



**Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации**
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ГЕОФИЗИКИ им. Ю. П. Булашевича
Уральского отделения Российской академии наук
(ИГФ УрО РАН)

620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, д.100,
тел. (343) 2678868, 2678888, факс (343) 2678872
E-mail: igfuroran@mail.ru

ИНН 6661000392 / КПП 667101001
ОГРН 1036603981919 / ОКВЭД 72.19
ОКПО 04683384 / БИК 046577001

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ФГБУН «Институт геофизики
им. Ю.П. Булашевича» Уральского
отделения Российской академии наук,
к.г.-м.н. _____ Козлова И.А.
« ____ » _____ 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу **Пригара Андрея Михайловича**

«Научно-методические основы оценки и прогноза устойчивости природно-технических систем при подземной разработке соляных месторождений», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности
1.6.7 Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

Актуальность исследований

Обеспечение устойчивости природно-технических систем (ПТС), включающих подземные сооружения и взаимодействующий с ними инженерно-геологический массив соляных месторождений, является одной из ключевых проблем современной инженерной геологии и горного дела. Мировая практика разработки соляных месторождений насчитывает массу примеров аварийного затопления рудников, два из которых произошли на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей (ВКМС). Причинами этих аварий, как правило, становилось недостаточное изучение инженерно-геологических условий, в первую очередь – строения и состояния водозащитной толщи (ВЗТ) и гидроизолирующих целиков.

Существующие нормативные требования к проведению геологоразведочных работ и инженерных изысканий, не позволяют с достаточной детальностью и достоверностью прогнозировать активизацию опасных геологических процессов, ни на стадии разведки, ни на стадии эксплуатации месторождения. В связи с этим, разработка научно-методических основ инженерно-геологической оценки и прогноза устойчивости ПТС на базе высокоразрешающих геофизических методов является актуальной научной проблемой, имеющей важное народно-хозяйственное значение.

Диссертационная работа Пригара А.М. посвящена решению этой проблемы. Автор предлагает новый методологический подход, основанный на использовании высокоразрешающей шахтной сейморазведки на поперечных волнах с разделением отражений (ПВРО), что позволяет существенно повысить детальность и достоверность инженерно-геологических моделей и обеспечить эффективный мониторинг состояния критических элементов ПТС.

Структура работы и основные научные результаты

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 324 наименований и одного приложения. Общий объем работы составляет 322 страницы машинописного текста, включая 129 рисунков и 8 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, определены объект и предмет исследований, изложена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, представлены защищаемые положения.

В первой главе рассмотрены общие сведения о Верхнекамском месторождении солей как типичном объекте для изучения ПТС при подземной разработке соляных месторождений. Диссертантом выполнен анализ инженерно-геологических условий месторождения, включая характеристику водозащитной толщи, внутрисоляных деформаций, инверсионного рельефа, эрозионных врезов и зон замещения. На основе этого анализа автором предложена и обоснована модель ПТС «инженерно-геологический массив – подземные сооружения» (ПТС «ИГМ–ПС») с выделением детального и обобщенного уровней. Особое внимание уделено области взаимодействия элементов системы, включающей ВЗТ и продуктивные пласты. Разработана классификация сценариев развития состояния ПТС в зависимости от наличия и эффективности контроля за инженерно-геологическими условиями. Показано, что наиболее предпочтительным является предупредительный подход, предполагающий контроль на стадии геологоразведки и проектирования, что позволяет исключить неконтролируемый переход ПТС в неустойчивое и критическое состояния.

