

Кулькова Мария Сергеевна



**ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОТРАБОТКИ
ЖДАНОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И НАПРЯЖЕННО-
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА**

Специальность 2.8.6 –

«Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Апатиты

2024

Работа выполнена в Горном институте – обособленном подразделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра “Кольский научный центр Российской академии наук” (КНЦ РАН)

Научный руководитель:

Семенова Инна Эриковна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, руководитель отдела Геомеханики Горного института КНЦ РАН

Официальные оппоненты:

Вознесенский Александр Сергеевич – доктор технических наук, профессор кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Барышников Василий Дмитриевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией диагностики механического состояния массива горных пород Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук Институт горного дела

Защита диссертации состоится 19 февраля 2025 г. в 11⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.1.096.02, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПКОН РАН и на сайте ипкон.рф

Автореферат разослан _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



Федотенко В.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Известно, что интенсификация добычи запасов месторождений осложняет горнотехническую ситуацию, в том числе повышая вероятность возникновения разрушений массивов горных пород в динамической форме. Для реализации динамического разрушения должны быть выполнены два условия. Первым условием является то, что породы и руды, слагающие месторождение, должны иметь способность накапливать значительное количество упругой энергии под действием напряжений в массиве с дальнейшей ее реализацией в виде хрупкого разрушения. Вторым необходимым условием потенциального динамического разрушения является действие таких величин напряжений, значения которых близки или превышают пределы прочности горных пород при сжатии. В связи с этим, исследование характеристик горных пород и породных массивов, обоснование параметров полей действующих напряжений и прогноз трансформации напряженно-деформированного состояния (НДС) в процессе отработки запасов являются актуальными и необходимыми условиями для обеспечения геодинамической безопасности ведения горных работ.

Изучению физико-механических характеристик горных пород с точки зрения их склонности к динамическому разрушению посвящено множество исследований. Особый вклад в изучение этих свойств и развитие методик внесли В.В. Виноградов, В.Т. Глушко, П. Кайзер, Э.В. Каспарьян, А.А. Козырев, И.М. Петухов, А.Г. Протосеня, А.Н. Ставрогин, Б.Г. Тарасов, И.А. Турчанинов, М. Цай. Исследованием особенностей влияния структурных неоднородностей на прочностные свойства массивов горных пород занимались И.В. Баклашов, З.Т. Беньявски, В.И. Борщ-Компониец, Э.Т. Браун, Б.А. Картозия, В.Н. Одинцев, А.Г. Протосеня, Г.Л. Фисенко, Э. Хук, и др.

Значительный вклад в изучение закономерностей формирования полей действующих напряжений в массивах горных пород, их параметров и особенностей распределения внесли И.И. Айнбиндер, В.Д. Барышников, А.А. Барях, А.С. Батугин, И.М. Батугина, Н.П. Влох, П.В. Деев, А.А. Еременко, В.А. Еременко, В.Н. Захаров, А.А. Козырев, М.В. Курленя, А.В. Леонтьев, А.Б. Макаров, Г.А. Марков, А.И. Панжин, И.М. Петухов, А.Г. Протосеня, И.Ю. Рассказов, С.Н. Савченко, А.Д. Сашурин, И.А. Турчанинов, Н.Н. Фотиева, Н. Хаст, А.Н. Шабаров, В.Л. Яковлев, Д.В. Яковлев и др.

Решению задач геомеханики с использованием методов численного моделирования напряженно-деформированного состояния массивов горных пород посвящены исследования Б.З. Амузина, А.А. Баряха, В.А. Еременко, О.К. Зенкевича, О.В. Зотеева Л.А. Назарова, Л.А. Назаровой, А.Г. Протосени, С.Н. Савченко, Л. Сегерлинда, И.Э. Семеновой, В.М. Серякова, Д.В. Сидорова, В.А. Трофимова, А.Б. Фадеева, Э. Хука, С.А. Юфина и др.

Изучение параметров напряженно-деформированного состояния массивов пород Кольского полуострова выполняется с середины 20 века. Детально исследованы и верифицированы геомеханические характеристики преимущественно для месторождений Хибинского и Ловозерского массивов. Для Печенгской структуры, включающей одно из крупнейших месторождений медно-никелевых руд

в России – Ждановское, результаты исследований НДС в основном касались интерпретации данных бурения Кольской сверхглубокой скважины и носили противоречивый характер. В настоящее время Ждановское месторождение разрабатывают подземным рудником «Северный» с производительностью около 6 млн т руды в год, при этом актуальная глубина ведения горных работ составляет порядка 650 метров. Такие значительные объемы добычи стимулируют процесс понижения фронта очистных работ, что осложняет геомеханическую ситуацию и может приводить к разрушениям массива пород в динамической форме. Таким образом, определение характеристик основных литологических разностей и породного массива Ждановского месторождения, исследование параметров природных и техногенных полей действующих напряжений и прогноз изменения НДС являются основой для оценки возможности реализации разрушений массива в динамической форме и обоснования способов безопасной отработки запасов.

Объектом исследования являются геомеханические характеристики массива горных пород Ждановского месторождения.

Предмет исследования – закономерности формирования областей разрушения массива пород Ждановского месторождения в динамической форме с учетом особенностей его геомеханических характеристик.

Целью работы является обоснование параметров отработки запасов Ждановского месторождения с учетом его геомеханических характеристик.

Идея работы заключается в выявлении закономерностей формирования областей критических состояний массива пород Ждановского месторождения, потенциально опасных с точки зрения возникновения динамических разрушений в процессе ведения горных работ.

Основные задачи исследования:

1. Обработка и систематизация результатов исследований физико-механических свойств основных литологических разностей, определение характеристик массива пород Ждановского месторождения.

2. Анализ параметров поля напряжений Ждановского месторождения по результатам натурных исследований.

3. Определение параметров природного поля напряжений массива пород Ждановского месторождения, анализ его особенностей и выявление закономерностей его изменения с глубиной.

4. Разработка комплекса разномасштабных численных геомеханических моделей Ждановского месторождения.

5. Выявление закономерностей формирования критических состояний массива пород Ждановского месторождения, прогноз НДС и обоснование параметров ведения горных работ на основе оценки результатов численного геомеханического моделирования.

Основные методы исследования: 1) аналитические методы и методы математической статистики, применяемые при изучении физико-механических свойств горных пород и результатов натурных исследований; 2) натурные методы, применяемые в процессе картирования и визуального обследования состояния

горных выработок; 3) численные методы моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород.

Научная новизна работы заключается в определении параметров природного напряженного состояния массива пород Ждановского месторождения и выявлении закономерностей изменения компонент тензора напряжений с глубиной посредством реконструкции геотехнической ситуации с использованием объемного численного геомеханического моделирования на основе анализа результатов натурных исследований НДС.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Породы, слагающие Ждановское месторождение, являются хрупкими и склонны к разрушению в динамической форме. Прочность пород при сжатии в массиве в 2,5-3 раза ниже прочности при сжатии в образцах за счет влияния структурной нарушенности. Коэффициент структурного ослабления k_c изменяется от 0,3 (для массивов туфогенно-осадочных пород и интрузивов ультраосновного состава) до 0,4 (для вмещающего массива интрузивов основного состава).

2. Тип природного напряженного состояния массива пород Ждановского месторождения является гравитационно-тектоническим. Соотношение главных компонент тензора напряжений составляет: $\sigma_{max(T_1)} : \sigma_{np(\gamma H)} : \sigma_{min(T_2)} = 1 : 0,5 : 0,4$. Тектонические составляющие отклоняются от горизонтали в диапазоне $\pm 25^\circ$, вектор σ_{max} направлен вдоль простирания рудных тел с азимутом $\approx 120^\circ$. Изменение тектонических компонент природного поля напряжений с глубиной до 1000 м описывается зависимостями: $\sigma_{max} = 0,05z + 6,5$; $\sigma_{min} = 0,02z + 2,5$, МПа.

3. Динамические разрушения в массиве пород Ждановского месторождения на глубинах от 500 м могут происходить в целиках, формируемых между фронтами очистных работ, и в зонах опирания подработанной толщи пород. С глубины 700 м такие разрушения возможны в окрестности всего выработанного пространства.

Достоверность научных положений и выводов обеспечена представительным количеством опытов и применением современного высокоточного оборудования при выполнении лабораторных и натурных исследований, точностью и надежностью методов математической статистики, применяемых при обработке результатов лабораторных испытаний, достаточной степенью сходимости при выполнении расчетов при моделировании НДС, а также верификацией результатов расчетов НДС данными визуальных наблюдений в подземных горных выработках Ждановского месторождения.

Личный вклад автора состоит в обработке, систематизации и анализе результатов лабораторных испытаний и натурных измерений параметров поля напряжений, выполнении натурных исследований по определению характеристик массива пород Ждановского месторождения, участии в постановке цели и задач исследования, разработке комплекса разномасштабных численных геомеханических моделей НДС, анализе и интерпретации результатов моделирования, сравнении их с данными натурных исследований, выявлении зон развития критических состояний массива горных пород и обосновании рекомендаций по геодинамически безопасному ведению горных работ.

Практическая значимость работы заключается в генерации численных геомеханических моделей на основании данных лабораторных испытаний образцов основных породных разностей, натурных исследований поля напряжений, визуальном обследовании состояния горных выработок, а также оценки характеристик массива горных пород Ждановского месторождения. Данный комплекс моделей используется на предприятии и позволяет определять области критических состояний массива пород в процессе выемки запасов рудных тел, разрабатываемых АО «Кольская ГМК».

Апробация работы.

1) XV Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования», г. Санкт-Петербург, 13-17 мая 2019 г.

2) XVI Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования». г. Санкт-Петербург, 17-19 июня 2020 г.

3) ISRM International Symposium EUROCK, г. Тронхейм, 2020 г.

4) ISRM International Symposium EUROCK, г. Турин, 2021 г.

5) XV Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Проблемы недропользования». г. Екатеринбург, 9-11 февраля 2021 г.

6) Импортозамещение в горной отрасли. Практики применения отечественного программного обеспечения в решении задач геомеханики и геотехники», г. Москва, 29 сентября 2021 г.

7) Геодинамика и напряженное состояние недр земли», г. Новосибирск, 4-8 октября 2021 г.

8) XVI Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Проблемы недропользования», г. Екатеринбург, 9-11 февраля 2022 г.

9) XVII Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Проблемы недропользования», г. Екатеринбург, 7-10 февраля 2023 г.

10) XIX Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования», г. Санкт-Петербург, 22-27 мая 2023 г.

11) Конференция «Цифровые технологии в горном деле», г. Апатиты, 13-16 июня 2023 г.

Публикации. Результаты исследований опубликованы в 9 печатных работах. Из них 5 работ – в изданиях, рекомендованных ВАК, 3 - в изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 155 страниц машинописного текста, включая 96 рисунков, 24 таблицы, список использованной литературы из 165 наименований и 6 Приложений.

Автор выражает благодарность за наставничество, помощь в освоении теоретических и прикладных аспектов выбранного направления исследования, подходов к разработке численных геомеханических моделей и интерпретации результатов моделирования НДС, систематизации данных натурных определений и формулировке научных положений научному руководителю – ведущему научному сотруднику, руководителю отдела Геомеханики Горного института КНЦ РАН, к.т.н. Семенову И.Э.

Особая роль в процессе выполнения данного диссертационного исследования принадлежит Заслуженному деятелю науки Российской Федерации д.т.н., профессору Козыреву А.А. С его непосредственным участием были определены направление и тема работы, выделены наиболее важные исследовательские вопросы, установлены цель и задачи, предложена структура диссертации. Знания, опыт и профессионализм Анатолия Александровича оказали огромное влияние и стали неоценимым ресурсом в процессе выполнения диссертационного исследования, а благодаря рекомендациям и критическим замечаниям удалось глубже понять изучаемую тему и значительно улучшить качество работы. Пример и заслуги Анатолия Александровича не только обогатили понимание предмета, но и мотивировали к дальнейшей научной деятельности.

Автор благодарит за ценную помощь и консультирование на всех этапах выполнения диссертационного исследования к.т.н. Земцовского А.В. За методическую и техническую помощь при выполнении и интерпретации результатов моделирования сотрудников отдела Геомеханики Горного института КНЦ РАН: к.т.н. Аветисяна И.М., н.с. Дмитриева С.В. За выполнение лабораторных исследований, поддержку и экспертизу к.т.н. Кузнецова Н.Н. За обсуждение результатов исследования д.т.н. Макарова А.Б. За выполнение трудоемких натуральных измерений ведущим технологом Данилову И.В., Потокину М.И., Некрасову В.А., технологу Потемковскому С.В. За консультирование и анализ результатов визуальных обследований горных выработок ведущему инженеру Пантелееву А.В. За обработку результатов геотехнического описания керна скважин ведущему инженеру Целовальниковой О.Н. За внимание к работе и ценные советы д.т.н. Рыбину В.В. За предоставление информации и помощь в организации проведения работ главному маркшейдеру АО «Кольская ГМК» Временкову С.В. и коллективам маркшейдерского и геологического отделов рудника «Северный» АО «Кольская ГМК».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выполненных исследований, дана оценка степени разработанности темы исследования, поставлены цель и задачи, сформулирована идея работы, приведены защищаемые научные положения, научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

В первой главе приведена характеристика геологических и горнотехнических особенностей Ждановского месторождения, выполнен обзор методов изучения параметров полей действующих напряжений. Приведен анализ результатов выполненных исследований по теме работы.

Во второй главе проанализированы результаты лабораторных исследований физико-механических свойств основных породных разностей Ждановского месторождения. Приведена оценка склонности пород месторождения к разрушению в динамической форме с использованием нескольких критериев. Представлены результаты определения характеристик массива пород по данным натуральных исследований и определены коэффициенты структурного ослабления для основных породных разностей с учетом влияния структурной неоднородности.

В третьей главе выполнена реконструкция параметров природного напряженного состояния массива пород Ждановского месторождения с использованием численного моделирования НДС на основе результатов натурных исследований. Определены тип напряженного состояния нетронутого массива пород, соотношение главных компонент тензора напряжений и направления их действия. Получена зависимость изменения главных компонент напряжений с глубиной.

В четвертой главе выполнено геомеханическое обоснование безопасного ведения горных работ при отработке запасов Ждановского месторождения на основе численного моделирования НДС. Предложен порядок развития очистных работ в пределах подэтажей, выполнена оценка вариантов опережений и состояния приконтурного массива с использованием разномасштабных численных геомеханических моделей.

