вопрос. Находится ли система X в состоянии x_1 ? Ответ "да" или "нет" доставляет информацию, которая достигает своего максимального значения $I_X = 1$, когда оба состояния априори равновероятны $p_1 = p_2 = \frac{1}{2}$ например, состояние системы "монета". Таким образом, максимальная информация, даваемая ответом "да" или "нет", равна одной двоичной единице. Если информация равна n bit, то она равносильна информации, даваемой n ответами "да" или "нет" на вопросы, поставленные таким образом, что ответы "да" или "нет" одинаково вероятны.

Информация равна разности энтропий до и после получения сообщения о результатах измерений физического поля. Подсчитаем информацию, которую доставляют результаты измерений физического поля при определении типов исследуемых горных пород на участке работ. Такой подсчет позволяет оценить геологическую информативность используемого геофизического метода или комплекса методов.

Сформулируем задачу следующим образом. Получены сведения о результатах наблюдений физического поля X , которое связано с системой типов горных пород на участке работ Y . Какую информацию о системе Y дает наблюдение системы X ?

Определим среднюю (полную) информацию о системе Y , содержащейся в системе X , как уменьшение энтропии системы Y в результате получения сведений о X

$$I_{X-Y} = H(Y) - H(Y/X) \quad (3.17)$$

где $H(Y)$ – априорная энтропия системы Y , $H(Y/X)$ – апостериорная (остаточная) энтропия системы Y , оставшаяся после получения сведений о системе X .

Заметим, что $I_{X \rightarrow Y} = I_{Y \rightarrow X}$. Из двух систем каждая содержит относительно другой одну и ту же информацию, т.е. $H(X) - H(X/Y) = H(Y) - H(Y/X)$.

Пример. Найти информацию о системе типов горных пород Y , которая содержится в результатах измерений их естественной радиоактивности X .

Решение. Полная (средняя) информации о системе Y , содержащаяся в системе X , подсчитывается по формуле (3.17). Энтропия системы Y априори равна:

$$H(Y) = \sum_{j=1}^n p_j [p(y_j)]$$

где $\eta(p) = -p \log_2 p$ – табулированная функция, приведенная в таблице 3.1. Априорные геометрические вероятности состояний системы Y равны: для глин $p_1 = 0,45$, для песчанников $p_2 = 0,42$, для известняков $p_3 = 0,13$.

Воспользовавшись таблицей 3.1 находим априорную энтропию системы Y

$$H(Y) = \eta(0,45) + \eta(0,42) + \eta(0,13) = 0,5184 + 0,5256 + 0,3826 = 1,4266 \text{ бит}$$

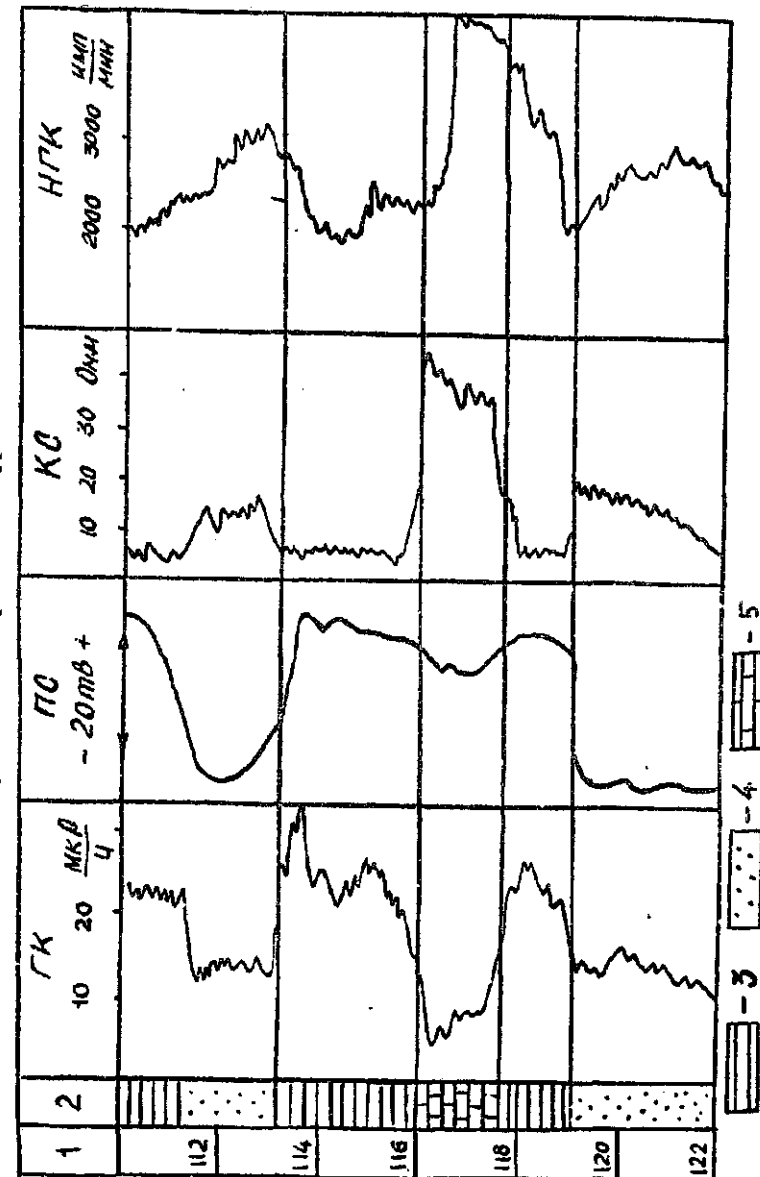
Апостериорная энтропия системы Y , оставшаяся после выполнения измерений естественной радиоактивности горных пород, подсчитана ранее и равна $H(Y/X) = 0,328 \text{ бит}$.

Таким образом, информация о системе Y , содержащаяся в системе X , равна

$$I_{X \rightarrow Y} = 1,4266 - 0,328 = 1,0986 \text{ бит}$$

Для сравнения геологической информативности различных геофизических методов удобно использовать понятие относительной информации, которая получается путем нормировки абсолютной информации к априорной энтропии системы типов горных пород Y . Относительная информация, доставляемая измерением естественной радиоактивности горных пород, в рассматриваемом случае равна

Каротажные диаграммы в терригенных отложениях



1 – колонка глубин, 2 – геологическая колонка, 3 – глины, 4 – песчанники, 5 – известняки.
Рис. 3.1

$$I_{x \rightarrow y} / H(y) = \frac{1,0986}{1,4266} \cdot 100\% = 77\%$$

Затем подсчитывается относительная геологическая информативность других геофизических методов. В комплекс геофизических методов для решения задачи литологического расчленения горных пород, изображенных на рис 3.1, кроме гамма-каротажа /ГК/ входят методы электрического каротажа кажущегося сопротивления /КС/, потенциалов собственной поляризации горных пород /ПС/ и нейтронный гамма-каротаж /НГК/. Если в результате расчета относительная информация, доставляемая измерениями КС, ПС и НГК окажется выше, чем у метода ГК, то предпочтение отдается тому методу, у которого информативность при решении задачи литологического расчленения горных пород будет максимальной.

Удобство относительной информации заключается в том, что она не зависит от априорной энтропии системы горных пород.

