

ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертацию Пригара 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**

Актуальность темы диссертационного исследования связана с важностью для промышленности природных ископаемых солей и со сложностью их добычи. Подземная разработка соляных месторождений сопряжена с высокими рисками активизации опасных инженерно-геологических процессов, приводящих к затоплению рудников, утрате запасов полезных ископаемых. Причины аварий, как правило, устанавливались постфактум, что свидетельствует о недостаточной эффективности существующих систем мониторинга состояния горных массивов. Традиционные методы, основанные на бурении скважин и наземных геофизических исследованиях, не обладают необходимой детальностью результатов для разработки инженерно-геологических моделей месторождений, особенно в условиях сложного строения водозащитной толщи (ВЗТ), на основе которого можно выполнить прогноз опасных явлений в шахтах. В связи с отмеченным разработка новых научно-методических основ оценки и прогноза устойчивости природно-технических систем (ПТС) на базе высокоразрешающих геофизических методов, в частности шахтной сейсморазведки, является актуальной научно-практической задачей, имеющей важное социально-экономическое значение.

Диссертационная работа Пригара А.М. представляет из себя комплексное решение задачи прогноза устойчивости природного массива, включающее в себя разработку высокоточной шахтной сейсморазведки с системами наблюдений с многократными перекрытиями на продольных и поперечных волнах, разработку модели массива по геологическим данным, математическое моделирование, использование данных гидрогеологии и

научно обоснованный многофакторный прогноз состояния природного массива, что в целом приводит к решению задачи безопасности добычи полезных ископаемых на новом уровне, что входит в актуальность разработки диссертационной темы.

Научная новизна и практическая значимость результатов.

Разработка нового высокоразрешающего метода шахтной сейсморазведки, адаптированного к условиям полного пространства соляных шахт. Шахтный вариант сейсморазведки методом отраженных волн при системе наблюдений с многократными перекрытиями с использованием продольных и поперечных волн - это новые методические разработки выполнения экспериментальных работ в сочетании с объединением известных методов обработки с принципиально новыми, характерными для данных шахтных наблюдений.

Впервые для соляных месторождений созданы научно-методические основы оценки устойчивости ПТС, по комплексу данных бурения, горнопроходческих работ и шахтной сейсморазведки. Автором выявлены и обоснованы новые для ВКМС геологические структуры - каньонообразные эрозионные врезы, установлены критерии их идентификации и создана динамическая модель их возникновения. Разработаны инженерно-геологические модели ПТС, учитывающие тектоническую структуру и упругие свойства пород. Установлены количественные закономерности влияния структурных параметров (мощность ритмопачек и покровной каменной соли, угол падения крыльев поднятия, расстояние от оси поднятия) на риск возникновения опасных процессов. Создана технология мониторинга состояния гидроизолирующих целиков на основе сейсмического анализа в горизонтальной плоскости.

Разработанные модели и полученные геолого-геофизические данные важны и уже учитываются при проектировании горных работ и разработке проектов ликвидационных работ на участках шахтных полей с повышенной аварийностью.

Оценка содержания диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (324 источника) и приложений. Объем работы - 322 страницы.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, представлены научные положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна и практическая значимость работы. Введение написано грамотно, позволяет составить ясное представление о структуре и основных результатах исследования.

В первой главе. Разработка физико-геологических моделей породного массива в интервале малых глубин. Рассмотрены общие сведения о ПТС применительно к соляным месторождениям на примере ВКМС. Автор анализирует особенности геологического строения, выделяет опасные процессы (внутрисоляные деформации, инверсионный рельеф, эрозионные врезы, зоны замещения). Представлена модель ПТС «инженерно-геологический массив - подземное сооружение» на двух уровнях детализации. Разработаны сценарии развития состояния ПТС в зависимости от наличия или отсутствия контроля за инженерно-геологическими условиями (ИГУ). Показано, что наиболее предпочтительным является предупредительный контроль на стадии геологоразведки и проектирования. Этот раздел создает необходимую информационную базу для последующих глав.

Во второй главе. Высокоразрешающий метод шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений. Представлены совокупность технических решений, сделанных автором, теоретические обоснования на основе созданных моделей и математического моделирования, методические приемы на основе натурных экспериментов, выполненных соискателем, в целом объединенных как новый метод шахтной сейсморазведки с высоким разрешением. На основе анализа волновых полей отраженных волн в шахтах соискатель обосновал методические решения, при которых ведущую роль играют исследования на поперечных волнах. Разработка охватывает проблемы возбуждения волновых полей поперечных волн на подземных профилях, методику наблюдения, методы селекции волн и полный цикл обработки, включающий в себя получения временных разрезов, их разделения на отражения в верхнем и нижнем полупространствах и миграцию с получением динамических пространственных разрезов. Методический прием с двумя линиями возбуждения поперечных волн сверху

и снизу выработки, предложенный соискателем, обеспечивает получение высококачественных отражений с разрешением в разрезах до 1-2м. Достоверность метода подтверждена сопоставлением с данными бурения.

Третья глава. Инженерно-геологические модели природно-технических систем и выявление опасных процессов. Посвящена построению инженерно-геологических моделей ПТС. Автор предлагает трехстадийную технологию: по данным бурения, с привлечением данных горных выработок и с использованием метода ПВРО. На основе геомеханических расчетов обоснована природа эрозионных врезов как результата образования трещин отрыва в сводах соляных поднятий с последующим выщелачиванием. Показано, что данные шахтной сейсморазведки позволяют выявлять ранее неизвестные структуры и существенно уточняют морфологию инверсионного рельефа. Разработанные модели учитывают не только геологическое строение, но и тектоническую структуру, а также упругие свойства пород. Этот раздел убедительно демонстрирует практическую ценность метода ПВРО для решения геологических задач.

В четвертой главе. Методика прогноза инженерно-геологических условий водозащитной толщи для повышения безопасности эксплуатации подземных сооружений. Автор выявляет закономерности распределения структурных характеристик (наличие гипсово-глинистой шляпы, угол падения крыльев поднятия, мощность ритмопачек и покровной каменной соли, расстояние от оси поднятия), коррелируемых с риском возникновения опасных процессов. Автором выполнено районирование ВКМС по риску наличия эрозионных врезов и инверсионного рельефа. Разработана классификация состояний объекта по комплексу геолого-геофизических признаков, включающая устойчивое, неустойчивое и критическое состояния. Фармализованный многофакторный анализ состояния ВКМС стал основой эффективного прогноза состояния горного массива. Оригинальным является использование сейсмических атрибутов (пиковая частота, спектральный центроид, спектральная энергия и др.) для выявления скрытых изменений ИГУ. Установлено, что выход значений атрибутов за пределы 2σ является надежным индикатором наличия опасных процессов. Создана

формализованная методика анализа инженерно-геологического состояния ВЗТ, что является важным шагом в направлении количественной оценки рисков.

Пятая глава. Методика оценки и прогноза состояния гидроизолирующих целиков. Автор разработал трехмерную модель растворения целиков под воздействием рассолов с учетом гравитационной дифференциации. На основе численного и физического моделирования показана принципиальная возможность изучения ширины и физических свойств ГЦ с помощью шахтной сейсморазведки в горизонтальной плоскости с регистрацией продольных и поперечных волн. Разработана методика комплексного мониторинга, включающая определение ширины целика, скоростей упругих волн, сейсмических атрибутов, а также расчет физико-механических характеристик (коэффициент Пуассона, модули упругости и сдвига, предел прочности на сжатие, степень нагружения). Выполнен прогноз изменения параметров ГЦ во времени на основе экстраполяции. Этот раздел имеет важное практическое значение для обеспечения безопасности действующих рудников при ликвидации отработанных участков.

В заключении сформулированы основные результаты работы, которые соответствуют поставленным задачам и выносимым на защиту положениям.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций. Достоверность результатов обеспечена большим объемом фактического материала, включающего данные многолетних экспериментальных исследований, выполненных автором и под его руководством. Использован комплекс современных методов: численное моделирование (Ansys, Tessleral), физическое моделирование в реальных горно-геологических условиях, статистический анализ, корреляционные методы. Сходимость результатов теоретических и натурных экспериментов, подтверждение выводов контрольным бурением и маркшейдерскими наблюдениями на промышленных объектах свидетельствуют о высокой степени обоснованности научных положений. Работа базируется на представительной выборке исходных данных и корректном применении методов математической статистики и теории упругости.

Апробация и публикации. Основные результаты диссертации докладывались на многочисленных международных и всероссийских конференциях (EAGE, «Неделя горняка», «Инженерная и рудная геофизика» и др.). По теме диссертации опубликовано 70 работ, в том числе 23 в изданиях из перечня ВАК, 19 в изданиях, индексируемых в Scopus, получено 4 патента на изобретение и 12 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ, издана монография. Это свидетельствует о высокой степени апробации и признании результатов научным сообществом.

Замечания по диссертационной работе. Несмотря на высокий научный уровень и практическую значимость, работа не лишена некоторых недостатков, которые, однако, не снижают общей положительной оценки.

1. В работе детально описан метод шахтной сейсморазведки ПВРО и показана его высокая эффективность для изучения ВЗТ. Однако, не в полной мере рассмотрены ограничения метода, связанные с геометрией горных выработок, наличием техногенных объектов, которые могут создавать интенсивные волны-помехи. Также остаются открытыми вопросы о применимости метода в условиях сильной трещиноватости или при наличии зон с аномально низкими скоростями упругих волн.

2. В диссертации разработаны уникальные подходы к изучению среды поперечными волнами, но нет ни слова о том, что поперечные волны бывают по поляризации SV и SH. Рассмотренные вопросы возбуждения волн источником с направленной силой возбуждают и те и другие поперечные волны, и есть возможность использовать оба типа волн поперечных волн как для селекции, так и для получения дополнительной информации.

3. В главе 5 для оценки состояния гидроизолирующих целиков используются корреляционные зависимости между скоростями упругих волн и прочностными характеристиками, полученные другими исследователями. Автор предлагает способ приведения динамических модулей упругости к статическим. Следовало бы более подробно обосновать универсальность этих корреляций для разных литологических типов пород (сильвинит, карналлит, каменная соль) и для различных условий напряженно-

деформированного состояния массива, особенно в зонах влияния горных выработок.

4. В работе используется широкий спектр сейсмических атрибутов для выявления зон с опасными процессами. Но выбор конкретных атрибутов и пороговых значений (выход за 2σ) обоснован эмпирически на ограниченном наборе участков. Желательно было бы провести более систематический анализ чувствительности различных атрибутов к изменению инженерно-геологических условий и разработать рекомендации по выбору оптимального набора атрибутов для разных типов геологических задач.

5. В представленной диссертации сформулировано десять задач и только четыре защищаемых положения. Некоторые из задач легко объединяются в одну например: задачи 3 и 4, а последняя 10 задача: апробация и внедрение результатов исследований, скорее не задача, а как пункт из плана работ.

6. В заключении к диссертации соискатель великолепно изложил результаты своей работы, но не высказался о перспективах дальнейшего развития созданного им метода.

Заключение

Диссертационная работа Пригара Андрея Михайловича является завершенным научно-квалификационным исследованием, в котором на основе разработанных автором теоретических положений, методических подходов и экспериментальных данных решена актуальная научная проблема - создание научно-методических основ оценки и прогноза устойчивости природно-технических систем при подземной разработке соляных месторождений. Предложенные решения имеют важное значение для повышения безопасности горных работ, сохранности запасов полезных ископаемых и снижения экономических рисков. Решенная автором проблема обладает высокой степенью сложностью, и, к его чести, он с успехом на высоком научном уровне и с практической значимостью завершил диссертационную работу.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.6.7 - Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение. Результаты работы

достоверны, выводы и рекомендации обоснованы. Автореферат и публикации автора в полной мере отражают основное содержание диссертации. Указанные замечания не снижают общей высокой оценки работы и не влияют на ее главные научные и практические результаты.

Диссертация Пригара А.М. «Научно-методические основы оценки и прогноза устойчивости природно-технических систем при подземной разработке соляных месторождений» соответствует требованиям п. 9 Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 1.6.7 - Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение.

Официальный оппонент

Еманов Александр Федорович,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник, заведующий лабораторией инженерной сейсмологии

Алтае-Саянского филиала Федерального Исследовательского центра

«Единая геофизическая служба» Российской академии наук

630090, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, д.3

Тел.: +7(484) 393-14-05

E-mail: emanov@gs.sbras.ru

«__»_____2026 г.

_____/ Еманов А.Ф.

Я, Еманов Александр Федорович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

« ____ » _____ 2026 г.

_____ / А.Ф. Еманов

Подпись А.Ф. Еманова заверяю