В заключении приведены основные выводы и результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

Основные результаты исследований отражены в следующих защищаемых научных положениях:

1. Породы, слагающие Ждановское месторождение, являются хрупкими и склонны к разрушению в динамической форме. Прочность пород при сжатии в массиве в 2,5-3 раза ниже прочности при сжатии в образцах за счет влияния структурной нарушенности. Коэффициент структурного ослабления k_c изменяется от 0,3 (для массивов туфогенно-осадочных пород и интрузивов ультраосновного состава) до 0,4 (для вмещающего массива интрузивов основного состава).

С целью оценки склонности горных пород к удароопасности выполняют лабораторные испытания образцов, включающие исследования широкого спектра физико-механических характеристик. Определение свойств породных разностей также важно для корректной оценки и прогноза геомеханической ситуации при моделировании НДС в процессе развития горных работ.

В результате анализа лабораторных исследований образцов пород и руд Ждановского месторождения определено, что в пределах всех литологических разностей наблюдается сильная неоднородность значений физико-механических свойств. В результате статистической обработки определено, что породные разности могут быть сгруппированы в три домена по принципу статистического соответствия физико-механических свойств. Первый домен включает интрузивные породы, слагающие рудные тела, второй – интрузивы вмещающего массива; к третьему домену относятся породы туфогенно-осадочного происхождения.

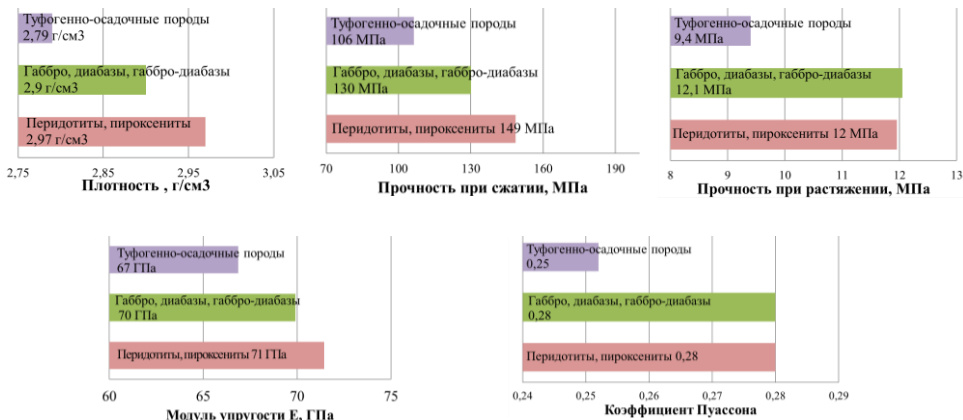


Рисунок 1 – Значения основных физико-механических характеристик доменов пород Ждановского месторождения

Значения основных физико-механических характеристик породных доменов представлены в виде диаграмм на рисунке 1. Установлено, что наименьшими средними значениями прочности при сжатии характеризуются породы туфогенно-осадочного происхождения (106 МПа). Далее по увеличению значений прочностных характеристик следуют породы основного состава: габбро, диабазы и габбро-диабазы (130 МПа). Наибольшими значениями прочности характеризуются породы, слагающие рудные тела (перидотиты) и приуроченные к ним пироксениты (149 МПа).

Выполнена оценка склонности пород Ждановского месторождения к разрушению в динамической форме и удароопасности с использованием нескольких критериев. Определено, что практически все исследованные образцы пород Ждановского месторождения демонстрируют склонность к хрупкому разрушению, и среднее соотношение $\sigma_{сж}/\sigma_p \approx 10$. Также выполнена оценка склонности пород к горным ударам с использованием анализа потенциала удароопасности по критерию П. Кайзера, отражающего зависимость между коэффициентом хрупкости и значением прочности образцов пород при одноосном сжатии (рисунок 2). Примерно половина образцов пород находится в области, характеризующейся отсутствием потенциала удароопасности (точки ниже синей кривой), а около половины образцов относятся в какой-либо степени к потенциально удароопасным породам (точки выше синей кривой).

Для основных породных разностей Ждановского месторождения была выполнена оценка удароопасности по критерию Горного института КНЦ РАН. В результате анализа графиков деформирования определено, что практически все кривые допредельной области деформирования близки к линейному виду, либо имеют выпуклую форму. Типичная форма кривой графика в зоне упругого деформирования для образцов пород Ждановского месторождения показана на рисунке 3. При этом разница между расчетной фактической и идеально упругой

энергией деформирования составляет менее 10%, что говорит о потенциальной удароопасности исследованных пород.

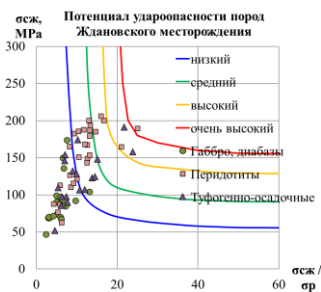


Рисунок 2 - Потенциал удароопасности основных породных разностей Ждановского месторождения по критерию П. Кайзера

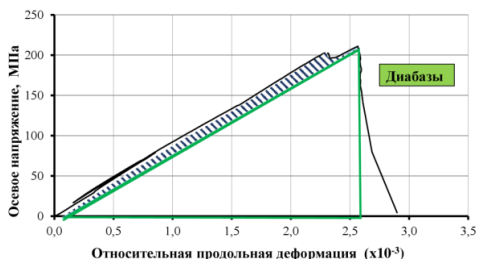


Рисунок 3 - График деформирования образцов при одноосном сжатии для диабазов

Выполнено определение склонности горных пород к удароопасности на образцах по значению коэффициента удароопасности K_y согласно методике А.Н. Ставрогина. Данный метод является фундаментальным и единственным из описанных выше методов, регламентированным в нормативных документах Российской Федерации по оценке удароопасности месторождений. Установлено, что значения коэффициента удароопасности K_y практически для всех образцов меньше единицы ($K_y = E/M < 1$), что говорит о склонности к удароопасности всех исследованных породных разностей месторождения. Результаты испытаний проиллюстрированы на рисунке 4.

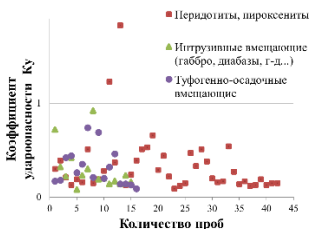


Рисунок 4 - Диаграмма распределения коэффициента удароопасности K_y для образцов пород Ждановского месторождения

Массив горных пород в большинстве случаев пересечен трещинами, их системами и иными неоднородностями разных порядков. Наличие структурной неоднородности зачастую влияет на свойства массивов, снижая их прочностные и другие физико-механические параметры. Для оценки качественных характеристик массива пород Ждановского месторождения были определены рейтинговые показатели на основании результатов геотехнического описания керна скважин и

картирования обнажений подземных горных выработок (таблица 1). Оценка качества массива выполнена по трем системам рейтинговых классификаций: *Q-system* (система Н. Бартона), *RMR-system* (система З. Бенявского, 1989) и *GSI* (Э. Хука).

Таблица 1 – Средние значения основных качественных характеристик породных доменов Ждановского месторождения по данным геотехнического описания керна скважин и картирования обнажений выработок

<i>RQD</i>	<i>Q</i>	<i>Q'</i>	<i>RMR</i> _{89Basic}	$GSI_{2013} = (52 \cdot J_r / J_a) / (1 + J_r / J_a) + RQD / 2$
Перидотиты				
Геотехническое описание керна				
90	2,1	10,4	60	57
Картирование горных выработок				
86	1,4	2,7	53	57
Габбро, диабазы, габбро-диабазы				
Геотехническое описание керна				
98	7,0	35,2	68	69
Картирование горных выработок				
90	5,5	5,1	60	64
Туфогенно-осадочные породы				
Геотехническое описание керна				
97	0,6	29,4	68	69
Картирование горных выработок				
77	5,3	3,1	56	59

Коэффициент структурного ослабления массивов основных породных доменов k_c определен с применением нескольких методик: 1) по степени нарушенности массива согласно СП 91.13330.2012; 2) по частоте трещин (FF) и их ориентировке относительно действия максимальной компоненты напряжений; 3) с применением геологического индекса прочности Э. Хука (*GSI*). Результаты определения k_c представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты определения k_c массива пород Ждановского месторождения, полученные с использованием различных методик

k_c (СП 91.13330.2012)	k_c (методика ВНИМИ)	k_c (<i>GSI</i>)
Перидотиты		
Геотехническое описание керна		
0,4	0,4	0,3
Картирование горных выработок		
0,4	0,4	0,3
Габбро, диабазы, габбро-диабазы		
Геотехническое описание керна		
0,4	0,3	0,4
Картирование горных выработок		
0,4	0,25	0,3
Туфогенно-осадочные породы		
Геотехническое описание керна		
0,4	0,7	0,3
Картирование горных выработок		
0,4	0,5	0,2

В результате анализа значений коэффициентов структурного ослабления массива пород Ждановского месторождения, полученных по нескольким методикам и их соотношений, определено, что наиболее соответствующим образом отражают особенности разрушения массива, наблюдаемые в условиях месторождения, k_c , определенные согласно обобщенному критерию прочности Хука-Брауна: для вмещающих пород туфогенно-осадочного происхождения и пород, слагающих рудные тела $k_c = 0,3$; для вмещающих интрузивных пород $k_c = 0,4$.

2. Тип природного напряженного состояния массива пород Ждановского месторождения является гравитационно-тектоническим. Соотношение главных компонент тензора напряжений составляет: $\sigma_{max}(T_1) : \sigma_{np}(\gamma_H) : \sigma_{min}(T_2) = 1 : 0,5 : 0,4$. Тектонические составляющие отклоняются от горизонтали в диапазоне $\pm 25^\circ$, вектор σ_{max} направлен вдоль простирания рудных тел с азимутом $\approx 120^\circ$. Изменение тектонических компонент природного поля напряжений с глубиной до 1000 м описывается зависимостями: $\sigma_{max} = 0,05z + 6,5$; $\sigma_{min} = 0,02z + 2,5$.

Для определения величин и направлений действия главных компонент напряжений, формирующих природное поле, проводят комплекс натурных исследований, в том числе визуальное обследование подземных горных выработок и инструментальные измерения с применением различных методов.

В результате анализа особенностей распределения характерных признаков динамических проявлений горного давления при визуальном обследовании на глубинах до 500 м от дневной поверхности получены следующие закономерности:

1. Максимальным разрушениям подвержены выработки, находящиеся в зонах влияния очистных работ и в областях воздействия пригрузок от консольно зависших пород всячего бока.

2. Наибольшей степени разрушения приконтурной части выработок подвержены выработки штрекового направления.

3. Зоны разрушения в подавляющем большинстве случаев приурочены к областям сопряжения боков и кровли выработок. Данный вид разрушения косвенно указывает на преобладание тектонической составляющей поля напряжений над гравитационной.

4. На степень разрушения выработок оказывают существенное влияние трещиноватость массива и наличие тектонических зон контактов рудных тел и вмещающих пород.

Для определения величин и направлений действия главных компонент напряжений в массиве пород Ждановского месторождения выполнены измерения методом полной разгрузки. На рисунке 5 показан график, отражающий изменение значений главных компонент напряжений с глубиной по данным восьми измерений. Красными точками показаны измеренные значения σ_{max} , зелеными – σ_{np} , синими – σ_{min} .

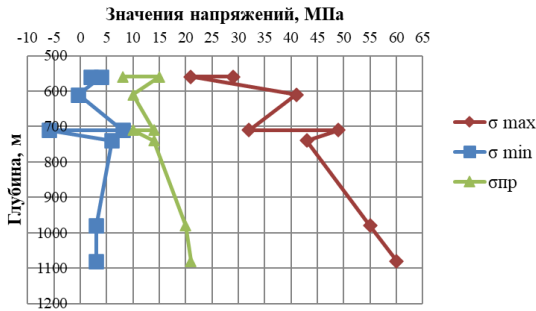


Рисунок 5 – Изменение величин главных компонент напряжений (σ_{max} , σ_{np} и σ_{min}) с глубиной по результатам измерений методом полной разгрузки в массиве пород Ждановского месторождения

По результатам измерений определено, что максимальная и минимальная компоненты напряжений (σ_{max} и σ_{min}) направлены субгоризонтально и являются тектоническими, а промежуточная компонента (σ_{np}) направлена субвертикально является гравитационной. Соотношение главных компонент тензора напряжений составляет: $\sigma_{max(T_1)} : \sigma_{np(\gamma H)} : \sigma_{min(T_2)} = 1 : 0,3 : 0,1$. Соответственно, можно сделать вывод о том, что поле напряжений на данных участках массива является гравитационно-тектоническим.

Направления действия максимальной сжимающей компоненты напряжений варьируют в пределах азимута $120-150^\circ$ ($300-330^\circ$), при этом генеральное направление главных компонент напряжений, полученное при измерениях в массиве, соответствует направлению простираению основных рудных тел Ждановского месторождения (рисунок 6).

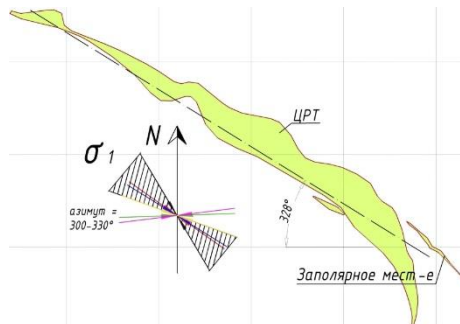


Рисунок 6 - Ориентация максимальной компоненты напряжений относительно простираения рудных тел Ждановского месторождения по данным измерений методом полной разгрузки

Станции измерения напряжений были расположены в выработках вмещающего массива на максимально возможном в существующих технологических условиях

удалении от очистного пространства, но это расстояние оказалось недостаточным для получения параметров НДС нетронутого массива.

С целью оценки и прогнозирования геомеханической ситуации в процессе ведения горных работ в настоящее время широко применяют моделирование НДС. Для восстановления параметров природного поля напряжений в *CAE SigmaGT* сгенерирован комплекс моделей, в которых учитывалось актуальное положение горных работ на момент выполнения каждого из замеров. Результаты моделирования сравнивались с результатами измерений, затем вносились корректировки в параметры нагрузок на грани модели и заново выполнялся расчет. В конечном итоге был определен вариант, отражающий результаты измерений для каждой из станций (рисунок 7).