Во второй главе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по созданию высокоразрешающего метода шахтной сейсморазведки ПВРО. В рамках численного моделирования в программах Ansys, Tesserai и FS автором установлены базовые закономерности распространения упругих волн в условиях полного пространства. Показано, что в соляной толще на продольных волнах получить отражения от геологических границ практически невозможно, тогда как поперечные волны обеспечивают высококонтрастные отражения с разрешающей способностью до 1–2 м. Определены оптимальные параметры систем наблюдения (шаг ППр – 2 м, шаг ПВ – 4 м, количество каналов – 64 и более). На основе натурных экспериментов, включающих просвечивание между выработками и профильные исследования с различными сочетаниями ориентации источников и приемников, подтверждены выводы численного моделирования. Установлено, что направленность источника S-волн типа «сосредоточенная сила» перпендикулярна оси приложения нагрузки. Разработаны конструкции креплений сейсмоприемников, обеспечивающие надежную регистрацию сигнала. На основе полученных закономерностей предложен и обоснован метод ПВРО, включающий две линии возбуждения, что позволяет разделять отражения, приходящие из разных полупространств. Разработан математический аппарат разделения отражений, основанный на вычитании волновых полей со сдвигом. Создан программный комплекс (12 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ) для реализации метода на всех этапах – от полевых работ до построения геофизических моделей.

В третьей главе рассмотрены вопросы построения инженерно-геологических моделей ПТС. Автором предложена трехстадийная технология построения моделей: на основе данных бурения, с привлечением данных горных выработок и с использованием метода ПВРО. Показано, что только третий этап позволяет выявить такие опасные процессы, как каньонообразные эрозионные врезы, которые ранее не были известны на ВКМС. Выполнено геолого-геомеханическое обоснование природы эрозионных врезов. На основе расчетов деформаций изгиба слоев в сводах соляных поднятий показано, что возникающие деформации (до 1,5–1,8%) превышают предельные деформации растяжения для солей (0,032–0,35%), что приводит к образованию трещин отрыва, которые впоследствии расширяются за счет растворения. Разработана динамическая модель

формирования эрозионных врезов и инверсионного рельефа, включающая стадии от образования трещин до формирования глинисто-гипсовой шляпы. На примере района Харюшинского поднятия показано, что применение метода ПВРО позволило существенно уточнить структурные построения и выявить зоны замещения карналлитов.

В четвертой главе представлены результаты районирования ВКМС по риску возникновения опасных геологических процессов. Автором выявлены закономерности распределения инженерно-геологических характеристик разреза, коррелируемые с наличием эрозионных врезов и инверсионного рельефа. К таким характеристикам отнесены: наличие гипсово-глинистой шляпы, угол падения крыльев поднятия, мощность ритмопачек и покровной каменной соли, расстояние от оси поднятия. На основе этих признаков разработана формализованная методика вычисления показателя риска R , учитывающего литологический, структурный и морфологический факторы. Предложена классификация состояний ПТС по комплексу геологических и горнотехнических параметров, включая степень нагружения целиков, мощность ВЗТ и наличие аномалий. Для повышения объективности классификации автором выполнен атрибутный анализ сейсмических данных. Установлено, что такие атрибуты, как пиковая частота, спектральный центроид, спектральная энергия, ширина спектра, кажущаяся частота, среднеквадратическая амплитуда, максимальная амплитуда, средняя амплитуда, отношение сигнал/шум и сдвиг трасс, по-разному реагируют на наличие эрозионных врезов и инверсионного рельефа, проявляясь выходом за пределы 2σ . На основе этого разработана классификация физического состояния ПТС с учетом геолого-геофизических признаков и выполнено районирование ВКМС, выделены участки с устойчивым, неустойчивым и критическим состоянием ПТС.

В пятой главе изложена методика оценки и прогноза состояния гидроизолирующих целиков. Автором разработаны двумерная и трехмерная модели растворения целиков при заполнении подземных сооружений рассолами, учитывающие гравитационную дифференциацию рассолов. На основе численного моделирования в ANSYS и натурных экспериментов показана принципиальная возможность использования шахтной сейсморазведки для контроля ширины и физических свойств целиков. Адаптирован метод ПВРО для работы в горизонтальной плоскости с регистрацией как продольных, так и поперечных волн. Разработана методика комплексного мониторинга гидроизолирующих целиков, включающая структурную модель (карта ширины), атрибутную модель (распределение скоростей и суммарного сейсмического атрибута) и физико-механическую модель (расчет коэффициента Пуассона, модулей упругости и сдвига). Предложен подход к переходу от динамических модулей упругости к статическим на основе корреляционных зависимостей, полученных ранее для солей ВКМС. Разработана модель оценки состояния целика по пяти характеристикам: ширина, признаки нарушения сплошности, степень нагружения, предел длительной прочности и поступление воды. На примере одного из гидроизолирующих целиков показана возможность прогноза изменения его параметров на основе мониторинговых данных.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты работы, даны рекомендации по их практическому использованию. Автореферат и опубликованные работы (в т.ч. 23 – в изданиях, рекомендованных ВАК, 19 – в изданиях, цитируемых в Scopus, 4 патента на изобретение, 12 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ, 1 монография) полностью отражают основное содержание диссертационной работы. Основные научные положения докладывались на многочисленных международных и всероссийских конференциях.

Научная новизна исследований заключается в следующем:

1. Впервые применительно к соляным месторождениям разработаны научно-методические основы инженерно-геологической оценки и прогноза устойчивости ПТС на базе бурения, горнопроходческих работ и высокоразрешающей шахтной сейсморазведки.

2. Разработан и научно обоснован новый высокоразрешающий метод шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений (ПВРО), включающий обоснование оптимальной ориентации источника и приемников, двухлинейную систему возбуждения и математический аппарат разделения отражений. Новизна метода подтверждена патентом на изобретение РФ.

3. Получены новые сведения об инженерно-геологических условиях соляных месторождений: впервые выявлены каньонообразные эрозионные врезы на ВКМС, установлены критерии их идентификации, создана динамическая модель их возникновения.

4. Разработаны инженерно-геологические модели ПТС, учитывающие геологическое строение, геоморфологические признаки и тектоническую структуру с выделением структурных элементов по различиям в упругих свойствах пород.

5. Установлены количественные закономерности влияния структурных параметров на риск возникновения опасных процессов, что позволило создать формализованную методику оценки характеристик геологического разреза.

6. Создана технология анализа и прогноза состояния гидроизолирующих целиков на основе мониторинга их геометрических и инженерно-геологических характеристик с использованием метода ПВРО в горизонтальной плоскости.

Практическая значимость и реализация полученных результатов

Разработанные научно-методические основы и базирующиеся на них методики позволяют выполнять оценку и прогноз устойчивости ПТС с целью повышения безопасности строительства и эксплуатации подземных сооружений при подземной разработке соляных месторождений.

Основные практические результаты:

- создан и внедрен в производственный процесс метод шахтной сейсморазведки ПВРО, обеспечивающий детальное изучение геологического строения ВЗТ и состояния гидроизолирующих целиков с разрешающей способностью до 1–2 м;

- разработанное программное обеспечение (12 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ) используется при обработке и интерпретации данных шахтной сейсморазведки, численном моделировании и районировании;

- полученные новые геологические сведения (эрозионные врезы, характеристики внутрисоляных деформаций, зон замещения и инверсионного рельефа) учтены при построении инженерно-геологических моделей участков ВКМС, проектировании горных работ, разведке и доразведке месторождения;

- разработанные методики и классификации состояний ПТС позволяют обоснованно выделять участки с недопустимым риском активизации опасных процессов и своевременно корректировать проектные решения;

- производительность полевых сейсморазведочных работ методом ПВРО выше в 2,6 раза по сравнению со стандартными методиками.

Результаты диссертационной работы внедрены в практику деятельности ряда организаций, включая ПАО «Уралкалий», АО «ВНИИ Галургии», ФГАОУ ВО «ПНИПУ», ФГАОУ ВО «ПГНИУ» и др., что подтверждено соответствующими актами и справками о внедрении (приложение 1 к диссертации). Разработанные методики используются при проектировании, строительстве и эксплуатации подземных сооружений на рудниках ВКМС.

Основные научные положения и практические решения диссертационной работы рекомендуется использовать в учебном процессе при подготовке специалистов по направлениям «Инженерная геология», «Геофизика» и «Горное дело».

Обоснованность основных положений диссертации

Результаты исследований соискателя базируются на обширном фактическом материале, полученном в ходе 28-летней научно-производственной деятельности автора. Используются данные бурения более 1000 скважин, результаты проходки горных

выработок, материалы шахтных сейсморазведочных работ, выполненных методом ПВРО. В процессе исследований применялось современное программное обеспечение (Ansys, Tesseral, FS) для численного моделирования, а также разработанный автором программный комплекс для обработки и интерпретации данных. Достоверность результатов подтверждена сопоставлением теоретических и натурных данных, заверкой результатов бурением и маркшейдерскими наблюдениями на промышленных объектах, в том числе при изучении участков утраты целостности ВЗТ и гидроизолирующих целиков.

Основные замечания по диссертации

По диссертационной работе Пригара А.М. имеются следующие замечания:

1. При описании методики прогноза состояния гидроизолирующих целиков автор использует корреляционные зависимости между скоростями упругих волн и прочностными характеристиками, полученными другими исследователями. В работе не приведены собственные результаты лабораторных определений физико-механических свойств пород, что несколько снижает обоснованность перехода от динамических параметров к статическим. Было бы целесообразно представить результаты хотя бы выборочных определений для подтверждения применимости используемых корреляций к условиям конкретных объектов.

2. В третьей главе при обосновании природы эрозионных врезов автор использует геомеханические расчеты для упругих слоев. Однако соляные породы обладают ярко выраженными реологическими свойствами, и их деформации во времени могут существенно отличаться от упругих. В работе не приведено обоснования применимости упругой модели для оценки деформаций, происходящих в геологическом масштабе времени. Желательно было бы обсудить влияние ползучести на формирование трещин отрыва.

3. В четвертой главе при районировании территории по риску наличия опасных процессов автор использует данные по значительному количеству скважин. Однако литологические колонки по этим скважинам не приведены. Было бы целесообразно привести данные по характерным скважинам, по которым можно было бы проследить защищаемые в третьем положении закономерности распределения инженерно-геологических характеристик разреза.

4. В работе приведены результаты мониторинга гидроизолирующего целика за четыре года, показавшие уменьшение его ширины на 9 м. При этом не обоснована и не указана периодичность наблюдений и не приведены данные о точности определения ширины на каждом этапе. Это затрудняет оценку достоверности выявленных изменений. Желательно было бы представить результаты многократных определений с оценкой погрешности.

Сделанные замечания не снижают общей ценности выполненных автором исследований, носят рекомендательный характер и не влияют на основные научные результаты, представленные в диссертации.

Общая оценка диссертационной работы

Диссертация Пригара Андрея Михайловича представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором теоретических, экспериментальных и натурных исследований разработаны научно-методические основы оценки и прогноза устойчивости природно-технических систем при подземной разработке соляных месторождений. Автором создан и научно обоснован новый высокоразрешающий метод шахтной сейсморазведки ПВРО, разработаны инженерно-геологические модели ПТС, установлены закономерности распределения инженерно-геологических характеристик, связанные с риском опасных процессов, создана методика мониторинга гидроизолирующих целиков. Полученные результаты имеют важное значение для повышения безопасности ведения горных работ и сохранности запасов стратегически важных полезных ископаемых.

По своему содержанию, кругу рассмотренных вопросов и глубине их разработки диссертационная работа Пригара Андрея Михайловича соответствует критериям, установленным требованиям п. 9 Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к докторским диссертациям. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.6.7 — Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение, а ее автор — Пригара Андрей Михайлович — заслуживает присуждения степени доктора технических наук по специальности 1.6.7 — Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение.

Отзыв рассмотрен и утвержден в качестве официального отзыва ведущей организации на расширенном заседании лаборатории сейсмометрии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт геофизики им. Ю.П.Булашевича Уральского отделения Российской академии наук (протокол № 1 от 13 августа 2026 г).

Отзыв подготовил заведующий лабораторией сейсмометрии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт геофизики им. Ю.П.Булашевича Уральского отделения Российской академии наук, кандидат технических наук

Воскресенский Михаил Николаевич

тел: +7-906-803-2069

email: Voskresenskiy.mn@gmail.com

Я, Воскресенский Михаил Николаевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

«__» _____ 2026 г.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук (ИГФ УрО РАН).

Адрес: 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 100

Телефон +7 (343) 267-88-68

e-mail: igfuroran@mail.ru

http://igfuroran.ru

Подпись Воскресенского Михаила Николаевича удостоверяю: