

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, профессора **Кутепова Юрия Ивановича** на диссертационную работу **Пригары Андрея Михайловича** «НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗА УСТОЙЧИВОСТИ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ СОЛЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.6.7. Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

Представленная диссертация изложена на 322 страницах машинописного текста, состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы из 324 источников, содержит 129 рисунков и 8 таблиц. Автореферат диссертации содержит 40 страниц машинописного текста, 16 рисунков и 6 таблиц.

Актуальность темы исследования.

Диссертационная работа Пригары А.М. посвящена решению одной из ключевых проблем горной науки и практики – обеспечению устойчивости природно-технических систем (ПТС) при подземной разработке соляных месторождений. Проблема имеет не только научное, но и социально-экономическое значение. Автором справедливо отмечается, что в мире потеряно более 80 соляных рудников, два из которых – на Верхнекамском месторождении. При этом причины аварий часто устанавливались постфактум, а существующие нормативные требования, несмотря на их строгое исполнение, не позволяют с достаточной точностью прогнозировать активизацию опасных геологических процессов. Это связано, в первую очередь, с недостаточной детальностью инженерно-геологических моделей и неэффективностью систем мониторинга безопасности формирования и функционирования горнопромышленных природно-технических систем.

В связи с этим, разработка научно-методических основ, опирающихся на высокоразрешающие геофизические методы изучения геологической среды для получения объективной и детальной информации о ее строении и свойствах, представляет собой безусловно актуальную научно-техническую задачу. Особую значимость она приобретает на фоне истощения запасов на участках с простым геологическим строением и вынужденного перехода к освоению более сложных объектов, где риски возникновения аварийных ситуаций возрастают многократно. Предложенный автором подход, интегрирующий инженерную геологию и высокоразрешающую шахтную сейсморазведку, является своевременным и востребованным.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций.

Первое защищаемое научное положение – *создан и научно обоснован новый метод инженерно-геологических исследований – шахтная сейсморазведка на поперечных волнах с*

разделением отражений (ПВРО), базирующийся на выявленных закономерностях распространения упругих волн в условиях полного пространства. Метод включает согласованные методики полевых работ и камеральной обработки, обеспечивающие выделение отражений от геологических границ с разрешающей способностью до 1–2 м, и позволяет оперативно получать детальные структурные, тектонические и физико-механические характеристики массивов горных пород, взаимодействующих с подземными сооружениями.

Доказательство первого научного положения приводится во второй главе диссертации и в соответствующем разделе автореферата, где в полной мере и логично раскрываются результаты численного и физического моделирования волновых полей в условиях полного пространства. Обоснование базируется на большом объёме теоретических расчётов, выполненных в программных комплексах Ansys, Tesseral и FS, а также на натурных экспериментах (одноуровневых и разноуровневых) применительно к условиям соляных месторождений. Показано, что стандартные методики шахтной сейсморазведки не обеспечивают необходимой детальности, а разработанный метод ПВРО с двухлинейной системой возбуждения и специальным математическим аппаратом обработки данных позволяет надёжно разделять отражения из верхнего и нижнего полупространств. Обоснованность подтверждается созданным программно-алгоритмическим комплексом (12 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ), патентом на изобретение и результатами промышленного опробования.

Второе защищаемое научное положение – *разработаны инженерно-геологические модели природно-технических систем соляных месторождений, основанные на трёхстадийной технологии построения: по данным бурения, с привлечением данных горных выработок и с использованием метода шахтной сейсморазведки ПВРО. Модели учитывают геологическое строение, геоморфологические признаки и выделяют структурные элементы по различиям в упругих свойствах горных пород, что позволило выявить и включить в модели ранее неизвестные для Верхнекамского месторождения каньонообразные эрозионные врезы, и уточнить морфологию инверсионного рельефа.*

Обоснование второго научного положения приведено в третьей главе диссертации и в соответствующем разделе автореферата. Обоснованность достигается комплексным анализом геолого-геофизической информации, полученной на всех трёх этапах построения моделей. На первом этапе использованы данные поверхностного бурения, на втором – результаты проходки горных выработок, на третьем – данные шахтной сейсморазведки ПВРО. Автором выполнено геомеханическое обоснование природы эрозионных врезов на основе расчётов радиальных и окружных деформаций для модели изгиба пластины, что позволило подтвердить гипотезу об их генезисе и связать их с инверсионным рельефом и зонами

замещения. Достоверность моделей подтверждена сопоставлением с контрольным бурением и маркшейдерскими наблюдениями.

Третье защищаемое научное положение – *установлены закономерности распределения инженерно-геологических характеристик разреза – наличия гипсово-глинистой шпалы, угла падения крыльев поднятия, мощности ритмопачек и покрывающей каменной соли, расстояния от оси поднятия, и их связь с риском возникновения опасных геологических процессов в водозащитной толще. С учётом выявленных закономерностей выполнено районирование территории по риску наличия эрозионных врезов и инверсионного рельефа, а также сформирована классификация состояний природно-технической системы по комплексу геолого-геофизических признаков. На этой основе создана формализованная методика анализа инженерно-геологического состояния и прогноза гидрогеологических свойств ВЗТ для повышения безопасности эксплуатации подземных сооружений.*

Обоснование третьего научного положения приведено в четвертой главе диссертации и в соответствующем разделе автореферата. Обоснованность базируется на статистическом анализе взаимосвязей структурных параметров с наличием опасных процессов, выполненном по данным более 1000 скважин. Автором предложены количественные нормированные признаки (литологические, структурные, морфологические) и итоговый показатель риска P , что позволило выполнить районирование ВКМС. Кроме того, проведён атрибутивный анализ сейсмических записей (по 10 атрибутам), выявлены сейсмические критерии, реагирующие на аномалии выходом за пределы 2σ . На основе этих данных разработана двухуровневая классификация состояний ПТС (сначала по геолого-горнотехническим параметрам, затем с учётом геофизических признаков), которая верифицирована на фактических участках ведения горных работ. Достоверность обеспечивается широкой апробацией на действующих рудниках и сопоставлением с известными аварийными ситуациями.

Четвёртое защищаемое научное положение – *разработана методика детального сейсмического анализа и мониторинга состояния геотехнических массивов с заданными прочностными, деформационными и гидроизолирующими характеристиками (гидроизолирующих целиков) на основе адаптированного для горизонтальной плоскости метода шахтной сейсморазведки ПВРО с регистрацией продольных и поперечных волн. Методика обеспечивает оценку, мониторинг и прогноз состояния целиков по комплексу характеристик: ширина, упругие константы (коэффициента Пуассона, модулей упругости и сдвига), предел прочности на сжатие и степень нагружения.*

Обоснование четвёртого научного положения приведено в четвёртой главе диссертации и в соответствующем разделе автореферата. Обоснованность достигается адаптацией метода ПВРО для горизонтальной плоскости с использованием двух типов волн

(продольных и поперечных), что позволяет рассчитывать упругие константы и через корреляционные связи переходить к пределу прочности на сжатие и степени нагружения целика. Методика включает мониторинговые циклы (исходный и текущие), сравнение моделей, прогноз изменений по линейной регрессии до заданного периода (до 2050 года). Достоверность подтверждена многолетними (5-летними) наблюдениями на реальном гидроизолирующем целике, где зафиксировано уменьшение ширины на 9 м и выполнена прогнозная оценка до предельно допустимых значений. Результаты прошли верификацию маркшейдерскими данными и внедрены в производственный процесс на рудниках ВКМС.

В целом обоснованность и достоверность полученных результатов подтверждается комплексным использованием современных методов исследований, включая численное моделирование в программных комплексах Ansys, Tessleral, FS и физическое моделирование реальных горногеологических условий. Автором выполнен значительный объем натурных экспериментов, результаты которых сопоставлены с данными моделирования.

Особо следует отметить высокую степень достоверности, обеспечиваемую сравнением результатов шахтной сейсморазведки с данными контрольного бурения и маркшейдерских наблюдений на промышленных объектах. Коэффициенты корреляции между структурными построениями по сейсмическим данным и по данным горных выработок близки к единице, что подтверждает высокую точность предложенного метода. Солидная апробация результатов на международных и всероссийских конференциях, а также внедрение разработок в производственный процесс АО «ВНИИ Галургии» и других организаций свидетельствуют о практической обоснованности выводов.

Анализ публикационной активности и полноты отражения в публикациях основных научных результатов.

Публикационная активность соискателя *в полной мере соответствует* требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям. Основные научные результаты:

- отражены в достаточном количестве рецензируемых публикаций (23 в ВАК, 19 в Scopus);
- защищены патентами и свидетельствами на программы для ЭВМ;
- прошли широкую апробацию на международных и всероссийских конференциях;
- обобщены в монографии.

Таким образом, можно констатировать, что *все четыре защищаемых научных положения* обеспечены публикационной базой, а их содержание раскрыто в печатных работах с необходимой для докторской диссертации полнотой и глубиной.

Научная новизна. Научная новизна работы, по моему мнению, является бесспорной и заключается в следующем:

)

1. Предложен принципиально новый метод шахтной сейсморазведки (ПВРО). Автором впервые для соляных месторождений создан и научно обоснован метод шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений. Новизна заключается в комплексном решении проблемы: обоснована оптимальная ориентация источника и приемников, разработана двухлинейная система возбуждения для разделения отражений из разных полупространств, создан математический аппарат для подавления их интерференции. Достигнутая детальность (1–2 м) ранее считалась недостижимой для шахтных условий.

2. Выявлен новый опасный геологический процесс. Работа содержит принципиально новое для Верхнекамского месторождения открытие – каньонообразные эрозионные врезы. Автором не только идентифицирован данный феномен, но и создана геолого-геомеханическая модель его возникновения, объясняющая связь с трещинами отрыва в сводах соляных поднятий и последующим выщелачиванием.

3. Разработаны новые типы инженерно-геологических моделей. Впервые для ПТС соляных месторождений предложена трехстадийная технология построения моделей, включающая в качестве финального этапа данные высокоразрешающей сейсморазведки. Это позволило не только детализировать известные структуры (инверсионный рельеф), но и включить в модели ранее неизвестные элементы (эрозионные врезы).

4. Установлены количественные закономерности и созданы методики районирования. Автором впервые установлены количественные связи между структурными параметрами (наличие поднятия, мощность ритмопачек, угол падения и др.) и риском возникновения опасных процессов, что позволило создать формализованную методику районирования территории и классификацию состояний ПТС по геолого-геофизическим признакам.

5. Разработана методика мониторинга гидроизолирующих целиков. Впервые разработана комплексная методика оценки состояния целиков, основанная на мониторинге геометрических и упругих характеристик массива с использованием метода ПВРО, адаптированного для горизонтальной плоскости, с последующим переходом к прочностным характеристикам и прогнозу степени нагружения.

Практическая значимость результатов. Практическая значимость работы высока. Разработанные научно-методические основы и методики позволяют повысить безопасность строительства и эксплуатации подземных сооружений, что подтверждается актами внедрения в производственный процесс. Ключевые практические результаты включают:

- внедрение метода шахтной сейсморазведки ПВРО, обеспечивающего детальное изучение ВЗТ и целиков с разрешающей способностью до 1–2 м (патент РФ) в деятельность проектных и производственных организаций.

- разработку программного обеспечения (12 свидетельств о регистрации), используемого для обработки данных, моделирования и районирования.

- учет новых геологических данных (эрозионные врезы, зоны замещения, уточненная структура ВЗТ) при проектировании горных работ и ликвидации участков шахтных полей.

- значительный экономический эффект, который автор обосновывает предотвращением потерь запасов (страховой эффект от потери одного рудника автор оценивает в сотни миллиардов рублей) и повышением производительности полевых сейсморазведочных работ в 2,6 раза.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Полученные в диссертационной работе результаты рекомендуется использовать при проектно-изыскательской и производственной деятельности на участках эксплуатационной разведки и разработки месторождений солей, в том числе при организации и выполнении оценки, прогноза и мониторинга водозащитной толщи и целиков различного назначения, а также при осуществлении научной и образовательной деятельности.

Замечания по работе. При общей высокой оценке диссертационной работы, считаю необходимым высказать следующие замечания и вопросы для дискуссии:

1. Методика экспериментальных работ. В диссертации приведены результаты натурных экспериментов с применением различных типов креплений сейсмоприемников. Вместе с тем в тексте не отражена процедура отбраковки результатов, полученных при использовании стандартных и нестандартных (прижимных, штыревых) креплений. Кроме того, отсутствуют сведения о частотных характеристиках применявшихся датчиков и их соответствии заявленному частотному диапазону регистрации (до 1700 Гц). Также недостаточно полно описана процедура синхронизации сигналов при двухлинейной системе возбуждения.

2. Обоснование выбора окна атрибутного анализа. В диссертации не обоснован выбор окна 10–20 мс с позиции соотношения временного разрешения и стабильности спектральных оценок. Не показано влияние варьирования длины окна (например, 5–30 мс) на чувствительность атрибутов к эрозионным врезам и инверсионному рельефу. Отсутствие обоснования снижает воспроизводимость методики.

3. По методике районирования (Глава 4). В работе предлагается формализованный показатель риска наличия опасных процессов (Р), основанный на суммировании нормированных признаков. Однако, насколько мне известно, различные признаки (например, наличие ГГШ, угол падения, мощность ПКС) имеют различную прогностическую значимость.

Автор применяет равновесовой подход (среднее арифметическое), что может приводить к занижению или завышению итогового риска в зависимости от конкретной геологической ситуации. Считаю необходимым пояснить, чем обусловлен выбор равных весов для всех признаков, и рассматривался ли вариант применения корреляционных или экспертных весов для повышения объективности районирования.

4. Переход от динамических модулей упругости к статическим (Глава 5). Для корректировки динамического модуля использована корреляционная зависимость между скоростью продольной волны и статическим модулем по данным лабораторных испытаний. Желательно уточнить характеристики выборки (количество образцов, разброс данных, литологические разности), а также учесть возможное влияние масштабного эффекта при переносе результатов с образцов на массив.

5. По методике ввода поправок за рельеф выработок. В графе обработки данных присутствует процедура ввода поправок за рельеф выработки в глубинном масштабе. Однако при наличии интенсивной складчатости и сложной геометрии кровли выработки, использование интерполяции рельефа с шагом точек ОГТ может привести к искажениям, особенно если выработка имеет значительные локальные неровности. Прошу уточнить, какова погрешность ввода данных поправок и как она влияет на конечную точность структурных построений в условиях высокой складчатости.

6. Терминологический аппарат. Автором определены ключевые понятия, однако в Главе 3 вводится «геофизическая модель» как промежуточный конструкт между данными сейсморазведки и инженерно-геологической моделью. Для устранения терминологической неопределённости желательно эксплицировать различия между этими моделями и их функциональную роль в оценке устойчивости ПТС.

7. Прогноз состояния гидроизолирующих целиков. Линейная регрессия по 5-летнему ряду, вероятно, обусловлена ограниченностью данных, однако для обоснованной экстраполяции до 2050 г. необходимо прояснить: применимость линейного приближения к ползучести солей, учёт влияния соседних панелей, доверительные интервалы и критические пороги деформаций, сигнализирующие о риске.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.

Диссертационная работа **Пригары Андрея Михайловича** является завершённой научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены научно обоснованные технические и технологические решения - разработаны научно-методические основы оценки и прогноза устойчивости природно-технических систем при подземной разработке соляных месторождений. Работа имеет важное

научное и практическое значение для повышения безопасности горных работ и сохранности запасов полезных ископаемых. Основные научные положения, выводы и рекомендации являются обоснованными и достоверными, опубликованы в изданиях, рекомендуемых ВАК либо цитируемых в SCOPUS. Высказанные замечания носят дискуссионный характер и не снижают высокой научной ценности и практической значимости диссертации.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.6.7 Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение, и требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Пригара Андрей Михайлович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 1.6.7. Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение.

Официальный оппонент,

профессор, доктор технических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией гидрогеологии и экологии Научного центра геомеханики и проблем горного производства Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

Кутепов Юрий Иванович

04 сентября 2026 г

Почтовый адрес: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д. 2. Тел.: +7 (812) 321-8440, +7 (921) 937-01-88, Факс: +7(812)321-81-43, +7(812)321-81-43; E-mail: Kutepov_YuI@pers.spmi.ru, koutepovy@mail.ru

Я, Кутепов Юрий Иванович, даю своё согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку

_____ Кутепов Юрий Иванович

Подпись Кутепова Юрия Ивановича удостоверяю: