

На правах рукописи

Лебедева Олеся Олеговна



**ПРОГНОЗ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ
МЕЖДУШАХТНЫХ ЦЕЛИКОВ КАЛИЙНОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСА
НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Специальность 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2024

Диссертация выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Кашников Юрий Александрович

Официальные оппоненты:

Журавков Михаил Анатольевич

доктор физико-математических наук, профессор, Белорусский государственный университет, кафедра теоретической и прикладной механики, заведующий кафедрой;

Мельник Виталий Вячеславович

кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, отдел геомеханики, заведующий отделом.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург.

Защита диссертации состоится **11 июня 2024 г. в 11 00** на заседании диссертационного совета ГУ.7 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 11 апреля 2024 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



АФАНАСЬЕВ
Павел Игоревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Многолетний опыт разработки калийных месторождений, в частности, Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (ВКМКС), показал, что самым неблагоприятным и пагубным последствием является затопление всего шахтного поля или его участка. Как правило, причиной затоплений является формирование и развитие техногенных водопродводящих трещин или развитие существующих трещин в массиве, которые, чаще всего, приурочены к зонам с ослабленными физико-механическими свойствами, выделить которые весьма сложно.

К основным влияющим факторам, определяющим развитие деформационных процессов подрабатываемой толщи пород при разработке ВКМКС, следует отнести геологические особенности строения Соликамской впадины, различные техногенные события, которые проявили себя в связи с отработкой промышленных запасов месторождения, физико-механические свойства вмещающих пород и продуктивных пластов, а также развитие горных работ и их текущее положение.

Опыт геомеханического анализа произошедших техногенных аварий на территории ВКМКС показывает, что для прогноза деформационных процессов определяющим фактором являются физико-механические свойства горных пород. Получить надежное распределение свойств в массиве и в продуктивных пластах пытаются, прежде всего, комбинированием натуральных методов исследований. В связи с этим предлагается комплексирование натуральных исследований, а именно геологических, геофизических и геомеханических подходов при создании геолого-геомеханической модели участка водозащитной толщи (ВЗТ) для прогноза деформационных процессов междушахтных целиков рудников на территории ВКМКС. В качестве исходных данных используется геологическое описание коло-

нок скважин, геофизические исследования в скважинах, физико-механические свойства пород, результаты маркшейдерских наблюдений за сдвижением земной поверхности. Обработка имеющихся данных по скважинам позволяет создать трёхмерную модель распределения скорости продольной волны, а, в свою очередь, статистические зависимости для двух основных параметров физико-механических свойств (модуль упругости и предел прочности на сжатие) от скорости продольной волны позволяют получить значения данных свойств в любой точке модели.

На основе созданной геолого-геомеханической модели производится моделирование и прогноз напряженно-деформированного состояния междушахтных целиков рудников калийного месторождения.

Степень разработанности темы исследования

Моделированием деформационных процессов массива горных пород и земной поверхности при разработке месторождений калийно-магниевого руд занимались и занимаются различные учёные и специалисты – Нестеров М. П., Барях А. А., Проскуряков Н. М., Протосеня А. Г., Ержанов Ж. С., Оловянный С. Г., Константинова С. А., Журавков М. А., Кашников Ю. А., Тенисон Л. О., а также зарубежные специалисты – Wittke W., Kiehl J. R., Doering T., Fenk J., Hou Z., Lux K., Uhlenbecker W., Menzel W. и другие.

Геофизические методы исследования широко используются для описания геологического строения массива. Методы отлично зарекомендовали себя на месторождениях углеводородов. На сегодняшний день они активно применяются для изучения массивов при разработке твёрдых полезных ископаемых открытым и подземным способами. Результаты исследований широко представлены в работах Санфирова И. А., Жукова А. А., Мельника В. В., Еременко А. А., Козырева А. А., Бахавой С. П. и другие.

При этом, отсутствует опыт совместного использования геомеханических и геофизических методов для параметрического обеспечения геомеханических расчетов.

В последние годы развивается метод построения геолого-геомеханической модели массива пород ВЗТ, разработанный специалистами ПНИПУ под руководством проф. Кашникова Ю. А. Метод основан на комплексном применении геофизических и геомеханических исследований.