3.2. Задание

Расчитать абсолютную и относительную геологическую информативность каротажа потенциалов собственной поляризации горных пород (ПС), каротажа кажущегося сопротивления (КС) и нейтронного гамма-каротажа (НГК) при расчленении терригенных горных пород, приведенных на рис. 3.1. С этой целью определить априорную энтропию системы горных пород и апостериорную энтропию, возникающую после применения каждого метода в отдельности. Для определения вероятностей встречи горных пород j -го типа, вероятностей наблюдения физического поля в i -ом интервале значений и вероятностей одновременной встречи горных пород j -го типа и наблюдений физического поля в i -ом интервале значений использовать геометрическое определение вероятности. Сравнить относительные геологические информативности использованных геофизических методов и выделить наиболее информативный метод для решения задачи о литологическом расчленении горных пород по данным каротажа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. - М.: Физматгиз, 1962. - 564 с.

Таблица 3.1

Таблица значений функции $\gamma(p) = -p \log_2 p$

p	$\gamma(p)$	p	$\gamma(p)$	p	$\gamma(p)$
0	0	0,34	0,5292	0,68	0,3784
0,01	0,0664	0,35	0,5301	0,69	0,3694
0,02	0,0664	0,36	0,5306	0,70	0,3602
0,03	0,1518	0,37	0,5307	0,71	0,3508
0,04	0,1858	0,38	0,5305	0,72	0,3412
0,05	0,2161	0,39	0,5298	0,73	0,3314
0,06	0,2435	0,40	0,5288	0,74	0,3215
0,07	0,2686	0,41	0,5274	0,75	0,3113
0,08	0,2915	0,42	0,5256	0,76	0,3009
0,09	0,3126	0,43	0,5236	0,77	0,2903
0,10	0,3322	0,44	0,5210	0,78	0,2796
0,11	0,3503	0,45	0,5184	0,79	0,2687
0,12	0,3671	0,46	0,5153	0,80	0,2525
0,13	0,3826	0,47	0,5120	0,81	0,2462
0,14	0,3971	0,48	0,5083	0,82	0,2348
0,15	0,4105	0,49	0,5043	0,83	0,2231
0,16	0,4230	0,50	0,5000	0,84	0,2112
0,17	0,4346	0,51	0,4954	0,85	0,1992
0,18	0,4453	0,52	0,4906	0,86	0,1871
0,19	0,4552	0,53	0,4854	0,87	0,1748
0,20	0,4644	0,54	0,4800	0,88	0,1623
0,21	0,4728	0,55	0,4744	0,89	0,1496
0,22	0,4806	0,56	0,4685	0,90	0,1368
0,23	0,4877	0,57	0,4623	0,91	0,1238
0,24	0,4941	0,58	0,4558	0,92	0,1107
0,25	0,5000	0,59	0,4491	0,93	0,0974
0,26	0,5053	0,60	0,4422	0,94	0,0839
0,27	0,5100	0,61	0,4350	0,95	0,0703
0,28	0,5142	0,62	0,4276	0,96	0,0565
0,29	0,5179	0,63	0,4199	0,97	0,0426
0,30	0,5211	0,64	0,4121	0,98	0,0286
0,31	0,5238	0,65	0,4040	0,99	0,0144
0,32	0,5260	0,66	0,3957	1,00	0
0,33	0,5278	0,67	0,3871		

4. Работа № 4. НОРМАЛЬНОЕ ПОЛЕ, АНОМАЛИЯ, ПОМЕХА

4.1. Общие сведения

При геологическом истолковании геофизических данных важное значение имеют понятия нормального поля, аномалии и помехи.

Под геофизической аномалией понимается отклонение физического поля от его нормальных значений. Нормальным полем считается геофизическое поле, обусловленное однородными по физическому параметру горными породами.

Нормальное поле может быть искусственным и естественным. Нормальное искусственное поле определяется полем заданного источника в однородной бесконечной среде. Нормальное естественное поле задается полем Земли.

В частности нормальное поле силы тяжести g_0 вычисляется по Ф.Гельмерту

$$g_0 = g_{\text{экв}} (1 - \beta_1 \sin^2 \varphi + \beta_2 \sin^2 2\varphi) \quad (4.1)$$

где $g_{\text{экв}}$ — значение силы тяжести на экваторе,
 φ — широта местности,

β_1, β_2 — константы по Ф.Гельмерту.

Аномалией считается отклонение измеренного значения g от нормального $\Delta g = g - g_0$ с поправкой за высоту точки наблюдения (аномалия Фая) и за промежуточный слой (аномалия Буге).

Нормальное магнитное поле T_0 является суммарным магнитным полем диполя Земли T_D , материков T_M и космического пространства T_e

$$T_0 = T_D + T_M + T_e \quad (4.2)$$

Аномалией считается отклонение измеренного магнитного поля T от нормального $\Delta T = T - T_0$. В настоящее время составлены подробные карты нормального магнитного поля (изодинамы) и градиента нормального поля (изопоры).

Аномалии делятся на региональные и локальные. В качестве модели поля принимается аддитивная модель, т.е. результаты измерений в i -ой точке f_i имеют вид

$$f_i = a_{i \text{ рег}} + a_{i \text{ лок}} + n_{i \text{ пом}} \quad (4.3)$$

где $a_{i \text{ рег}}$ — региональная (фоновая) составляющая аномалии,
 $a_{i \text{ лок}}$ — локальная аномалия,
 $n_{i \text{ пом}}$ — помеха.

При разделении полей на региональную и локальную составляющие модель поля упрощается. При выделении региональной составляющей локальную составляющую относят к помехам

$$f_i = a_{i \text{ рег}} + n_{i \text{ пом}} \quad (4.4)$$

При выделении локальной составляющей региональная составляющая относится к помехам

$$f_i = a_{i \text{ лок}} + n_{i \text{ пом}} \quad (4.5)$$

При выделении аномалий действует принцип относительности. От крупных и мелких структурных единиц выделяются аномалии различных порядков. Поэтому часто используют понятие местного нормального поля, под которым понимают относительно спокойное поле, типичное в среднем для участка геофизической съемки.

При выделении локальных и региональных аномалий следует помнить, что локальная аномалия по своим линейным размерам в пять раз и более меньше изучаемой площади (профиля). Региональная аномалия по линейным размерам в пять раз и более превышает локальные аномалии.

По физико-геологической природе аномалии делятся на три группы. Одни связаны с месторождениями полезных ископаемых (рудные), другие с геологическими структурами, нарушениями, контактами (структурные), а третьи с глубинным строением Земли, земной коры (глубинные).

Под помехами понимаются факторы, осложняющие измерения геофизических полей и интерпретацию результатов измерений.

Помехи делятся на геологические, связанные с влиянием геологических неоднородностей или рельефом, и негеологические, связанные с вариацией геофизических полей во времени, служащие

щими токами и т.д.

Помехи бывают случайными и неслучайными. Случайные помехи обусловлены большим числом неконтролируемых факторов, действия каждого из которых незначительно. К неслучайным помехам относятся фоновые помехи и систематические расхождения.

Для выделения аномалий на фоне помех используются статистические критерии. Аномальными считаются точки, на которых амплитуда измеренного поля превышает уровень разрешенной изменчивости нормального поля. Уровень изменчивости характеризуется величиной общей дисперсии наблюдаемого поля $\mathcal{D}_0$, которая складывается из природной дисперсии $\mathcal{D}_2$, определяемой геологическими факторами, и дисперсии геофизической съемки $\mathcal{D}_c$, определяемой точностью измерений,

$$\mathcal{D}_0 = \mathcal{D}_2 + \mathcal{D}_c \quad (4.6)$$

По определению $\mathcal{D} = \sigma^2$, где σ — среднееквадратическое отклонение случайной величины от ее математического ожидания. Поэтому выражение (4.6) можно переписать в виде

$$\sigma_0^2 = \sigma_2^2 + \sigma_c^2 \quad (4.7)$$

где σ_0 — общее среднееквадратическое отклонение наблюдаемого поля (стандарт),

σ_2 — среднееквадратическая погрешность геологических помех,

σ_c — среднееквадратическая погрешность съемки

Если фоновые значения поля распределены по нормальному закону, нижний аномальный предел A_{min} , ограничивающий уровень разрешенных колебаний нормального поля, определяется соотношением

$$A_{min} = A_p \pm 3\sigma_0 \quad (4.8)$$

где A_p — среднее арифметическое частных значений нормального фона,

σ_0 — общий стандарт наблюдаемого поля.

Если фоновые значения поля подчинены логнормальному

закону, нижний аномальный предел, ограничивающий уровень разрешенных колебаний нормального поля, определяется

$$A_{min} = A_p \varepsilon^{\pm 3} \quad (4.9)$$

где A_p — среднее геометрическое частных значений нормального поля,

ε — стандартный множитель.

Фоновые значения могут превышать предел A_{min} . Однако вероятность этого равна 0,0028, а вероятность закономерной эволюции 0,9972.

Требования к уровню A_{min} могут быть снижены в случае коррелируемости точек с повышенными значениями поля по m профилям или при наличии m высоких значений подряд по профилю. При этом

$$A_{min} = A_p \pm \frac{3\sigma_0}{\sqrt{m}} \quad (m \leq 9) \quad (4.10)$$

если фоновые значения распределены по нормальному закону и

$$A_{min} = A_p \varepsilon^{\pm 3/\sqrt{m}} \quad (m \leq 9) \quad (4.11)$$

если фоновые значения подчинены логнормальному закону.

В требованиях (4.10) и (4.11) $m \leq 9$, т.к. вероятность того, что 9 пикетов подряд в области нормального поля будут превышать нижний аномальный предел исчезающе мала. По теореме умножения вероятностей $P(A_p > A_{min}) = 6 \cdot 10^{-8}$, т.е. высокие помехи одного знака, как независимые события маловероятны.

При планировании точности наблюдений следует руководствоваться следующими положениями.

Наблюдения с неоправданно высокой точностью ведут к увеличению затрат средств и времени, а недостаточная точность приводит к пропуску объекта.

Точность геофизической съемки определяется уровнем помех. При интенсивных помехах повышение точности измерений приводит к увеличению затрат труда и времени, но не дает желаемого ре-

зультата. Возрастает лишь фиктивная, кажущаяся, а не истинная точность.

Планирование точности наблюдений основано на трех параметрах: минимальной амплитуде аномалии, подлежащей обнаружению, или нижнем аномальном пределе A_{min} , среднеквадратической погрешности геофизической съемки σ_c , среднеквадратической погрешности геологических помех σ_2 .

Нижний аномальный предел определяется путем решения прямой задачи для заданной физико-геологической модели (ФГМ) объекта поисков при наиболее неблагоприятных условиях от минимальных промышленных рудных тел или из опыта предшествующих геофизических работ.

Среднеквадратическая погрешность съемки оценивается по результатам повторных наблюдений и подсчитывается по формуле:

$$\sigma_c = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_i^o - f_i^n)^2}{2n}} \quad (4.12)$$

где f_i^o и f_i^n — основной и повторный замеры,
 n — число парных замеров.

Повторные наблюдения выполняются в пределах нормальных или фоновых значений в количестве 3–5% от числа основных замеров.

Среднеквадратическая погрешность геологических помех определяется из соотношения (4.7)

$$\sigma_2^2 = \sigma_o^2 - \sigma_c^2 \quad (4.13)$$

Общая среднеквадратическая погрешность наблюдений определяется по разности N наблюдаемых значений f_i от их нормальных (фоновых) значений f_p по формуле

$$\sigma_o = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (f_i - f_p)^2}{N-1}} \quad (4.14)$$

где f_p — среднее арифметическое результатов измерений в нормальном поле, которое подсчитывается по формуле

$$f_p = \frac{\sum_{i=1}^N f_i}{N} \quad (4.15)$$

Обычно точность наблюдений, методику работ и аппаратуру подбирают так, чтобы расчетная аномалия от заданной физико-геологической модели объекта поисков превышала нижний аномальный предел

$$A \geq A_{min} \geq A_p \pm 3\sigma_o \quad (4.16)$$

При выполнении геофизических работ возможны два случая, определяемые уровнем геологических помех.

Если уровень помех геологического происхождения мал $\sigma_2^2 \gg \sigma_c^2$, то разрешающая способность геофизической съемки σ_c определяется аппаратурой и методикой работ. В этом случае целесообразно применять высокоточную прецизионную аппаратуру. Например, высокоточная магниторазведка $\sigma_c = 1 \div 2 \mu T$ позволяет разделять слабомангнитные бокситы на фоне немагнитных известняков.

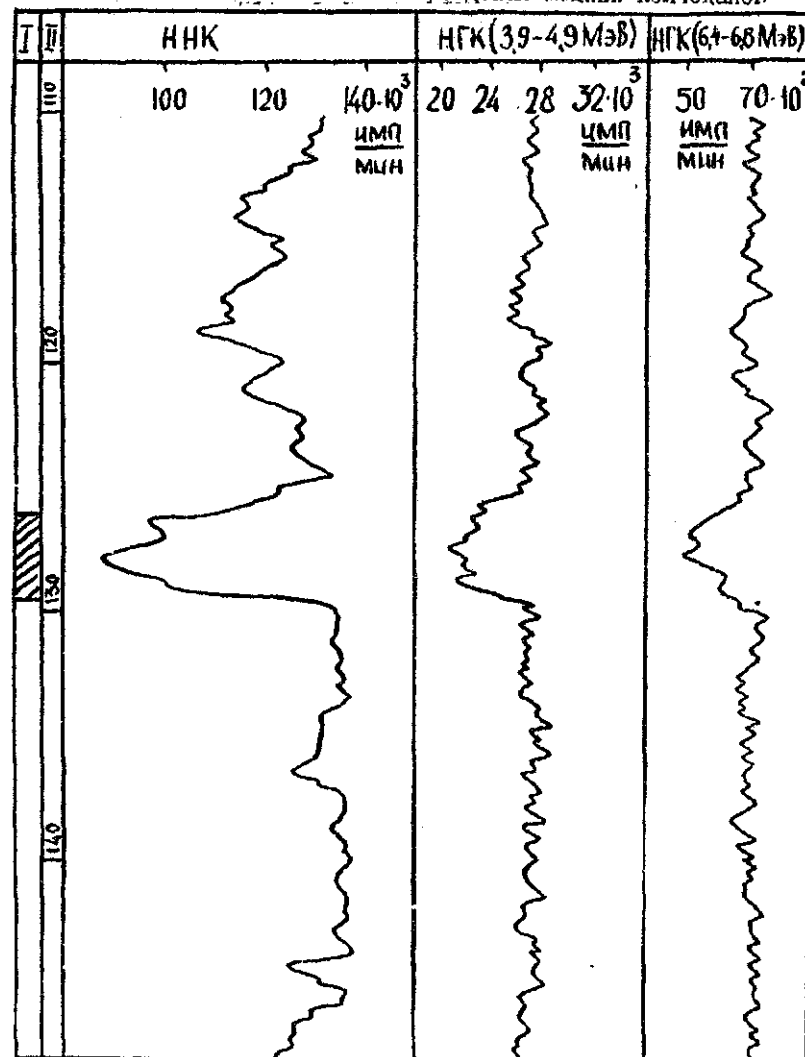
Если дисперсия геологических помех велика $\sigma_2^2 \gg \sigma_c^2$, то использовать прецизионную съемку не имеет смысла. Например, нецелесообразно применять высокоточную магниторазведку в горных районах из-за помех, связанных с рельефом местности.

В качестве примера рассмотрим результаты измерений в методе вызванных потенциалов. Путем измерений установлено, что $\sigma_c^2 = 0,12$, общая дисперсия наблюдений $\sigma_o^2 = 1,3$. При этом $\sigma_2^2 = \sigma_o^2 - \sigma_c^2 = 1,18$, т.е. дисперсия геологических помех велика $\sigma_2^2 \gg \sigma_c^2$ и повышение точности наблюдений нецелесообразно.

Для снижения дисперсии съемки σ_c^2 и дисперсии геологических помех σ_2^2 используются следующие приемы.

Дисперсия съемки зависит от порога чувствительности прибора, количества измерений на точке n с последующим усред-

Результаты ядерно-геофизических измерений по скв. 2428
Восточно-Семеновского месторождения медных колчеданов



1 - геологическая колонка; 11 - глубина, м; 1 - серицито-кварцевая порода, 2 - медно-цинковый колчедан

Рис. 4.1

нением $\overline{\sigma_c^2} = \frac{\sigma_c^2}{n}$, и мешающих факторов, таких как вариации поля во времени, градиентов поля, установки и центровки прибора на точке и других. Поэтому снижение дисперсии съемки достигается с помощью более точной аппаратуры, методики работ и введения поправок за влияние мешающих факторов. Влияние каждого фактора оценивается отдельно при неизменности влияния остальных факторов.

Уменьшение дисперсии геологических помех достигается статистической обработкой исходных данных. Обычное осреднение в пределах окна из n точек позволяет уменьшить дисперсию геологических помех в n раз $\overline{\sigma_c^2} = \sigma_c^2/n$. Кроме того помехи могут коррелировать между собой и отличаться от аномалий по частотной характеристике (по спектру). Поэтому, помехи геологического происхождения можно уменьшить путем соответствующих приемов обработки исходных данных (корреляционный и спектральный анализ).

4.2. Содержание задания

По данным ядерно-геофизических измерений в скважине определить расположение вероятностей залежи медноколчеданной руды путем выделения аномальных значений регистрируемого нейтронного или гамма-поля. Полевые измерения проведены на Восточно-Семеновском месторождении медно-цинковых колчеданов нейтрон-нейтронным и нейтронным гамма-методом. Результаты измерений изображены в виде диаграмм нейтрон-нейтронного (ННК) и нейтронного гамма-каротажа (НГК) на рис. 4.1 и приведены в табл. 4.1.

Измерения нейтронного поля выполнены по тепловым нейтронам в интегральном варианте. Нейтронные гамма-измерения выполнены в спектрометрическом варианте в области захватного гамма-излучения породообразующих элементов (3,3-4,9 МэВ) и в области рудных элементов (6,4-6,8 МэВ).

Для исследования скважин методом НГК использовалась аппаратура СГСЛ-2 и каротажный подъемник СК-1. Нейтронное поле создавалось с помощью Po-Be-источника мощностью $4 \cdot 10^7$ нейтрон/с. Методикой работ предусматривалось выполнение нейтрон-нейтронного каротажа по тепловым нейтронам. Для регистрации нейтронов использовался детектор типа ДДМ.

Наличие цинка и кадмия в медных рудах месторождений приводит к тому, что рудные интервалы выделяются минимумами скорости счета тепловых нейтронов и захватного гамма-излучения. Содержание породообразующих элементов определялось по скорости счета захватного гамма-излучения в области аналитических линий кремния 3,9-4,9 МэВ. Для определения содержания меди использовалась область спектра 6,4-6,8 МэВ.

Таблица 4.1

РЕЗУЛЬТАТЫ

ЯДЕРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ПО СКРАЖИНЕ № 2428
ВОСТОЧНО-СЕМЕНОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МЕДНО-ЦИНКОВЫХ КОМПЛЕКСОВ

Глубина м	Значения ННК, имп/мин		Значения НГК, (3,9-4,9 МэВ), имп/мин		Значения НГК (6,4-6,8 МэВ), имп/мин	
	основн.	повторн.	основн.	повторн.	основн.	повторн.
II1	129·10 ³	128·10 ³	27,0·10 ³	27,5·10 ³	73·10 ²	72·10 ²
II2	126	126	26,5	26,8	68	70
II3	119	120	27,2	27,0	70	71
II4	113	114	27,2	27,0	70	71
II5	120	119	27,6	27,5	76	74
II6	121	122	27,0	28,0	70	70
II7	114	114	26,0	27,0	73	72
II8	113	111	27,0	26,0	75	74
II9	109	111	28,0	27,0	68	70
120	122	121	27,0	27,0	73	72
121	115	115	27,8	27,6	70	70
122	123	122	28,5	28,3	75	74
123	126	125	26,0	26,0	70	72
124	127	125	27,8	27,6	75	74
125	121	121	26,0	26,0	70	70
126	110	107	24,0	24,5	62	62
127	97	98	22,0	22,5	52	50
128	87	89	22,0	22,0	55	53
129	100	102	22,0	21,5	60	61
130	134	134	27,5	27,4	78	76

Продолжение таблицы 4.1

Глубина м	Значения ННК, имп/мин		Значения НГК (3,9-4,9 МэВ), имп/мин		Значения НГК (6,4-6,8 МэВ), имп/мин	
	основн.	повт.	основн.	повторн.	основн.	повторн.
131	133·10 ³	134·10 ³	27,0·10 ³	27,0·10 ³	74·10 ²	74·10 ²
132	134	134	26,7	26,5	72	72
133	135	135	26,5	26,3	67	68
134	133	134	28,0	27,5	68	68
135	130		27,8		72	
136	128		27,5		73	
137	134		28,0		70	
138	136		27,0		70	
139	135		27,5		72	
140	136		27,5		73	
141	135		27,5		70	
142	136		27,0		75	
143	133		28,0		70	
144	130		28,0		72	
145	135		28,0		75	
146	128		27,0		73	
147	126		27,0		75	
148	120		27,5		68	
149	121		28,0		73	
150	128		28,0		72	
151	123		27,2		75	
152	129		26,5		70	
153	125		27,2		75	
154	118·10 ³		26,5·10 ³		72·10 ²	

В таблице приведены результаты основных и повторных измерений нейтронного и гамма-поля при выполнении нейтрон-нейтронного и нейтронного гамма-каротажа. Результаты повторных наблюдений предназначены для оценки точности данных ННК и НГК.

Требуется выполнить следующее.
Скопировать на кальку диаграммы нейтрон-нейтронного каро-

така по тепловым нейтронам и нейтронного гамма-каротажа в интервалах энергий 3,9–4,9 МэВ и 6,4–6,8 МэВ. Оценить структуру поля. Выделить местное нормальное поле для каждой диаграммы каротажа, учитывая, что рудная залежь выделяется понижениями значения поля на диаграммах ННК и НГК.

Для каждой из наблюдаемых кривых вычислить значения общей среднеквадратической погрешности наблюдений σ_0 , среднеквадратической погрешности съемки σ_c и среднеквадратической погрешности геологических помех σ_g , используя для этого соотношения (4.14), (4.12), (4.13). Найти нижний аномальный предел для каждого вида ядерногеофизических измерений, используя для этого соотношение (4.8). Сопоставить уровень помех геологического происхождения с точностью геофизических наблюдений. Дать рекомендации о необходимой точности измерений в каждом методе и целесообразности увеличения точности для решения поставленной задачи.

По вычисленным значениям нижнего аномального предела выделить аномалии нейтронного и гамма-поля на диаграммах ННК и НГК. Дать геологическое истолкование выделенных аномалий.

5. Работа № 5. КОМПЛЕКСНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИИ КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ

5.1. Общие положения

Функция комплексного показателя (ФКП) применяется в тех случаях, когда объект исследований не создает устойчивых сигналов в полях разных методов, когда эти сигналы малы и сопоставимы с инструментальными и геологическими помехами. Способ предложен Г.С. Вахромеевым [1]. Суть способа заключается в составлении обобщенной функции комплексного показателя Q , которая представляет собой результат смещения сигналов разной природы, выраженных в цифровой форме.

Функция комплексного показателя служит для свертывания информации, полученной несколькими геофизическими методами, приведения наблюдений к уровню нормального поля, выделения слабых аномалий на фоне помех и разделения выявленных комплексных аномалий на перспективные и неперспективные.

Для определения ФКП необходимо предварительно перевести результаты всех частных методов в равнозначные безразмерные величины показателей контрастности γ . Показатель контрастности γ_{ji} j -го метода в i -ой точке подсчитывается по формуле

$$\gamma_{ji} = \frac{A_{ji} - \bar{A}_j}{S_j} \quad (5.1)$$

где γ_{ji} — показатель контрастности j -го метода в i -ой точке,

A_{ji} — значение j -го измеренного признака в i -ой точке профиля,

$\bar{A}_j$ — среднеарифметическое (фоновое) значение j -го признака,

S_j — стандарт j -го признака, который подсчитывается по формуле

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_{ji} - \bar{A}_j)^2}{n-1}} \quad (5.2)$$

где n — число измерений j -го признака по профилю.

Преимуществом использования понятия контрастности в виде (5.1), когда значения сигнала нормируются по стандарту, является то, что значения показателя контрастности δ_{ji} распределены по закону Гауса с нулевым средним $\overline{\delta_{ji}} = 0$ и единичным стандартом $S(\delta_{ji}) = 1$.

Вид функции комплексного показателя выбирается над эталонным объектом по материалам натурального моделирования или исходя из физико-геологической модели искомого объекта так, чтобы добиться максимальной контрастности аномалий ФКП над объектом при одновременном подавлении аномалий ФКП над объектами-помехами.

В зависимости от формы и знака аномалий отдельных методов различают четыре возможных случая.

1. Полезные сигналы частных методов имеют одинаковую форму и одинаковый знак. В этом случае

$$Q_i = \sum_{j=1}^P \delta_{ji} \quad (5.3)$$

где Q_i - значение функции комплексного показателя в точке i профиля,

P - количество частных методов,

δ_{ji} - значение j -го частного метода в i -ой точке профиля в безразмерных величинах показателя контрастности.

Примером для рассматриваемого случая могут служить аномалии Δg и ΔZ над вертикально намагниченным шаром с избыточной плотностью, которые имеют сходный вид.

2. Полезные сигналы частных методов имеют примерно одинаковую форму, но различны по знаку, тогда

$$Q_i = \sum_{j=1}^P |\delta_{ji}| \quad (5.4)$$

Примером может служить положительная гравитационная аномалия и отрицательная аномалия естественного поля над залежью медной руды.

3. Полезные аномалии имеют примерно одинаковую форму и знак, но для некоторых методов наличие сигнала - не положи-

Пример обработки сигналов при подсчете ФКП над обводненным контактом двух горных пород

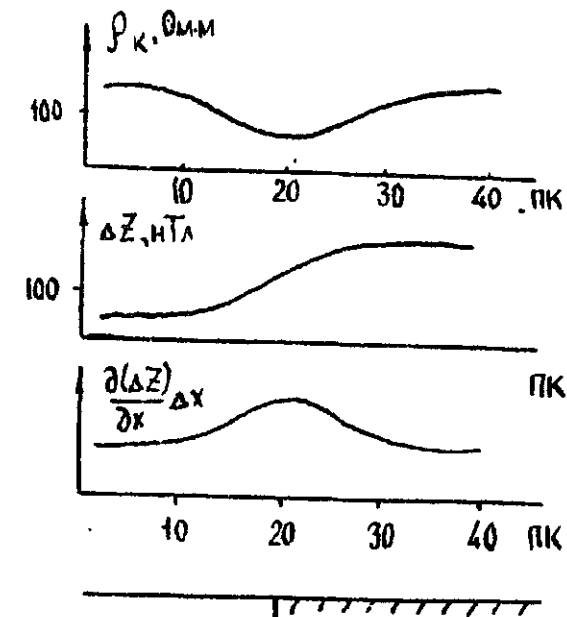


Рис. 5.1

тельный фактор контроля искомого объекта, а отрицательный. При этом

$$Q_i = \sum_{j=1}^p \gamma_{ji} - \sum_{k=1}^q \gamma_{ki} \quad (5.5)$$

где p и q — число методов, аномалии которых являются, соответственно, положительными и отрицательными факторами контроля искомого объекта. Например, при поисках сульфидных кобальто-пиритовых зон, положительные аномалии ΔZ являются фактором неперспективности оруденения, так как связаны с дайками диабазов. Перевод магниторазведки в разряд негативных факторов подчеркивает комплексную аномалию над кобальто-пиритовыми рудами и одновременно подавляет неперспективные ореолы кобальта над дайками диабазов, которые в рассматриваемом случае относятся к разряду помех.

4. Полезные сигналы различны по форме и знаку. В этом случае один из сигналов обрабатывается так, чтобы в результате обработки его вид был сходен с видом других сигналов.

Например, контакт двух горных пород выделяется по данным электроразведки (СЭП) минимумом.

По данным магниторазведки (ΔZ) аномалия имеет вид ступени, рис.5.1. Для получения сходных кривых достаточно результаты магниторазведки графически продифференцировать

$$\Delta Z'_x = \frac{d(\Delta Z)}{dx} \Delta x$$

а затем перейти к расчету ФКП по формуле, соответствующей второму случаю (5.4)

$$Q = |\gamma_{\rho x}| + |\gamma_{\Delta Z'_x}|$$

Другим примером может служить мощный намагниченный пласт с избыточной плотностью. Он выделяется по данным гравитационной разведки положительной аномалией Δg .

По данным магниторазведки (ΔZ) аномалия имеет несимметричный вид с двумя экстремумами, рис.5.2. Для получения сходного вида кривых из аномалии ΔZ следует выделить кривую арктангенса и после этого перейти к подсчету ФКП по формуле (5.3).

Пример обработки сигналов при подсчете ФКП над мощным наклонным вертикально намагниченным пластом с избыточной плотностью

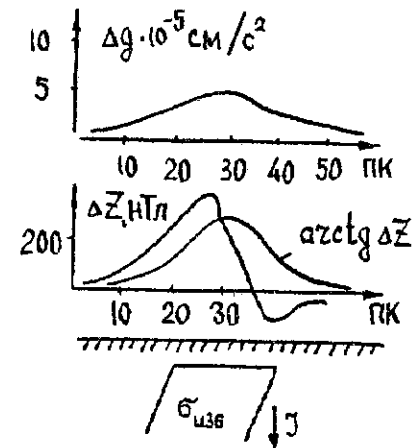
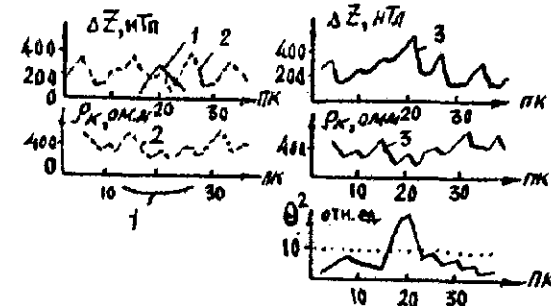


Рис. 5.2

Модельный пример использования ФКП в виде при поисках кимберлитовых тел в траппах /по Г.С.Рахмоеву/



1 — вид искомой аномалии от кимберлитовых тел,
2 — график помехи, 3 — суммарный сигнал аномалии и помехи

Рис. 5.3

$$Q = \chi_{ag} + \chi_{actg} \Delta Z$$

Учет знака полезных сигналов можно осуществить также с помощью ФКП, заданной в виде квадратов контрастностей отдельных методов. При этом подсчет ведется по формуле

$$Q_i^2 = \sum_{j=1}^m \chi_{ji}^2 - \sum_{k=1}^n \chi_{ki}^2 \quad (5.6)$$

где m и n — число методов, аномалии которых являются, соответственно, положительными и отрицательными факторами контроля искомого объекта.

Значимость результата оценивается по критерию χ^2 (хи-квадрат). При $Q^2 > \chi^2$ аномалия Q^2 значима.

Возможности методики задания ФКП в виде квадратов контрастностей отдельных методов рассмотрены на модельном примере, рис.5.3, где решается задача поисков кимберлитовых тел в трапах по данным магниторазведки (ΔZ) и электроразведки (ρ_k). Согласно физико-геологической модели кимберлитовой трубки над ней складывается положительная аномалия и пониженное значение ρ_k . В каждом из методов отмечаются интенсивные помехи, превосходящие по величине аномалию от кимберлитовой трубки. На графике суммарного поля полезный сигнал визуально не обнаруживается. Расчет функции комплексного показателя в виде Q^2 дает в центральной части профиля отчетливую аномалию, надежно превышающую предельную величину χ^2 -критерия, который при 2%-ном уровне значимости равен $\chi^2_{\alpha=0.02} = 9.8$. Аномалия ФКП в виде Q^2 позволяет локализовать местоположение кимберлитовой трубки.

Введем понятие показателя контрастности ФКП соотношением

$$\chi_{ai} = \frac{Q_i - Q_p}{S_Q} \quad (5.7)$$

где χ_{ai} — показатель контрастности ФКП в i -ой точке профиля, Q_i — значение ФКП в i -ой точке профиля, Q_p — фоновое значение ФКП, S_Q — стандарт ФКП.

Значимость аномалий ФКП оценивается по нижнему аномальному

пределу $Q_a = 3S_Q$, где S_Q — стандартное отклонение ФКП.

Для аномалий коррелированных по n точкам или профилям ($n \leq 9$) нижний аномальный предел можно снизить. Он будет равен $Q_a = 3\sqrt{m/n}$.

Преимуществом использования ФКП является то, что контрастность аномалий ФКП существенно превышает контрастность отдельных методов. Амплитуда аномалий ФКП складывается из амплитуд аномалий отдельных методов. Она пропорциональна числу методов m , т.е.

$Q \sim m$. Если значения сигналов отдельных методов представлены в виде показателей контрастности (5.1), то дисперсии их единичны, т.е. $D(\chi_1) = D(\chi_2) = D(\chi_3) = \dots D(\chi_m) = 1$, где m — число методов. При этом дисперсия ФКП для некоррелированных признаков будет равна

$$D_Q = \sum_{i=1}^m D(\chi_i) = m D(\chi_i) = m$$

Откуда следует

$$S_Q = \sqrt{m} \quad (5.8)$$

При подсчете ФКП показатели отдельных методов суммируются. Поскольку фоновые значения показателей контрастности отдельных методов равны нулю, то и сумма их равна нулю, т.е. фоновые значения ФКП равны нулю $Q_p = 0$.

При этом контрастность ФКП будет

$$\chi_Q = \frac{Q - Q_p}{S_Q} = \frac{m}{\sqrt{m}} = \sqrt{m} \quad (5.9)$$

Таким образом, контрастность аномалии ФКП в $\sqrt{m}$ раз больше, чем контрастность отдельных методов.

Например, обнаружен комплексный рудный ореол, содержащий медь, цинк и свинец. В условных единицах фоновые содержания свинца, цинка и меди составляют $Pb_f = 10$, $Zn_f = 20$, $Cu_f = 50$. Максимальные концентрации, соответственно, равны $Pb_{max} = 15$,

$Zn_{max} = 30$, и $Cu_{max} = 65$. Стандартные отклонения примем равными единице $S_{Cu} = S_{Zn} = S_{Pb} = 1$. Подсчитаем контрастность суммарного ореола, если показатели контрастности отдельных измерений подсчитываются по формуле (5.1).

В рассматриваемом случае максимальные значения показателей контрастности отдельных измерений будут

$$\gamma_{pe} = \frac{15-10}{1} = 5$$

$$\gamma_{zn} = \frac{30-20}{1} = 10$$

$$\gamma_{cu} = \frac{65-50}{1} = 15$$

Фоновые значения контрастностей отдельных измерений равны нулю. Максимальное значение ФКП суммарного ореола будет равно

$$Q_{max} = \gamma_{pe} + \gamma_{zn} + \gamma_{cu} = 5 + 10 + 15 = 30$$

Фоновое значение ФКП суммарного ореола равно нулю $Q_p = 0$. Стандартное отклонение ФКП суммарного ореола будет

$$S_Q = \sqrt{S_{pe}^2 + S_{zn}^2 + S_{cu}^2} = \sqrt{3}$$

При этом контрастность ФКП суммарного ореола равна

$$\gamma_Q = \frac{Q_{max} - Q_p}{S_Q} = 17$$

Таким образом, контрастность аномалии ФКП превышает значения контрастностей отдельных методов.

Контрастность аномалии ФКП можно повысить трансформацией исходных данных, например, подавлением высокочастотной помехи путем сглаживания методом среднего арифметического.

Если n число точек в сглаживающем окне, то вычисление скользящего среднего уменьшает дисперсию фона в n раз.

Действительно, контрастность сглаженной аномалии будет

$$\tilde{\gamma}_{ji} = \frac{A_{ji} - \bar{A}_j}{\tilde{S}_j} \quad (5.11)$$

где $\tilde{\gamma}_{ji}$ - сглаженные значения контрастности j -го метода в i -ой точке,

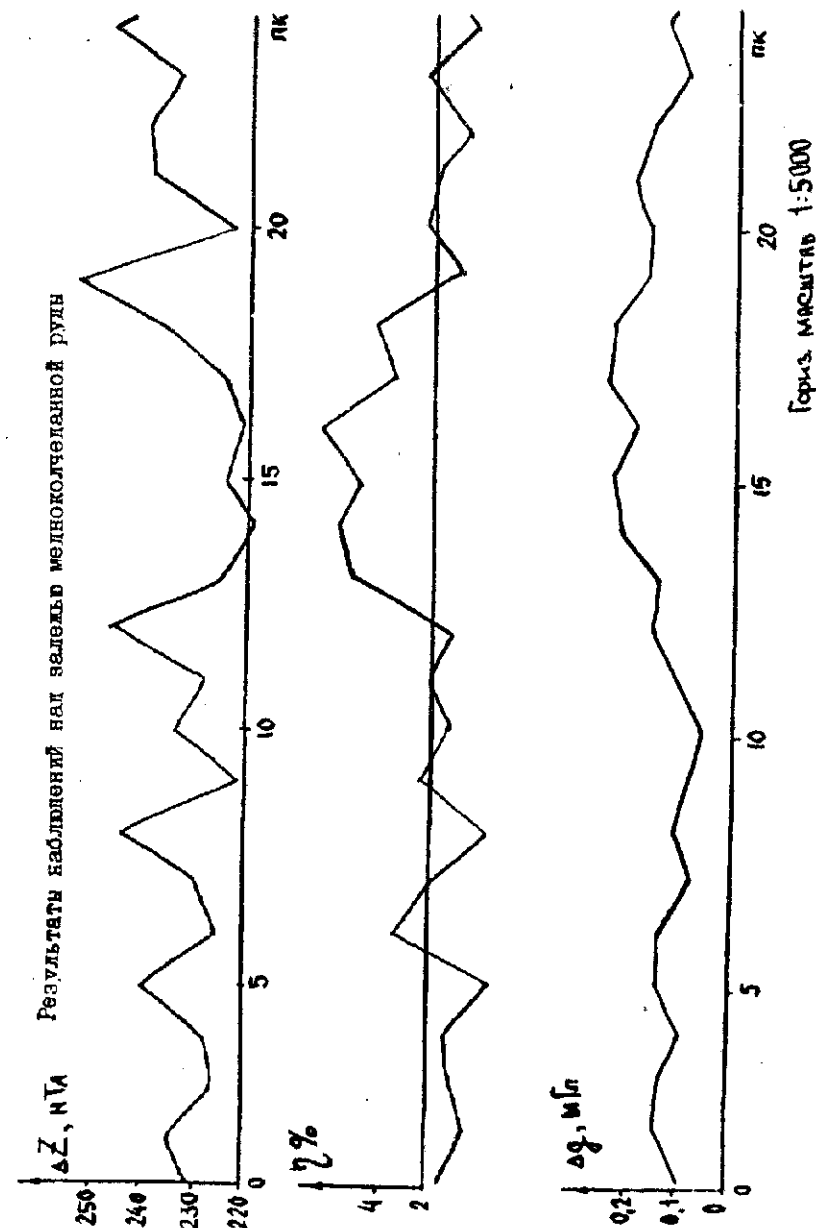


Рис. 5.4

$\tilde{S}_j$ - стандарт сглаженных значений контрастности, который связан со стандартом несглаженных значений соотношением

$$\tilde{S}_j = \frac{S_j}{\sqrt{n}} \quad (5.12)$$

Подставляя (5.12) в (5.11) находим

$$\tilde{S}_{ji} = S_{ji} \sqrt{n} \quad (5.13)$$

Таким образом, простое сглаживание измеренных значений по точкам повышает контрастность аномалии в $\sqrt{n}$ раз.

ЗАДАНИЕ

Определить на профиле местоположение вероятной залежи медноколчеданной руды путем вычисления ФКП. Полевые измерения проводились тремя методами: магнитометрией, гравиметрией и электрометрией (метод вызванных потенциалов). Результаты наблюдений изображены в виде графиков на рис.5.4 и приведены в таблице 5.1. Из значений Δg и ΔT предварительно была исключена региональная составляющая.

Требуется определить структуру ФКП, учитывая следующие физико-геологические условия. Залег медноколчеданной руды имеет форму круго-падающей линзы небольшой мощности до 15 метров в поперечнике, залегает внутри вулканогенной толщи и имеет первичный ореол сульфидной минерализации вдоль плоскости линзы. На участке залежи наблюдается повышение электропроводности и поляризуемости горных пород.

Руда представлена массивным медным и серным колчеданом. Минералы магнетита и пирротина в области залежи отсутствуют. Таким образом, зона рудной залежи характеризуется избыточной плотностью и относительным понижением магнитных свойств. Рудовмещающая толща покрыта рыхлыми осадками с переменной мощностью 10-20 м.

Необходимо вычислить значения показателя контрастности для каждого метода используя для этой цели данные таблицы 5.1. Оценить надежность выделения отдельных экстремумов наблюдаемых полей,

сравнив величины $(\Delta g_i - \Delta \bar{g})$, $(\Delta Z_i - \Delta \bar{Z})$ и $(\eta_i - \bar{\eta})$ со значениями тройного стандарта соответствующего метода. Экстремум можно считать надежной аномалией в том случае, если его амплитуда A превосходит величину тройного стандарта $A \geq 3\sigma$.

Определив структуру ФКП, подсчитать ее значение на всех пикетах профиля. Построить график ФКП по профилю. Указать на профиле положение предполагаемой залежи медноколчеданной руды, используя для оценки надежности выделения аномалии ФКП правило трех сигм. Для этого рассчитать и провести на профиле с результатами расчета ФКП линии тройного стандарта ФКП.

Таблица 5.1

Результаты наблюдения геофизических полей
по профилю на месторождении медных колчеданов

Пикеты	Значения $\Delta T, \text{ мГн}$		Значения $\Delta \rho, \text{ мГн}$		Значения $\rho, \%$	
	варианты		варианты		варианты	
	1	2	1	2	1	2
1	10	21	1,2	2,1	5	7
2	13	23	0,7	1,8	2	5
3	5	16	1,4	1,5	4	6
4	7	15	0,5	1,4	5	8
5	20	30	2,2	3,1	0	3
6	5	15	1,7	2,6	10	12
7	10	20	1,0	2,0	6	8
8	25	35	1,7	2,7	1	3
9	2	12	1,9	2,8	6	9
10	15	25	1,2	2,1	5	8
11	8	18	2,2	3,2	6	9
12	14	24	2,3	3,4	9	12
13	5	15	2,7	3,7	15	17
14	0	10	4,2	5,2	16	18
15	4	14	3,6	4,6	14	16
16	1	11	5,7	6,6	17	21
17	4	14	3,2	4,2	10	13
18	15	25	1,9	2,9	12	15
19	20	30	2,1	3,0	4	7
20	2	12	1,7	2,7	7	10
21	20	30	1,5	2,5	6	9
22	20	30	1,7	2,7	3	6
23	13	23	0,7	1,6	7	10
24	26	36	2,1	3,2	2	5
25	5	16	1,6	2,6	6	8
26	16	26	1,0	1,1	2	6
27	16	25	1,7	2,5	5	7

ЛИТЕРАТУРА

1. Комплексная интерпретация геофизических данных: учебное пособие / Ю. Б. Давыдов, А. Г. Талалай, И. Е. Шинкарьук. Урал. госуд. горный ун-т. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2018. – 128 с.
2. Сапожников В. М. Комплексирование геофизических методов: учебное пособие/ Уральский гос. горный ун-т. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2010. – 76 с.
3. Никитин А.А., Хмелевской В.К. Комплексирование геофизических методов: учебник. – М.: ВНИИГеосистем, 2012. – 346 с. Гриф УМО.
4. Долгаль А. С. Комплексирование геофизических методов: учебное пособие. – Пермь: Пермский гос. нац. исслед. ун-т, 2012. – 167 с.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

Проректор
комплексу



МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТА

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Специальность

21.05.03 Технология геологической разведки

Специализация

*Геофизические методы поиска и разведки месторождений
полезных ископаемых*

форма обучения: **очная, заочная**

Автор: Вандышева К. В., к.г.-м.н.

Одобрена на заседании кафедры

Геофизики

(название кафедры)

Зав.кафедрой

Талалай А. Г.

(Фамилия И.О.)

Протокол № 1 от 01.09.2022

(Дата)

Рассмотрена методической комиссией
факультета

Геологии и геофизики

(название факультета)

Председатель

Бондарев В.И.

(Фамилия И.О.)

Протокол № 1 от 13.09.2022

(Дата)

Екатеринбург
2022

Для выполнения контрольной работы необходимо проработать материалы, полученные в процессе проведения производственной практики, рекомендуемую литературу.

ВВЕДЕНИЕ

Во введении должна быть дана четкая формулировка задания: местоположение участка работ (административная, географическая и геологическая привязка), цель, задачи для составления физико-геологической модели исследования, по данным полученным в процессе прохождения производственной практики.

1. ГЕОГРАФО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЙОНА РАБОТ

Указывается административное положение района работ. Приводится краткая характеристика рельефа, климата, растительного и животного мира, населенности и путей сообщения, возможности найма рабочей силы на месте или их найма в другом районе. Приводится обзорная карта района работ. Этот раздел составляется по литературным источникам.

2. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА

Указывается геолого-структурное положение района работ.

Данный раздел содержит подразделы: “Стратиграфия”, “Магматизм”, “Тектоника”, “Геоморфология и гидрогеология”, “Полезные ископаемые”. В них приводятся краткие сведения по стратиграфии с указанием состава пород и их мощности, сведения об интрузивных образованиях, тектонике. Подробно описываются рудовмещающие комплексы, гидротермальные и метасоматические процессы, отмечаются рудоконтролирующие факторы. Особо отмечаются процессы метаморфизма, которые обуславливают изменение физических свойств горных пород.

В подразделе «Полезные ископаемые» приводится характеристика месторождений и рудопроявлений всех полезных ископаемых, встреченных в данном районе работ, отмечается их приуроченность к определенным комплексам пород, структурно-тектоническим и металлогеническим зонам. Выделяются полезные ископаемые, на которые площадь проектируемых работ является наиболее перспективной, и более подробно описываются месторождения, типичные для этого полезного ископаемого.

Необходимо уделить особое внимание анализу поверхностных рыхлых отложений, поскольку они могут иметь переменную мощность, неоднородны по составу и часто вносят существенные искажения в геофизические поля.

Текст необходимо иллюстрировать обзорной картой. На карте следует указать положение участка работ. Так же в данной главе необходимо привести один геологический разрез, который берется за основу составления Физико-геологической модели исследования.

3. ПЕТРОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА РАБОТ

На основании предоставленных с практики данных, геологических/геофизических отчетов прошлых лет, основываясь на справочные материалы дается характеристика по физическим свойствам горных пород.

Составляется упрощенная модель петрофизического разреза объекта исследований.

Физические свойства горных пород и полезных ископаемых района лучше описывать по их генетическим группам (осадочные, вулканогенно-осадочные, магматические и т. п.) Обязательно указываются источники, по которым приводятся данные по физическим свойствам, способы определения, представительность. Эти данные обычно приводят в виде таблицы. Если есть возможность, надо построить гистограммы или вариационные кривые и выполнить статистическую обработку. Наиболее наглядное представление о физических свойствах горных пород и полезных ископаемых дает диаграмма, которую надо обязательно построить. Для ее построения строится колонка, в которую включаются все горные породы района, и около нее – графики всех физических свойств.

Наличие различия физических свойств объекта и вмещающей среды еще не гарантирует возможности его обнаружения соответствующим геофизическим методом. Важное значение имеют и его геометрические параметры – форма, глубина от поверхности, элементы залегания, наличие мешающих геологических факторов (мощный слой приповерхностных рыхлых отложений, экраны из пород высокого сопротивления и т. д.). Поэтому для получения представления о возможностях геофизических методов необходимо дать комплексную **геолого-геофизическую характеристику объектов поисков**, включая их геометрические параметры, физические свойства и возможное влияние геологических помех.

4. ФИЗИКО ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной главе должна быть построена **физико-геологическая модель объекта поисков** и для нее выполнено решение прямой задачи. Для оценки глубинности методов в условиях района прямую задачу следует решить для нескольких положений эрозионного среза. Для характеристики возможностей методов хорошо также привести результаты наблюдений над реальными объектами. Желательно также построить физико-геологические модели для объектов, которые будут затруднять интерпретацию результатов (вызывать искажения, похожие на аномалии от объектов поисков или, маскировать их).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итогом раздела являются выводы о возможностях каждого геофизического метода в условиях района проектируемых работ

ЛИТЕРАТУРА

В данной главе описывается список использованной литературы при выполнении работы.

ОСОБЫЕ УКАЗАНИЯ

По мере написания контрольной работы расставляются ссылки на литературу (в квадратных скобках в конце цитируемого текста [1], что соответствует номеру в списке литературы)

В конце каждой главы должна быть дана самостоятельная оценка приведенной в главе информации.

В работе обязательно излагается цель проекта, задачи (введение), описывается теория, приведена характеристика, рассматриваются примеры, если нужно приво-

дится сравнительная характеристика, излагается самостоятельный анализ материала, сделаны выводы (заключение)

Работа выполняется шрифтом Times New Roman (12 ил 14) отступы с каждой стороны по 2 см, 1 см на “красную строку”.

Рисунки располагаются после упоминания в тексте (рис.1):



Рис.1. Название рисунка

Таблицы располагаются после упоминания в тексте (табл.2)

Таблица 2

Название таблицы