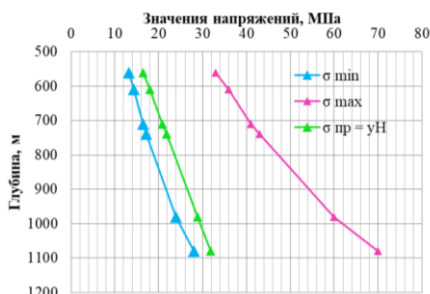


Рисунок 7 - Результат реконструкции главных компонент природного поля напряжений массивов пород Ждановского месторождения в интервалах глубин измерений

Результаты моделирования исходного и измененного полей напряжений вблизи одной из замерных станций приведены на рисунке 8.

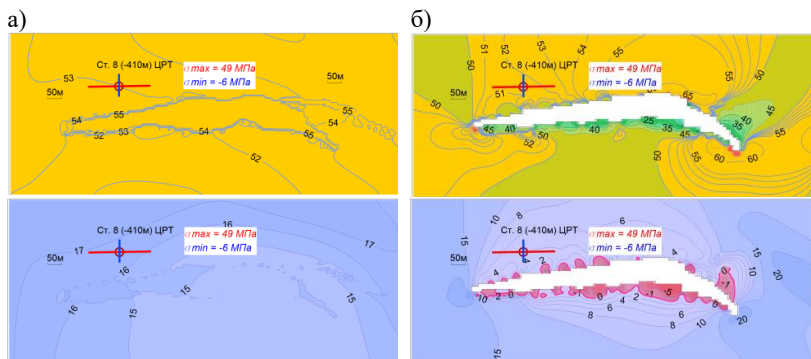


Рисунок 8 - Сравнение результатов моделирования исходного (а) и измененного (б) полей напряжений

Таким образом, в результате восстановления параметров природного напряженного состояния массива пород Ждановского месторождения с использованием метода численного моделирования НДС определено соотношение главных компонент исходного поля напряжений: $\sigma_{max(T_1)} : \sigma_{np(\gamma H)} : \sigma_{min(T_2)} = 1 : 0,5 : 0,4$.

Для прогноза изменения значений главных компонент напряжений с глубиной, выполнена интерполяция и экстраполяция до верхней и нижней границ модели в абсолютных отметках от +300 м до -1600 м. Рассмотрено два возможных варианта изменения напряжений с глубиной: по линейному закону и с замедлением роста тектонических компонент напряжений (рисунок 9).

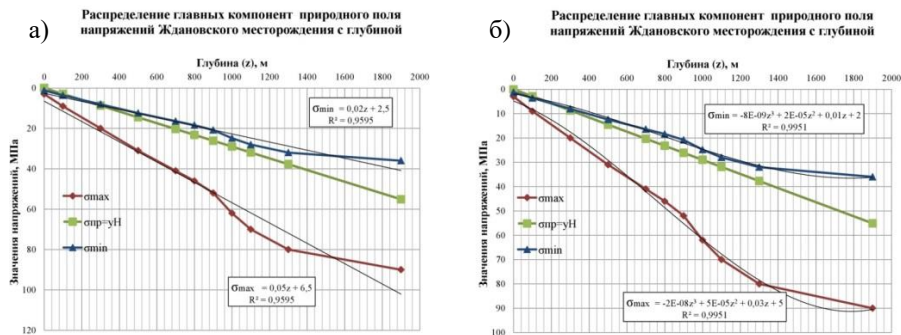


Рисунок 9 - Прогноз изменения главных компонент природного поля напряжений массива пород Ждановского месторождения с глубиной: а) с линейной аппроксимацией; б) с учетом замедления роста тектонических компонент поля напряжений

Определены зависимости изменения главных компонент напряжений с глубиной. С линейной аппроксимацией:

$$\sigma_{max} = 0,05z + 6,5, \text{ МПа}; \quad (1)$$

$$\sigma_{min} = 0,02z + 2,5, \text{ МПа}; \quad (2)$$

с учетом замедления роста тектонических компонент поля напряжений:

$$\sigma_{max} = -2 \cdot 10^{-8} z^3 + 5 \cdot 10^{-5} z^2 + 0,03z + 5, \text{ МПа}; \quad (3)$$

$$\sigma_{min} = -8 \cdot 10^{-9} z^3 + 2 \cdot 10^{-5} z^2 + 0,01z + 2, \text{ МПа}. \quad (4)$$

3. Динамические разрушения в массиве пород Ждановского месторождения на глубинах от 500 м могут происходить в целиках, формируемых между фронтами очистных работ, и в зонах опирания подработанной толщи пород. С глубины 700 м такие разрушения возможны в окрестности всего выработанного пространства.

В результате натурных исследований состояния массива пород Ждановского месторождения установлено, что при определенных условиях породы на контуре

подземных выработок и участки массива разрушаются в динамической форме. Соответственно, важнейшими задачами исследования являлось определение условий и закономерностей формирования зон критических состояний массива с целью прогноза геомеханической ситуации и разработки мероприятий по минимизации потенциальных разрушений. Для геомеханического обоснования безопасного ведения горных работ, прогноза трансформации напряженно-деформированного состояния и определения областей развития критических состояний массива пород Ждановского месторождения в процессе ведения горных работ был разработан комплекс разномасштабных численных геомеханических моделей.

Первоначально рассмотрены варианты актуального и перспективного положения очистных работ в отметках -460 м, -510 м, -610 м, -710 м Центрального рудного тела для оценки трансформации НДС по мере отработки запасов (рисунок 10).

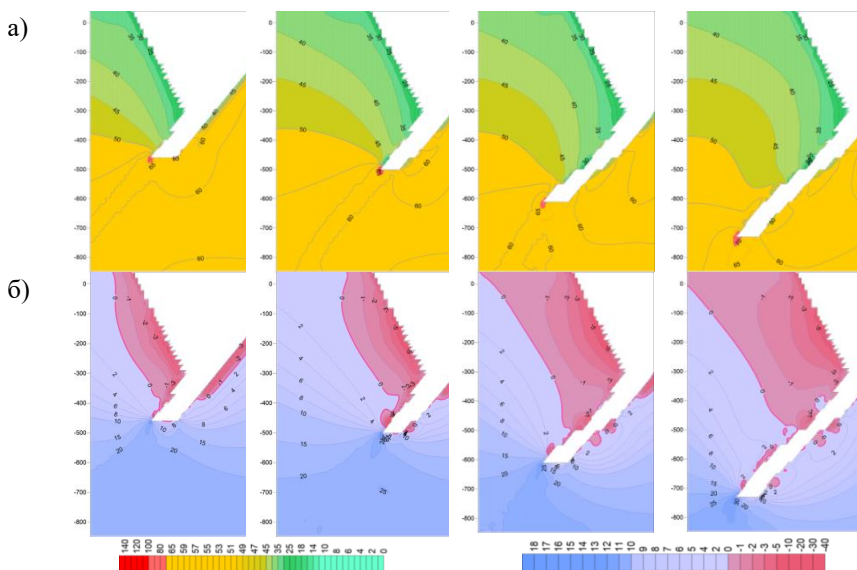


Рисунок 10 – Трансформация σ_{max} (а) и σ_{min} (б) по мере развития подземных горных работ в сечении по разрезу 14 ЦРТ

В результате анализа данных моделирования для всех вариантов последовательного развития очистной выемки можно заключить, что трансформацию поля напряжений характеризуют два процесса: пригрузка массива горных пород σ_{max} под очистными выемками (рисунок 10 а) и развитие процессов обрушения подработанной толщи пород за счет формирования зон растягивающих напряжений σ_{min} (рисунок 10 б). Фоновые величины σ_{max} в районе перспективной выемки запасов имеют значения более 60 МПа, что составляет порядка 40-50% от прочности при сжатии в образцах. Это говорит о вероятности начальных проявлений

динамических форм горного давления при ведении горных работ на данных глубинах с учетом критерия удароопасности. В массиве консолидно зависших пород выделяются зоны с критическими значениями σ_{min} , соответственно в этих областях возможны разрушения, вызванные влиянием растягивающих напряжений и образованием трещин отрыва.

Помимо процесса углубления горных работ существуют факторы, связанные с технологическими решениями при отработке запасов в пределах этажей и подэтажей, осложняющие геомеханическую ситуацию: например, развитие очистных работ от нескольких разрезов с формированием целиков между сближающимися фронтами. Рассмотрен в общем виде процесс изменения НДС при отработке запасов встречными фронтами. Промоделирован участок постепенного сближения горных работ на горизонте -460 м ЦРТ (рисунок 11).

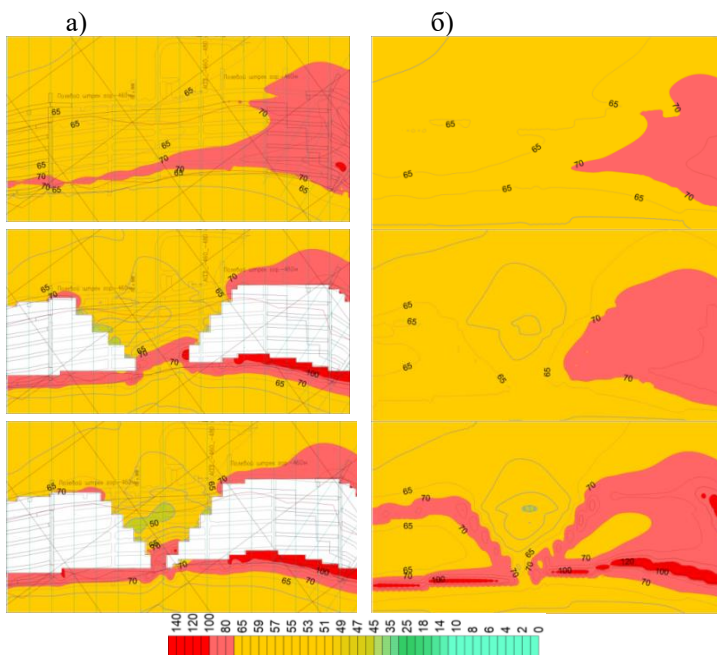


Рисунок 11 – Изменение σ_{max} в области формирования целика по мере развития горных работ встречными фронтами: а) на гор. -460 м; б) на гор. -490 м

Из рисунка 11 видно, что пригрузка массива происходит как на горизонте, где непосредственно формируется целик (отм.-460 м), так и на нижележащем подэтаже (отм.-490 м). Значения σ_{max} в областях концентрации достигают более половины предела прочности при одноосном сжатии в образцах, соответственно, в этих зонах возможны динамические проявления горного давления. Результаты, полученные при моделировании, подтверждаются фактом разрушения целиков в пределах обрабатываемых запасов Ждановского месторождения, образованных при

нерациональном порядке ведения горных работ. Таким образом, в результате численного геомеханического моделирования установлено, что **динамические разрушения в массиве пород Ждановского месторождения на глубинах от 500 м могут происходить в целиках, формируемых между фронтами очистных работ**, что подтверждается натурными исследованиями.

Для снижения геомеханических и геодинамических рисков при отработке запасов в высоконапряженных массивах применяется разгрузка областей активного ведения горных работ. С целью определения наиболее благоприятной последовательности ведения очистных работ в масштабах блока с точки зрения устойчивости массива пород Ждановского месторождения были рассчитаны варианты: 1) с опережением по лежачему боку; 2) с опережением по висячему боку; 3) развитие горных работ фронтом, вытянутым вкрест простирания рудного тела без опережений. Результаты сравнивали с фоновым полем напряжений до проведения отбойки (рисунок 12).

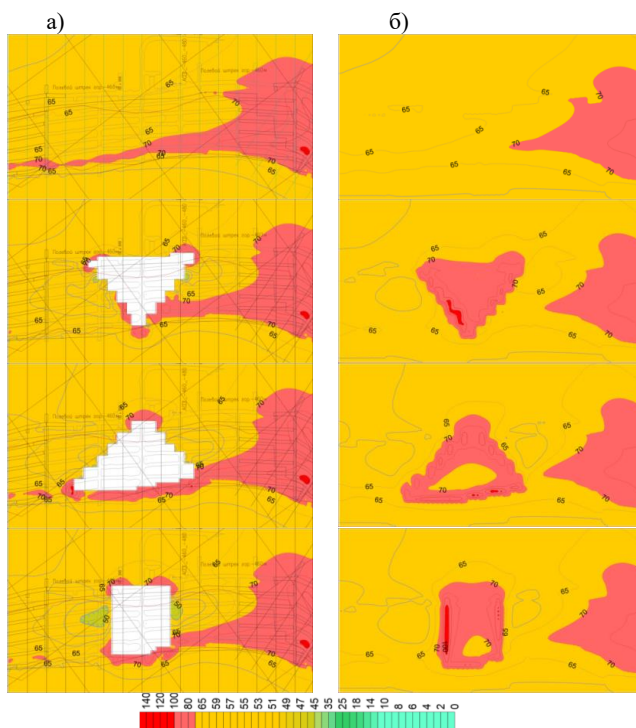


Рисунок 12 – Распределение σ_{max} при различных вариантах опережений очистных работ: а) на гор. -460 м; б) на гор. -490 м

При анализе данных вариантов определены существенные различия в формировании зон концентрации напряжений и разгрузки массива. Наиболее выраженный эффект разгрузки как по площади, так и по абсолютным величинам

действующих максимальных сжимающих напряжений, проявляется при развитии отбойки с опережением по висячему боку. В этом случае весь массив к лежащему боку от опережения оказывается в защищенной зоне, где значения σ_{max} на 50% ниже, чем при развитии горных работ без опережений, и на 20%, чем при развитии с опережением по лежащему боку (рисунок 13).

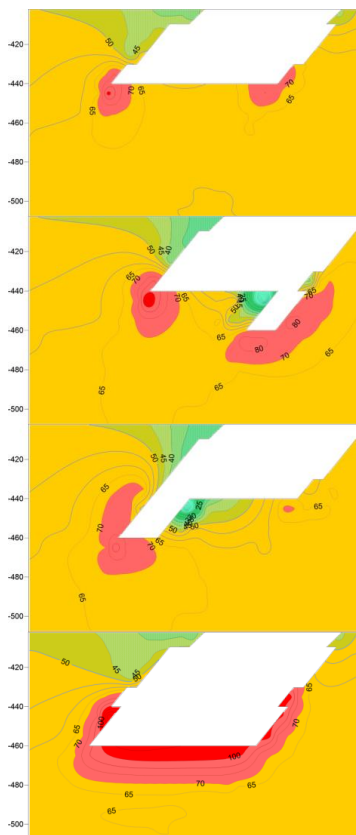


Рисунок 13 – Распределение σ_{max} при различных вариантах опережений очистных работ по разрезу вкрест простирания

Для оценки устойчивости подземных горных выработок и определения зон, опасных с точки зрения потенциального динамического разрушения, необходимо рассмотрение закономерностей изменения параметров НДС в приконтурном массиве. Для этого выполнено локальное моделирование напряженного состояния в областях массива вокруг основных типов выработок, применяемых на руднике «Северный»: полевого штрека (ПШ), буродоставочного штрека (БДШ) и орта гор.-460 м ЦРТ (рисунок 14).

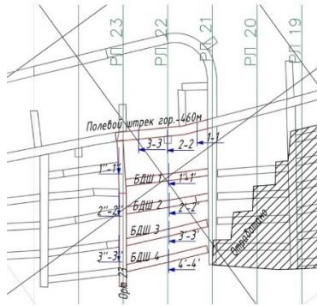


Рисунок 14 – Схема участка массива гор. -460 м с моделируемыми выработками

Результаты моделирования НДС приконтурного массива ПШ в пр. 21-23 гор. -460 м представлены на рисунке 15. Для оценки изменения σ_{max} поля напряжений вокруг выработок исследуемого участка рассматривали два этапа: до проведения выработки и после.

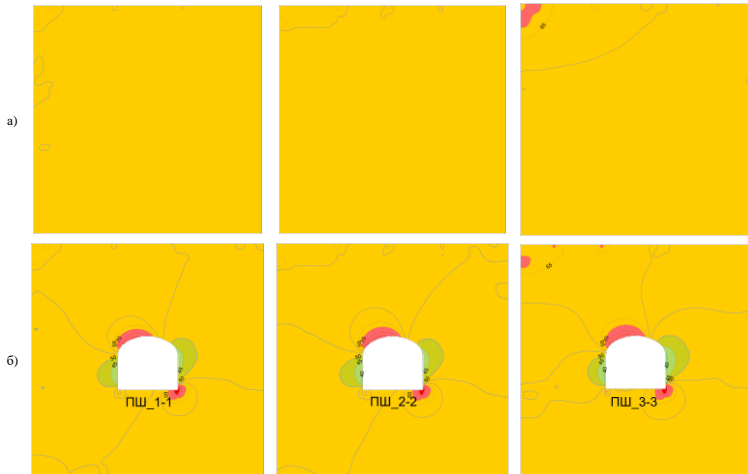


Рисунок 15 – Распределение σ_{max} в приконтурном массиве полевого штрека в разрезах 21-23 гор. -460 м: а) до проведения выработки; б) после проведения выработки

Для массива пород полевого штрека гор.-460 м зона концентрации повышенных значений сжимающих напряжений приурочена к области массива, испытывающей пригрузку от очистного пространства вышележащего подэтажа. Глубина зоны потенциального разрушения приконтурной части выработки составляет около 1 м.

Выполнено сравнение результатов визуального обследования полевых выработок штрекового направления с данными численного моделирования НДС. Зона фактического разрушения на контуре расположена в области сопряжения

кровли и бока выработки и соответствует положению расчетной зоны концентрации напряжений σ_{max} (рисунок 16), что подтверждает адекватность полученных результатов моделирования при сравнении с фактическим состоянием массива пород месторождения.

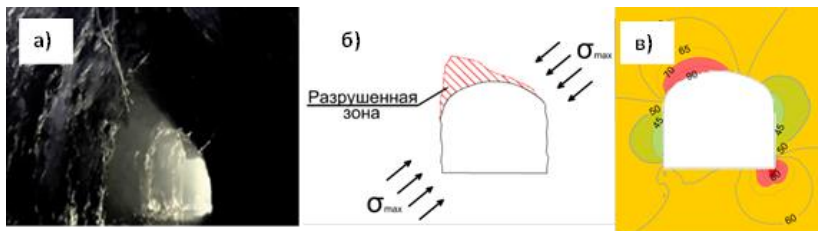


Рисунок 16 – Местоположение зон разрушения приконтурного массива полевого штрека ЦРТ: а) фото типичной формы разрушения ПШ ЦРТ; б) схема разрушения ПШ по результатам визуального обследования; в) распределение σ_{max} по результатам локального моделирования

Результаты моделирования НДС приконтурного массива орта 23 гор. -460 м представлены на рисунке 17 в последовательности от лежачего к висячему боку ЦРТ.

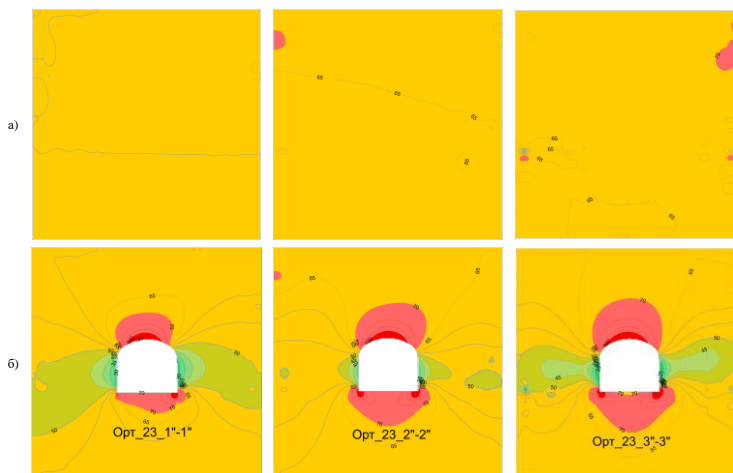


Рисунок 17 – Распределение σ_{max} в приконтурном массиве орта 21 гор. -460 м в последовательности от лежачего к висячему боку ЦРТ: а) до проведения выработки; б) после проведения выработки

По результатам моделирования определено, что в приконтурном массиве пород орта 23 гор.-460 м происходит увеличение зон концентрации напряжений в районах кровли и подошвы в направлении от лежачего к висячему боку рудного тела, что обусловлено влиянием пригрузки от консольно зависших пород в области опирания

и от очистного пространства соседнего блока. Глубина зоны потенциального разрушения приконтурной части выработки составляет около 1 м, а зоне пригрузки – первые метры.

Результаты моделирования НДС приконтурного массива буродоставочных штреков 1-4 (в направлении от лежачего к висячему боку ЦРТ), пройденных в разрезах 21-23 гор. -460 м, представлены на рисунке 18.

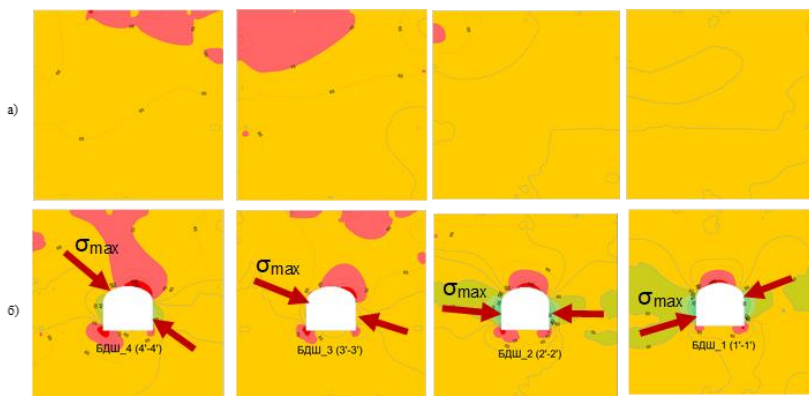


Рисунок 18 – Распределение и направление действия σ_{max} в приконтурном массиве БДШ 1-4 гор. -460 м в направлении от лежачего к висячему боку ЦРТ: а) до проведения выработки; б) после проведения выработки

В массиве пород, в котором пройдены буродоставочные штреки 1-4 по разрезу 22 гор.-460 м, ориентация максимального сжатия изменяется: вектора σ_{max} разворачиваются, огибая вышележащее очистное пространство (рисунок 19). Зоны концентрации максимального сжатия приурочены к областям кровли и сопряжений кровли с боками выработок.

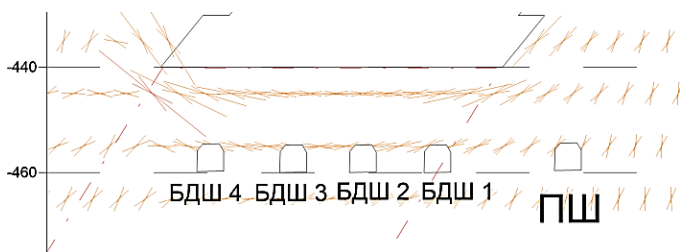


Рисунок 19 – Векторное распределение σ_{max} вокруг очистного пространства гор.-440 м, разрез 22

В результате анализа данных численного моделирования НДС массива пород Ждановского месторождения на разных масштабных уровнях определено, что на данном этапе ведения горных работ (до 500 м) значения максимальной компоненты

тензора напряжений достигают уровня критических для реализации разрушения в динамической форме в зонах опирания подработанной толщи пород и в целиках, формируемых между сближающимися фронтами очистных работ. С углублением горных работ уровень действующих напряжений растет, при этом повышается вероятность возникновения разрушений, а на глубинах свыше 700 м динамические разрушения возможны в окрестности всего выработанного пространства без какой-либо локализации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационном исследовании решена актуальная научная задача, связанная с определением геомеханических характеристик массива пород Ждановского месторождения и обоснованием безопасного ведения горных работ. Основные научные выводы и практические результаты заключаются в следующем:

1. Установлено, что все породы и руды Ждановского месторождения имеют значительные величины предела прочности ($\sigma_{сж}$) на сжатие и относятся к скальным. Среднее значение $\sigma_{сж}$ для интрузивов ультраосновного состава (перидотитов и пироксенитов) составляет 149 МПа, для интрузивов основного состава (габбро, габбро-диабазов, диабазов) - 130 МПа, для пород туфогенно-осадочного происхождения и филлитов - 106 МПа. Все породы и руды Ждановского месторождения являются хрупкими и потенциально удароопасными.

2. В результате исследования качественных характеристик массивов определены коэффициенты структурного ослабления k_c : для вмещающих пород туфогенно-осадочного происхождения и пород, слагающих рудные тела $k_c = 0,3$; для вмещающих интрузивных пород $k_c = 0,4$.

3. На основании результатов натурных измерений при реконструкции параметров природного поля напряжений Ждановского месторождения с использованием численного моделирования определено, что тип природного напряженного состояния массива пород Ждановского месторождения является гравитационно-тектоническим. Максимальная компонента напряжений действует субгоризонтально направлена по простиранию рудных тел. Определены соотношения главных компонент природного поля напряжений Ждановского месторождения: $\sigma_{max} : \sigma_{np} : \sigma_{min} = 1 : 0,5 : 0,4$. Коэффициенты бокового давления ($\lambda = \sigma_{гор}/\sigma_{верт}$) равны соответственно $\lambda_1 = \sigma_{max}/\sigma_{np} = 2$, $\lambda_2 = \sigma_{min}/\sigma_{np} = 0,8$.

4. Выполнен прогноз изменения значений главных компонент природного поля напряжений массива пород Ждановского месторождения с глубиной до 1000 м в двух вариантах: с линейной аппроксимацией: $\sigma_{max} = 0,05 \cdot z + 6,5$, МПа; $\sigma_{min} = 0,02 \cdot z + 2,5$, МПа; с учетом замедления роста тектонических компонент:

$$\sigma_{max} = -2 \cdot 10^{-8} z^3 + 5 \cdot 10^{-5} z^2 + 0,03z + 5, \text{ МПа}; \sigma_{min} = -8 \cdot 10^{-9} z^3 + 2 \cdot 10^{-5} z^2 + 0,01z + 2, \text{ МПа}.$$

5. В результате разработки комплекса разномасштабных 3D численных геомеханических моделей НДС Ждановского месторождения обоснованы наиболее безопасный и рациональный порядок отработки запасов рудных тел в пределах подэтажа, а также конфигурация опережений очистной выемки в масштабах блока (блоков). Установлены особенности НДС в приконтурных массивах подземных выработок. Полученные параметры НДС массива подтверждают высокую

вероятность проявления динамических форм горного давления ниже отметки -430 м, что соответствует глубине 700 м от дневной поверхности.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

- В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Kulkova M.S.**, Zemtsovsky A.V. Optimizing parameters of stopes and pillars for the Zhdanov deposit mining // Eurasian mining. 2019. № 1. С. 13-15.

2. **Кулькова М.С.**, Земцовский А.В. Оценка устойчивости массива при стадийной отработке запасов линзы Ждановского месторождения по результатам моделирования его напряженнодеформированного состояния // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 5-2. С. 103-110.

3. Козырев А.А., Земцовский А.В., **Кулькова М.С.**, Соннов М.А. Опыт применения САЕ Fidesys при разработке численных геомеханических моделей Ждановского месторождения // Горная промышленность. № 6. С. 94-98.

4. Семенова И.Э., Розанов И.Ю., **Кулькова М.С.** Комплексное исследование параметров обрушения подработанной толщи пород Ждановского месторождения // Горный журнал. 2023. № 12. С. 49-54.

5. Семенова И.Э., Константинов К.Н., **Кулькова М.С.** Оценка напряженнодеформированного состояния массива пород в окрестности подземных выработок глубокого заложения комплексом инструментальных и численных методов // Горный журнал. 2024. № 1. С. 22-28.

- В изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus:

1. Semenova I.E., **Kulkova M.S.** Creation of a numerical geomechanical model for the Zhdanovskoe ore deposit // ISRM International Symposium - EUROCK 2020.

2. Kozyrev A.A., Zemtsovskii A.V., **Kulkova M.S.** The estimation of the rock mass stress state of the Zhdanovskoe deposit, Kola MMC // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019, Vol. 1. Proceedings of the XV International Forum-Contest of Students and Young Researchers under the auspices of UNESCO. 2020. CRC Press. Pp. 189-196.

3. Semenova I.E., **Kulkova M.S.** The stress distribution around the mining excavations under different tectonic loads // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. V. 833. Pp. 012127.

- В прочих изданиях:

1. **Кулькова М.С.** Применение аналитического и численного методов исследования для определения оптимальных параметров камер и целиков при отработке Ждановского месторождения // Вестник Кольского научного центра РАН. 2019. № 1 (11). С. 42-49.