При использовании такого подхода решается актуальная задача – получение дополнительной информации об особенностях строения массива горных пород и распределении их геомеханических свойств, что позволяет выполнить расчет напряженно-деформированного состояния массива пород ВЗТ с использованием их реальных значений.

Содержание диссертации **соответствует паспорту научной специальности** по пунктам:

1. Напряженно-деформированное состояние массивов горных пород и грунтов в естественных условиях и его изменение во времени, в том числе в связи с проведением горных выработок, строительством сооружений, газовых и нефтяных скважин, эксплуатацией месторождений.

2. Геомеханическое обеспечение открытой и подземной добычи полезных ископаемых, разработка методов управления горным давлением, удароопасностью, креплением, сдвижением горных пород, устойчивостью бортов карьеров, разрезов, отвалов и подземных выработок.

5. Теоретические основы, математические модели и способы управления состоянием и поведением массивов горных пород и грунтов с целью обеспечения устойчивости горных выработок, подземных и наземных сооружений, предотвращения проявлений опасных горно-геологических явлений.

Предмет, объект исследования

В качестве предмета исследования выступают деформационные процессы, происходящие в массиве горных пород, а именно в водозащитной толще, а также на земной поверхности в районе междушахтных целиков между шахтными полями СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3 (Соликамское калийное рудоуправление № 1, № 2, № 3). В качестве объекта исследования выбран массив горных пород и земная поверхность в районе междушахтных целиков между СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3.

Цель работы заключается в анализе и прогнозе напряженно-деформированного состояния массива горных пород и оседаний земной поверхности в районе междушахтных целиков СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3 ПАО «Уралкалий» с использованием комплекса натурных исследований, под которыми понимается совокупность геологических, геомеханических и геофизических исследований и маркшейдерских наблюдений.

Идея работы состоит в использовании для расчета напряженно-деформированного состояния массива горных пород комплекса натурных исследований, в основе которых лежат зависимости между статическими и динамическими геомеханическими параметрами соляных пород, результаты обработки геолого-геофизических параметров солеразведочных скважин и результаты маркшейдерских наблюдений за оседаниями земной поверхности.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения следующих **задач**:

1. Анализ существующих теоретических и практических основ создания геолого-геомеханических моделей.

2. Проведение испытаний образцов соляных пород, обработка результатов, получение статистических зависимостей между статическими и динамическими геомеханическими параметрами соляных пород.

3. Обработка результатов измерений оседаний земной поверхности в районе междушахтных целиков.

4. Обработка данных акустического каротажа солеразведочных скважин.

5. Создание геолого-геомеханической модели массива горных пород в районе междушахтных целиков.

6. Численное моделирование процессов оседаний земной поверхности в районе междушахтных целиков на основе созданной геолого-геомеханической модели массива горных пород.

Научная новизна работы:

Впервые получены математические зависимости между статическими и динамическими геомеханическими характеристиками соляных пород ВКМКС.

На основе комплексного использования геологической информации, данных акустического каротажа скважин, результатов определений статических и динамических геомеханических характеристик образцов горных пород получено распределение физико-механических свойств массива горных пород исследуемого участка ВКМКС.

Выполнено численное решение задачи расчета напряженно-деформированного состояния массива горных пород в районе междушахтных целиков, основанный на комплексном использовании результатов натурных исследований.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Полученные зависимости между статическими и динамическими геомеханическими характеристиками соляных пород могут быть использованы для прогноза параметров напряженно-деформированного состояния массива горных пород как в окрестности одиночных выработок, так и при создании крупных моделей.

Разработанный алгоритм получения распределения физико-механических свойств в массиве пород ВЗТ, основанный

на комплексном использовании геологической, геофизической и геомеханической информации, может быть распространен на всю территорию ВКМКС.

Выполненное геомеханическое моделирование напряженно-деформированного состояния массива пород ВЗТ и земной поверхности на основе созданной геолого-геомеханической модели районе междушахтных целиков между шахтными полями СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3 позволило выявить развитие зон разрушения в массиве пород ВЗТ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке ФГБУ РФФИ в рамках выполнения научного проекта № 20-35-90031 (договор от 01.09.2020).

Результаты и рекомендации диссертационной работы приняты к использованию в процессе проектирования и выполнения научно-технических и проектных работ деятельности АО «ВНИИ Галургии», оформлены актом использования результатов, утверждённый 13.12.2023 г. техническим директором АО «ВНИИ Галургии» Ванком В. В.

Методология и методы исследования включали проведение лабораторных испытаний образцов соляных пород на специализированном оборудовании с использованием комплексных методик и подходов, анализ инструментальных наблюдений за оседаниями земной поверхности, обработку данных акустического каротажа солеразведочных скважин, использование математических моделей механики сплошных сред, численных расчетов и верификации их на натурных данных.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Доказано, что для условий Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей прочностные и деформационные характеристики соляных пород в массиве могут быть установлены на основании измеренных в лабораторных условиях

скоростей прохождения продольных волн в диапазоне 3750 м/с до 4600 м/с.

2. Для получения распределения физико-механических свойств горных пород в массиве необходимо комплексное использование полученных зависимостей, результатов геофизических исследований скважин и геологической информации, что позволяет создать основу для численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород.

3. Математическое моделирование процессов деформирования массива пород ВЗТ и земной поверхности основано на полученном распределении физико-механических свойств горных пород в массиве.

Степень достоверности результатов обусловлена использованием общепризнанных моделей механики сплошных сред, верификации численных расчетов на результатах испытаний образцов соляных пород, хорошей сходимостью результатов моделирования с данными натурных наблюдений за оседанием земной поверхности на ВКМКС.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: XV Международный форум-конкурс студентов и молодых учёных «Актуальные проблемы недропользования», 13-17 мая 2019 г., г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский Горный университет; XVII Международный форум-конкурс студентов и молодых учёных «Актуальные проблемы недропользования», 31 мая - 6 июня 2021 г., г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский Горный университет; Международная конференция «EUROCK 2021», 21-24 сентября 2021 г., г. Турин, Италия (online формат); XXI Уральская горнопромышленная декада «Разрушение горных пород и минералов», 4-7 апреля 2023 г. Екатеринбург, Уральский государственный горный университет; XIX Международный форум-конкурс студентов и

молодых учёных «Актуальные проблемы недропользования», 22-26 мая 2023 г., г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский Горный университет.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования; участии в проведении испытаний соляных пород; получении статистических зависимостей между статическими и динамическими геомеханическими характеристиками соляных пород; анализе и обработке геологической информации; анализе и обработке данных ГИС; анализе и обработке результатов измерений оседаний земной поверхности; создании геолого-геомеханической модели массива горных пород; проведении численного моделирования для определения деформационных процессов в массиве и процессов оседаний земной поверхности в районе междушахтных целиков; прогнозировании деформационных процессов в массиве и процессов оседаний земной поверхности в районе междушахтных целиков.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 8 печатных работах, в том числе, в 4 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Подана 1 заявка на патент.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырёх глав с выводами по каждой, заключения, списка литературы, включающего 106 наименований. Диссертация изложена на 131 странице машинописного текста, включает 56 рисунков и 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены существующие математические модели соляных пород, используемые при расчете параметров НДС при отработке ВКМКС. Также представлен опыт использования геофизических методов для решения проблем сохранности ВЗТ при разработке ВКМКС. Рассмотрены общие принципы определения размеров междушахтных целиков, а также геологические, геомеханические и технологические характеристики вблизи целиков. На основе проведенного анализа сформулированы цель и задачи.

Во второй главе приведена характеристика наблюдательной станции в районе междушахтных целиков. Приведены результаты инструментальных наблюдений. Рассмотрена аналитическая методика расчета сдвижений и деформаций земной поверхности на основании действующих нормативных документов, согласно которой учитываются исключительно горно-технические показатели, в то время как геологические и геомеханические особенности строения массива и особенности деформирования пород не учитываются.

В третьей главе приведены основные принципы создания геолого-геомеханической модели (ГГМ). Проведен анализ геологической информации и произведена обработка данных геофизических исследований скважин (ГИС) в районе междушахтных целиков. Получены зависимости между статическими и динамическими физико-механическими свойствами соляных пород. Представлены зависимости предела прочности, модуля упругости, сцепления и угла внутреннего трения от скорости продольной волны. Разработан метод построения геолого-геомеханической модели массива горных пород. Предложена ме-

тодика построения распределения геомеханических параметров горных пород в массиве по результатам геомеханических и геофизических исследований. Построена ГГМ массива горных пород в районе междушахтных целиков СКРУ-1 – СКРУ-2 вдоль предварительно выбранных и обоснованных расчётных разрезов, соответствующих положениям профильных линий на земной поверхности. Линия разреза СКРУ-1 – СКРУ-2 соответствует положению профильной линии № 1Ю линия разреза СКРУ-2 – СКРУ-3 – профильной линии № 2 (рисунок 1).

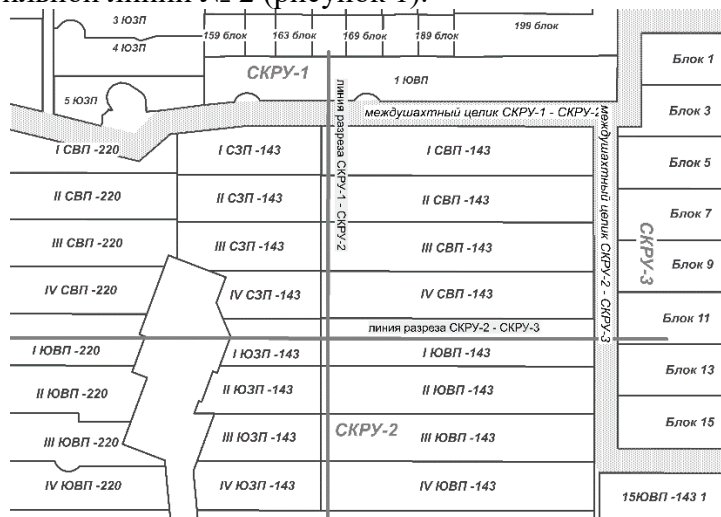


Рисунок 1 – Положение междушахтных целиков СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3

В четвертой главе рассмотрены теоретические основы используемой модели и её реализация методом конечных элементов. Для определения состояния массива в районе междушахтных целиков СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3 в конечно-элементном программном комплексе Ansys было выполнено крупномасштабное математическое моделирование

напряженно-деформированного состояния массива горных пород на период до 2031 года.

В заключении представлены основные научные и практические выводы по работе.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Доказано, что для условий Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей прочностные и деформационные характеристики соляных пород в массиве могут быть установлены на основании измеренных в лабораторных условиях скоростей прохождения продольных волн в диапазоне 3750 м/с до 4600 м/с.

Для установления статистических зависимостей между статическими и динамическими геомеханическими характеристиками пород ВЗТ на установке ПИК-УИДК/ПЛ были проведены испытания керн из геологоразведочных и стволовых скважин. Испытания образцов на упругие и прочностные свойства проводились в соответствии с разработанной программой. На рисунке 2 представлены зависимости, полученные в результате испытаний кернового материала на установке ПИК-УИДК/ПЛ.

Проведенные испытания физико-механических свойств соляных пород на предмет установления зависимостей между модулем упругости, пределом прочности на сжатие, сцеплением и внутренним трением и динамическими геомеханическими параметрами, прежде всего статическим модулем упругости и скоростью продольной волны, явились основой для выявления распределения физико-механических свойств пород в массиве ВЗТ при дальнейшей разработке геолого-геомеханической модели и последующего прогнозирования развития деформационных процессов в породах ВЗТ. Полученные статистические зависимости подтверждают первое защищаемое положение.

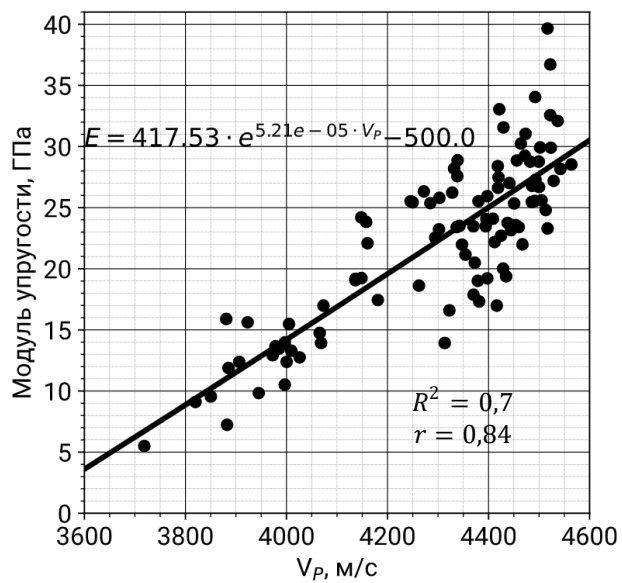
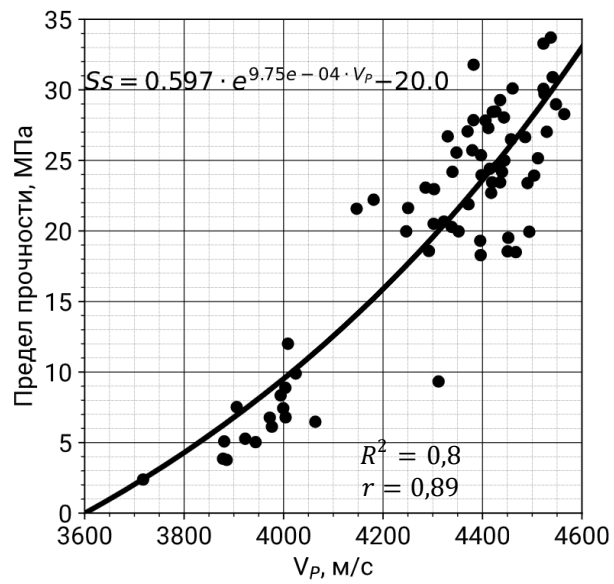


Рисунок 2 – Общие зависимости предела прочности и модуля упругости от скорости продольной волны V_p

2. Для получения распределения физико-механических свойств горных пород в массиве необходимо комплексное использование полученных зависимостей, результатов геофизических исследований скважин и геологической информации, что позволяет создать основу для численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород.

Комплексное использование полученных зависимостей между статическими и динамическими геомеханическими характеристиками соляных пород, обработка данных каротажа скважин и использование геологической информации представляет собой ГГМ, которая является основой для геомеханического моделирования деформационных процессов в массиве и на земной поверхности. Исходная информация для построения модели включает: геологическое описание; геологические отбивки в скважинах; данные геофизических исследований в скважинах; полученные зависимости между статическими и динамическими геомеханическими параметрами. Блок-схема создания ГГМ представлена на рисунке 3.

Исходная информация подгружалась в проект, который создавался в программе для геологического моделирования IRAP RMS. Имеющиеся данные ГИС обрабатывались совместно с геологическими данными.

Пример получения распределения модуля упругости представлен на рисунке 4. Имея зависимость между статическими и динамическими параметрами, а также распределение скорости продольной волны в скважине можно получить распределение модуля упругости на всю глубину исследования, тем самым получить распределение физико-механических свойств в массиве вблизи скважины. Проведя распределение свойств в массиве с использованием методов математической статистики и данных геологии, строится уже ГГМ исследуемого участка массива горных пород.



Рисунок 3 – Блок-схема создания геолого-геомеханической модели водозащитной толщи и калийных пластов

Итоговая построенная геологическая модель содержит 10 млн. ячеек, способ разбиения – пропорциональный. Средний размер элемента по вертикали 0.25 м, по горизонтали – 50 м. Как результат, было построено трехмерное распределение скорости продольной волны V_p в районе целиков СКРУ-1 – СКРУ-2 – СКРУ-3, которое позволяет получить распределение упругих и прочностных свойств в трехмерной модели.

На основе полученных зависимостей были построены распределения модуля упругости и предела прочности вдоль расчётных разрезов, например, в районе междушахтного целика СКРУ-2 – СКРУ-3 (рисунок 5). Построенная ГГМ имеет распределение физико-механических свойств, что подтверждает второе защищаемое положение.

3. Математическое моделирование процессов деформирования массива пород ВЗТ и земной поверхности основано на полученном распределении физико-механических свойств горных пород в массиве.

Для определения состояния массива в районе междушахтных целиков СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3 было выполнено крупномасштабное математическое моделирование в ПО Ansys. Расчетная модель учитывает фактическую геометрию горных выработок.

Было создано две крупномасштабные модели вдоль двух расчетных профилей. При создании каркаса геомеханической модели использовались результаты построенной ГГМ. Модуль упругости, прочность на одноосное сжатие, угол внутреннего трения определялись по корреляционным зависимостям.

Расчет НДС выполнялся для условий плоской деформации. Моделирование отработки продуктивных пластов выполнялось в два шага. Сначала задавались граничные условия, и рассчитывалось исходное поле напряжений в нетронутом массиве. Потом моделировалась отработка камер путем процедуры деактивации конечных элементов. Перемещения, вызванные отработкой, получаются путем вычитания из итоговых перемещений результатов расчета первого шага.

Для анализа деформационных процессов выполнялась оценка степени нарушенности слоев массива горных пород, для чего выделялись слои, в которых принятый критерий разрушения превышает критическое значение. Формально это соответствует ситуации, когда возникает зона разрушения, через которую надсолевые пресные воды могут попасть в выработанное пространство рудника и привести к затоплению. Оценка условий разрушения горных пород выполнена на основе анализа распределения критерия разрушения породы вида (1):

$$K_t = \sigma_1 / [\sigma_1], \quad (1)$$

где K_t – показатель нарушенности; σ_1 – первое главное напряжение; $[\sigma_1]$ – предельное значение первого главного напряжения.

Величина $K_t \geq 1.0$ означает разрушение горной породы, что в физическом смысле говорит о начале образования трещин сдвига. Предельное значение первого главного напряжения определяется согласно принятого критерия разрушения. При расчете критерия K_t использовался критерий Кулона-Мора для придания расчетам определенного запаса надежности (2):

$$[\sigma_1] = \sigma_{сж} + \sigma_3 \cdot \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}, \quad (2)$$

где σ_3 – минимальное главное напряжение; $\sigma_{сж}$ – прочность на одноосное сжатие (с учетом коэффициента перехода к длительной прочности 0,3); φ – угол внутреннего трения, который также брался из геолого-геомеханической модели.

В результате моделирования были получены распределения K_t в массиве на 2020 г., 2026 г., 2031 г., и соответствующие оседания на земной поверхности для расчётных разрезов. На рисунке 6 представлено распределение K_t на 2031 г. в районе междушахтного целика СКРУ-1 – СКРУ-2, а на рисунке 7 – сопоставление расчётных и фактических оседаний.

Расчеты показывают, что до 2031 г. в анализируемой области целика отсутствует опасность возникновения нарушения пород ВЗТ и возникновения водопроводящих трещин. Для исключения негативного развития событий необходимо своевременное выполнение закладочных работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате диссертационного исследования получены следующие выводы и рекомендации:

1. На основе испытаний для соляных пород ВКМКС получены зависимости предела прочности, модуля упругости, сцепления и угла внутреннего трения от скорости продольной волны.

2. Обработаны результаты инструментальных наблюдений за оседаниями земной поверхности в районе междушахтных целиков СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3 и установлены закономерности развития деформационных процессов.

3. Разработаны теоретические основы создания геолого-геомеханической модели, основанной на обработке данных каротажа солеразведочных скважин и использовании полученных корреляционных зависимостей.

4. Построена трехмерная геолого-геомеханическая модель участка шахтных полей между СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3, которая отражает распределение физико-механических свойств в породах ВЗТ.

5. Для анализа деформационных процессов в районе междушахтных целиков в ПО Ansys было выполнено моделирование НДС на период до 2031 г.

6. Расчеты показывают, что до 2031 года отсутствует опасность возникновения водопроводящих трещин в районе междушахтных целиков. Для предотвращения этого рекомендовано своевременное выполнение закладочных работ.

Автор работы видит универсальность предлагаемого комплекса натурных исследований для оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород месторождений полезных ископаемых на основе комплекса натурных исследований, поэтому дальнейшее развитие темы диссертации предполагает проведение исследований, направленных на реализацию метода выделения зон с различными физико-механическими свойствами в массиве пород угольных и рудных месторождений.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Кашников, Ю. А. Создание геолого-геомеханической модели Верхнекамского месторождения калийных солей / Кашников Ю. А., Ермашов А. О., Шустов Д. В., Лебедева О. О. // Маркшейдерский вестник. – 2019. – № 1. – С. 39-45.

2. Кашников, Ю. А. 3D geomechanical modeling as the basis for solving complex problems of potassium salt development safety / Кашников Ю. А., Ермашов А. О., Лебедева О. О. // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2019. – № 3. – С. 30-38. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-30-38.

3. **Лебедева, О. О.** Анализ и подготовка исходных данных для построения геолого-геомеханической модели участка Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей // Недропользование. – 2022. – Т. 22, № 3. – С. 139-143 DOI: 10.15593/2712-8008/2022.3.5.

4. **Лебедева, О. О.** Моделирование оседаний земной поверхности в районе междушахтных целиков на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей на основе геолого-геомеханической модели // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2022. – № 6. - С. 104-113 DOI: 10.21440/0536-1028-2022-6-104-113.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:

5. Ermashov, A. O. The analysis of interbed stability with mathematical modeling methods / Ermashov A. O., **Lebedeva O. O.**, Rysin A. I. // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019. Volume 1 Proceedings of the XVth forum-contest of students and young researchers under auspices of UNESCO, Saint-Petersburg, Russia, 13-17 May 2019 – PP. 173-182.

6. Kashnikov, Yu. A. Solving the problems of exploitation safety of potassium salt deposit based on joint application of geophysical and geomechanical studies / Kashnikov Yu. A., Shustov D. V., Ermashov A. O., **Lebedeva O. O.**, Zhukov A. A., Prigara A. M // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 833 (2021) 012084. doi:10.1088/1755-1315/833/1/012084.

Заявка на патент:

7. Способ выделения в водозащитной толще и продуктивных калийных пластах горного массива зон с различными прочностными и деформационными характеристиками: Заявка на патент № 2023128930: заявл. 08.11.2023 / Кашников Ю. А., Шустов Д. В., **Лебедева О. О.**, Кухтинский А. Э.; заявитель ФГАОУ ВО ПНИПУ.

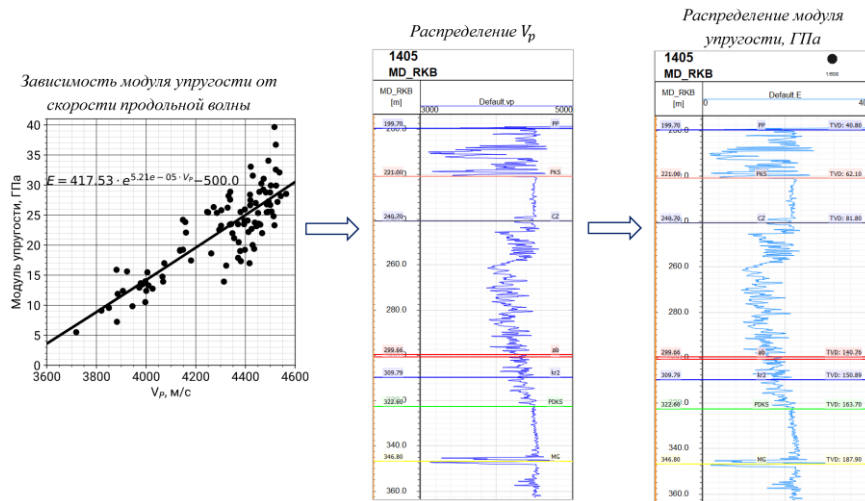


Рисунок 4 – Пример получения распределения модуля упругости

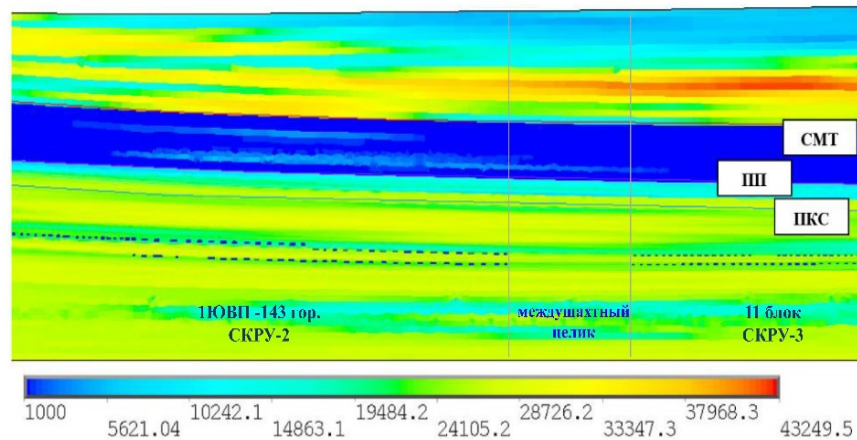


Рисунок 5 – Распределение модуля упругости вдоль расчётного разреза в районе междушахтного целика SKRU-2 – SKRU-3 (МПа) (CMT – соляно-мергельная толща; ПП – переходная пачка; PKC – покровная каменная соль; 1ЮВП – 1 юго-восточная панель)

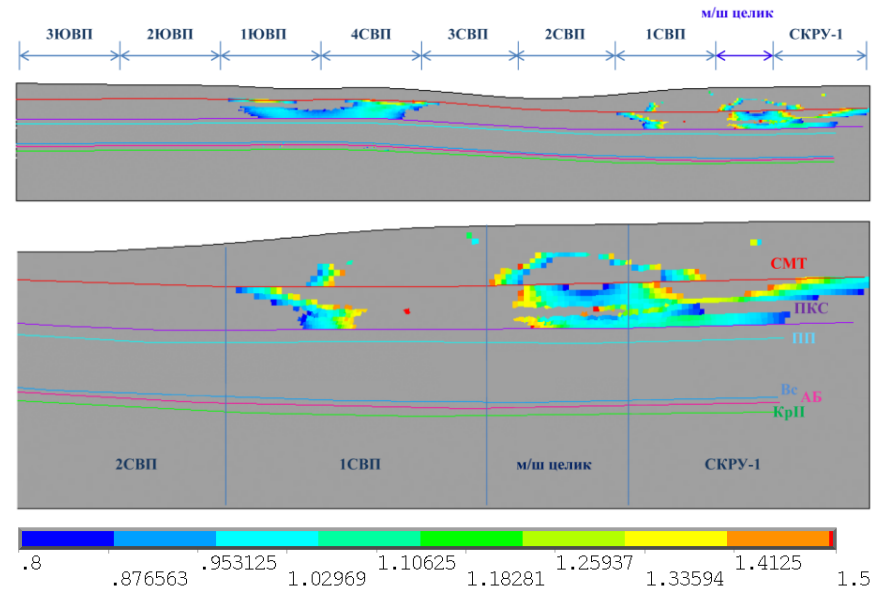


Рисунок 6 – Распределение критерия нарушенности K_t в районе междушахтного целика SKRU-1 – SKRU-2 на 2031 год

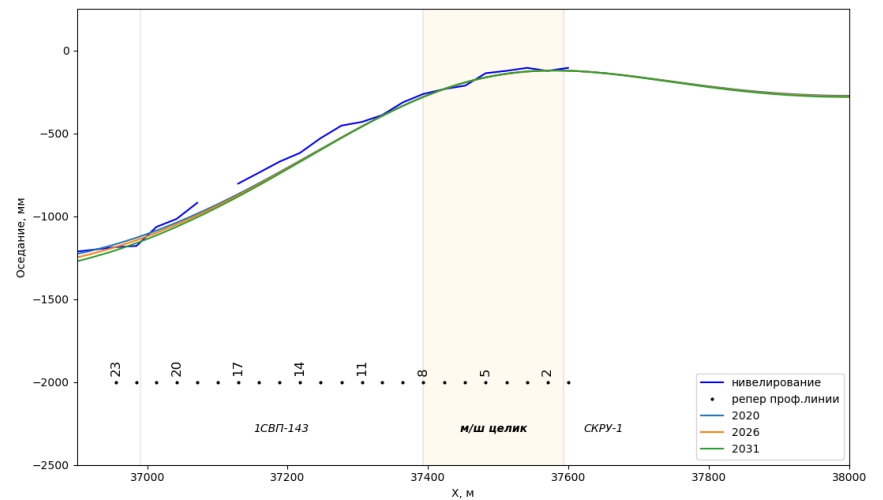


Рисунок 7 – Сопоставление расчётных и фактических оседаний в районе междушахтного целика SKRU-1 – SKRU-2