

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
"КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК"  
(ФИЦ КНЦ РАН)

ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ  
(ГоИ КНЦ РАН)

*На правах рукописи*



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»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук  
Семенова Инна Эриковна

г. Апатиты,

2024г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ОБЗОР МЕТОДОВ, ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	10
1.1. Актуальность проблематики и предмета исследования.....	10
1.2. Характеристика Ждановского месторождения.....	12
1.2.1. Общие сведения.....	12
1.2.2. Геологическая характеристика месторождения.....	14
1.2.3. Климатические и природно-географические условия.....	17
1.2.4. Параметры системы разработки и порядок отработки запасов.....	17
1.3. Обзор методов исследования геомеханических характеристик массива горных пород.....	19
1.3.1. Обзор методов определения характеристик образцов и массивов пород.....	20
1.3.2. Обзор методов исследования параметров напряженного состояния массива пород.....	25
1.3.3. Обзор наиболее распространенных критериев оценки прочности.....	35
1.3.4. Критерий удароопасности массивов пород Горного института КНЦ РАН.....	39
1.4. Выполненные ранее исследования и научная новизна работы.....	40
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ И ХАРАКТЕРИСТИК МАССИВА ПОРОД ЖДАНОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ.....	46
2.1. Исследование физико-механических свойств горных пород и оценка их склонности к динамическому разрушению.....	46
2.1.1. Анализ и обобщение результатов лабораторных исследований физико-механических характеристик основных породных разностей.....	47
2.1.2. Определение склонности горных пород к разрушению в динамической форме.....	51
2.2. Определение коэффициента структурного ослабления массива пород Ждановского месторождения на основе исследований качественных характеристик.....	59
2.2.1. Натурные исследования качественных характеристик массива пород.....	60
2.2.2. Определение коэффициентов структурного ослабления.....	65
ГЛАВА 3. РЕКОНСТРУКЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИРОДНОГО ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ ЖДАНОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ.....	74
3.1. Результаты натурных исследований параметров напряженного состояния массива.....	74
3.1.1. Визуальное обследование состояния горных выработок.....	75
3.1.2. Исследование параметров поля напряжений по разрушению стенок вертикальных выработок.....	76

3.1.3. Исследование параметров приконтурного массива пород с использованием ультразвукового метода.....	78
3.1.4. Исследование параметров напряженного состояния массива методом полной разгрузки	80
3.2. Восстановление параметров природного напряженного состояния массива пород Ждановского месторождения с использованием численного моделирования .....	85
3.2.1. Разработка численной геомеханической модели Ждановского месторождения.....	85
3.2.2. Определение параметров природного поля напряжений.....	93
3.2.3. Результаты реконструкции природного поля напряжений Ждановского месторождения при вариации нагрузок на грани модели.....	100
3.2.4. Прогноз изменения параметров природного поля напряжений массива пород Ждановского месторождения .....	102
ГЛАВА 4. ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В МАССИВЕ ПОРОД ЖДАНОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ .....	106
4.1. Исследование расчетных полей напряжений и их трансформации по мере выемки запасов месторождений для выбора рационального порядка отработки .....	106
4.1.1. Обоснование порядка развития очистных работ в пределах подэтажей .....	112
4.1.2. Геомеханическая оценка вариантов опережений развития горных работ.....	119
4.2. Оценка НДС в приконтурном массиве подземных горных выработок и верификация результатов моделирования с данными натурных исследований .....	121
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	130
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	146
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	146
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Акт о внедрении результатов кандидатской диссертации. ....	146
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Акт о внедрении рекомендаций по управлению горным давлением при подземной разработке месторождений (рудник «Северный»).....	146
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Акт о внедрении по Sigma GT с комплексом разномасштабных моделей Ждановского месторождения.....	146
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Отчет «Исследования напряженно-деформированного состояния массива горных пород и геомеханическое сопровождение горных работ на руднике «Северный» АО «Кольская ГМК», 2022 год. ....	146
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Отчет «Исследования напряженно-деформированного состояния массива горных пород и геомеханическое сопровождение горных работ на руднике «Северный» АО «Кольская ГМК», 2023 год. ....	146
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Заключение по обеспечению геомеханической безопасности ведения горных работ для месторождений Ждановское, Тундровое и Заполярное по плану развития на 2024г.	146

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Современные тенденции роста объемов производства в технологических отраслях, требующих использование цветных металлов, создают потребность в интенсификации добычи руд, в том числе медно-никелевых. Интенсификация темпов отработки запасов обуславливает увеличение глубины ведения горных работ, в результате чего повышается вероятность реализации геомеханических рисков. Наиболее быстро развивающимися и опасными по своим последствиям являются разрушения массивов горных пород в динамической форме. Такие разрушения могут проявляться как в локальных зонах, например, на контуре горных выработок, так и в региональных масштабах, при этом они приводят к травмам и гибели персонала, авариям и простоям в процессах горных работ, а также к утрате возможности отработки целых участков месторождений в случаях реализации горных и горно-тектонических ударов [46, 64, 77, 78].

Ждановское месторождение, расположенное на северо-западе Мурманской области, является одним из крупнейших месторождений медно-никелевых руд в России. Запасы Ждановского месторождения разрабатывают подземным рудником «Северный» с производительностью 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 [44, 46, 112].

Процессы, связанные с проявлениями горного давления, как правило, развиваются постепенно, и 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 [65, 131]. 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, как на Ждановском месторождении, так и на других месторождениях России.

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. Бенявски, 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 НДС массивов горных пород посвящены исследования Б.З. Амусина, 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.

**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 и особенностей 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.

**Теоретическая значимость работы** состоит в получении новых знаний о закономерностях распределения напряжений с глубиной в условиях действия гравитационно-тектонического поля напряжений в прочных скальных массивах горных пород с учетом особенностей в соотношении величин главных напряжений.

**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».

**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  $\sigma_{max}$  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.

**Реализация результатов работы.** Основные результаты данной квалификационной работы представлены отчетах ГоИ КНЦ РАН по темам следующих Научно-исследовательских работ: 0226-2019-0058 «Исследование процессов организации и локализации опасных зон в геологической среде при крупномасштабном техногенном воздействии горных работ в северо-западной части Арктической зоны РФ», FMEZ-2022-0004 «Изучение механизма формирования и обоснование критериев потери геомеханической устойчивости при ведении крупномасштабных горных работ». В отчетах в рамках научно-исследовательских работ: «Натурные и численные 3D

исследования напряженно-деформированного состояния массива горных пород, разрабатываемых рудником «Северный» АО «Кольская ГМК» (2019 г.); «Исследования напряженно-деформированного состояния массива горных пород и геомеханическое сопровождение горных работ на руднике «Северный» АО «Кольская ГМК» (2020, 2021, 2022, 2023 гг.). Разработанные конечно-элементные 3D модели установлены на руднике «Северный» и используются для оценки и прогноза НДС в окрестности горных работ.

**Публикации.** Описание подходов и основные результаты данного исследования представлены в виде публикаций в девяти печатных работах, в том числе в пяти работах, рекомендованных ВАК, а также в трех работах, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus.

**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, 09-11 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, 04-08 октября 2021 г.

8) XVI Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Проблемы недропользования», г. Екатеринбург, 09-11 февраля 2022 г.

9) XVII Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Проблемы недропользования», г. Екатеринбург, 07-10 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.

**Объем и структура работы.** Структура диссертационной работы представлена Введением, Основной частью, состоящей из четырех глав, Заключение, библиографическим списком и Приложениями. Работа содержит 155 страниц машинописного текста, 24 таблицы, 96

рисунков, библиографический список из 165 наименований используемых источников 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 натуральных определений и формулировке научных положений научному руководителю – ведущему научному сотруднику, руководителю отдела Геомеханики Горного института КНЦ РАН, к.т.н. Семеновой Инне Эриковне.

Особая роль в процессе выполнения данного диссертационного исследования принадлежит Заслуженному деятелю науки Российской Федерации д.т.н., профессору Козыреву Анатолию Александровичу. 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».

# ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ОБЗОР МЕТОДОВ, ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

## 1.1 Актуальность проблематики и предмета исследования

Процесс ведения горных работ во все времена был связан с рисками возникновения катастроф, влекущих за собой потери, выражающиеся и в человеческих жизнях, и в финансовых показателях [8]. В современном мире четко прослеживается тренд на замещение человеческого труда автоматизированным и становится реальностью реализация модели цифрового рудника [79], но в настоящее время исключение присутствия человека в подземных горных выработках невозможно. Зачастую подземные горные выработки, разрушившиеся из-за аварий, связанных с мощными динамическими проявлениями горного давления, не подлежат восстановлению, и целые месторождения или их части остаются непригодными для дальнейшей разработки. Помимо этого, усложняется и, следовательно, значительно растет в стоимости горная техника, поэтому повреждение или утрата такого оборудования вызывает рост себестоимости добываемого сырья.

В связи с закономерным сокращением объемов выемки полезного компонента открытым способом, современная тенденция в технологиях извлечения полезных ископаемых состоит в переходе к подземной добыче на значительных глубинах, подчас составляющих несколько тысяч метров. Например, в 2024 году на руднике «Скалистый» в Заполярном филиале ПАО ГМК «Норникель» продолжается проходка горных выработок на глубинах свыше 2000 м [84]. Данные выработки в настоящее время являются самыми глубокими в Евразии. По мере увеличения глубины разработки поле действующих в массиве пород напряжений меняется, и при определенных условиях увеличивается вероятность проявлений динамических форм горного давления. В отечественной и зарубежной практике ведения горных работ известно значительное количество техногенных катастроф на подземных рудниках, связанных с проявлением горного давления, в том числе на больших глубинах [46, 64, 77, 78]. В настоящее время на территории Российской Федерации к склонным и опасным по горным ударам отнесены 52 месторождения, при этом на некоторых месторождениях критическая глубина удароопасности составляет менее 200 м [131]. Соответственно, вопрос определения потенциальной удароопасности месторождений является актуальным и при ведении горных работ на относительно небольших глубинах, при этом, в таких случаях, причиной удароопасности зачастую является действие высоких тектонических напряжений [47, 49, 83, 126].

При анализе сейсмособытий в мировой практике горнодобывающих предприятий выявлено, что динамические события, такие как горные удары, с наибольшей частотой возникают в районах, подверженных неотектоническим процессам движения плит и приурочены по большей части к областям их стыков. Однако, даже в сейсмически спокойных регионах при эксплуатации подземных рудников и при ведении открытых горных работ возникают разрушения динамического характера [41, 48, 111]. Несмотря на то, что в целом уровень сейсмичности на территории Мурманской области является невысоким [13], в пределах Кольского полуострова наиболее часто регистрируются динамические явления, территориально приуроченные к районам ведения горных работ. Наибольшие производственные мощности добычи полезных ископаемых сосредоточены в районах Хибинского и Ловозерского горных массивов. При этом интерес вызывает тот факт, что по величине сейсмической энергии крупнейшими событиями, произошедшими на территории России, являются горно-тектонические удары именно на Ловозерском (1999 г.) и Хибинском (1989 г.) месторождениях (таблица 1.1) [77].

Таблица 1.1 – Сильнейшие горно-тектонические удары и техногенные землетрясения на российских рудниках

Номер п/п	Месторождение / рудник	Дата события	Энергия события по шкале локальных магнитуд Рихтера
1.	Ловозерское редкометалльное / «Умбозеро»	17.08.99 г.	5,1
2.	Ловозерское редкометалльное / «Умбозеро»	04.10.04 г.	3,9
3.	Хибинское апатитовое / Кировский	16.04.89 г.	4,3
4.	Хибинское апатитовое / Кировский	21.10.10 г.	3,8
5.	Хибинское апатитовое / Расвумчоррский	09.01.18 г.	3,4
6.	Южно-Уральский бокситовый рудник / шахта «Кургазакская»	28.05.90 г.	4,3
7.	Южно-Уральский бокситовый / «Блиново-Каменский»	29.07.94 г.	4,1
8.	Верхнекамское месторождение калийных солей / СКРУ-2	05.01.95 г.	4,1
9.	Таштагольское железорудное / Таштагольский	24.10.99 г.	3,6
10.	Ловозерское редкометалльное / «Карнасурт»	17.12.02 г.	3,6
11.	Северо-Уральский бокситовый рудник / шахта 15-15бис	05.10.84 г.	3,2
12.	Северо-Уральский бокситовый рудник / шахта 14-14бис	25.03.04 г.	3,2
13.	Северо-Уральский бокситовый рудник / шахта 15-15бис	13.02.10 г.	3,5

Так, в августе 1999 года на руднике «Умбозеро» произошло крупное техногенное землетрясение магнитудой  $M = 4 - 4,5$  [78]. В связи со значительной площадью разрушения горнодобывающая компания понесла огромные финансовые потери, и по-прежнему часть месторождения является непригодной к разработке. Данное событие является крупнейшим и самым катастрофическим за весь период мониторинга геодинамических явлений на рудниках в России. В Хибинском массиве также регулярно регистрируются события, связанные с динамическими проявлениями горного давления. Периодически происходят достаточно сильные сейсмические события на Кировском и Расвумчоррском рудниках, вызывающие разрушения как в приконтурной части выработок, так и в глубине горного массива [59, 60, 116].

Для реализации разрушения массива в динамической форме, в том числе в виде горных ударов, необходимо выполнение двух условий: во-первых, горные породы, слагающие массив, должны быть хрупкими и склонными к накоплению и мгновенному высвобождению упругой энергии; во-вторых, значения напряжений, действующих в массиве, должны быть близки к пределу прочности горных пород при сжатии.

Грамотная стратегия, направленная на изучение и прогнозирование событий, связанных с проявлением динамических форм горного давления, способствует снижению возникновения разрушений при отработке запасов на горнодобывающих предприятиях России и мира в целом, поэтому задача исследования свойств горных пород и характеристик массивов, а также параметров действующих в них полей напряжений является актуальной.

## **1.2 Характеристика Ждановского месторождения**

### **1.2.1 Общие сведения**

Ждановское месторождение расположено на северо-западе Мурманской области вблизи города Заполярный (рисунок 1.1) и является одним из крупнейших месторождений медно-никелевых руд в России.

Сульфидные медно-никелевые руды месторождения Печенгского рудного поля разрабатываются АО «Кольская горно-металлургическая компания» (АО «Кольская ГМК»), которое является дочерним предприятием ПАО ГМК «Норильский никель». Полный цикл горно-металлургического производства АО «Кольская ГМК» включает добычу и обогащение медно-никелевых руд в Печенгском районе Мурманской области и дальнейшее производство цветных металлов в металлургических цехах промышленной площадки г. Мончегорска.

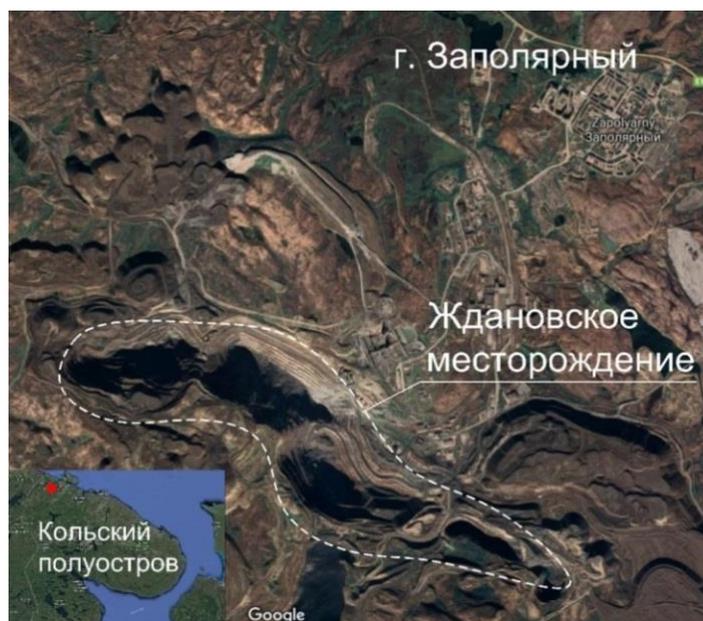


Рисунок 1.1 – Местоположение Ждановского месторождения

Месторождения Печенгского рудного поля, залегающего в виде дуги между поселком Никель и городом Заполярный, формируют два рудных узла: Западный и Восточный [129]. Ждановское месторождение приурочено к Восточному рудному узлу – массиву Пильгуярви. Около 95% запасов руды и 93% запасов никеля содержатся в месторождениях Восточного рудного узла, при этом основная часть запасов (88% руды и 79% никеля) сосредоточена в Ждановском месторождении [3], которое является сырьевой базой АО «Кольская ГМК».

Добыча руды на Ждановском месторождении была начата в 1960 году после строительства карьера «Центральный». Приповерхностная часть запасов отработана открытым способом до глубины приблизительно 400 м. Выбытие мощностей в карьерах обусловило принятие решения по ускоренному строительству подземного рудника. В период с 2005 года по 2010 год на рудниках АО «Кольская ГМК» происходило постепенное снижение объёмов добычи руды из карьеров и увеличение добычи подземным способом. В 2011 году рудник «Северный» вышел на проектную производительность в 6 млн. т руды в год.

В настоящее время в подземную разработку рудником «Северный» включено шесть рудных тел: Юго-Западное 1 и 2, Западное, Центральное, Восточное и Юго-Восточное (рисунок 1.2) [3, 67].

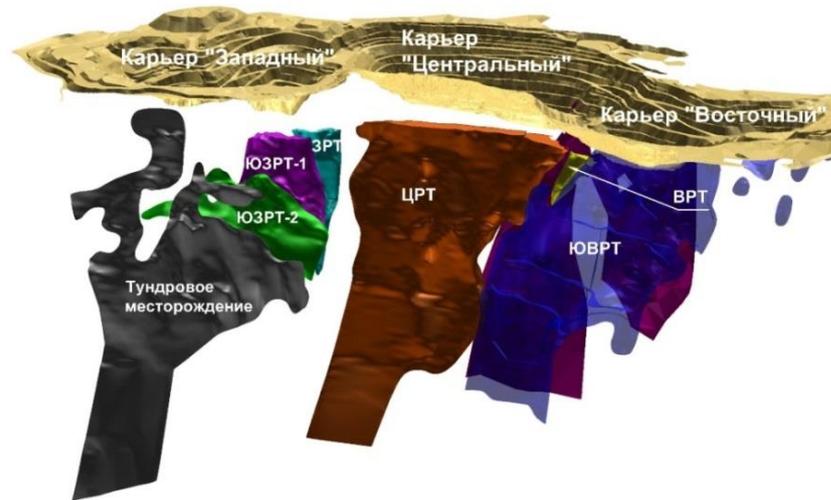


Рисунок 1.2 - Расположение основных месторождений и рудных тел Восточного рудного узла

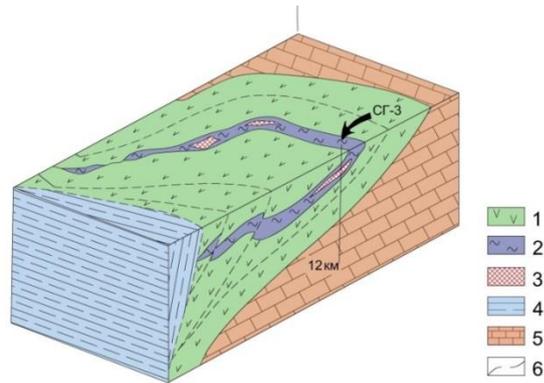
### 1.2.2 Геологическая характеристика месторождения

Группа месторождений Печенгского рудного поля, представляющего собой кулисообразную залежь шириной 2-4 км и протяженностью около 30 км между п.г.т. Никель и г. Заполярный, содержит одни из крупнейших запасов медно-никелевых руд в России [20], при этом наибольшие объемы запасов сосредоточены в пределах Ждановского месторождения (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 - Схематическое расположение Печенгского рудного поля и Ждановского месторождения

Геологическое строение Печенгского рудного поля (рисунок 1.4) сформировали нижнепротерозойские, возрастом около 2,5 млрд. лет, метаморфизированные осадочные и вулканогенно-осадочные породы, которые были прорваны основными и ультраосновными интрузиями [124].



Схематическая объемная модель Печенгской структуры

1 - вулканогенные породы; 2 - "продуктивная" толща туфогенно-осадочных пород; 3- никеленосные габбро-верлиты; 4 - вулканогенно-осадочные породы Южной зоны; 5 - архейский комплекс; 6 - разломы

Рисунок 1.4 - Схема строения Печенгского рудного поля [37]

В Печенгском рудном поле выделяют два рудных узла: Западный и Восточный. Западный рудный узел включает месторождения Каула, Промежуточное, Котсельваара-Каммикиви и Семилетка и территориально относится к району поселка Никель. В состав Восточного рудного узла, расположенного вблизи города Заполярный, входят месторождения Спутник, Верхнее, Тундровое, Ждановское, Заполярное, Быстринское и Северные Онки.

Все разведанные и эксплуатируемые месторождения сосредоточены в так называемой «продуктивной толще» Восточного рудного узла в виде интрузивов основных-ультраосновных пород, располагающихся многоярусно, в виде пластообразных тел, вытянутых по простиранию и падающих в южном направлении, согласно общему направлению падения вмещающих пород [3]. Продуктивная толща имеет форму дугообразной полосы шириной от первых сотен до 2500 метров, представлена в основном филлитами, алевролитами, песчаниками, туффитами и туфами с различной степенью метаморфизации [65], повсеместно дислоцирована множеством неоднородностей в виде включений интрузий основных и ультраосновных пород Печенгского никеленосного комплекса. Интрузии представлены тремя комплексами: ранних безрудных габбро-диабазов, рудоносных основных и ультраосновных пород, которые формируют «продуктивную толщу» и комплексом малых интрузий [3].

Центральную часть Восточного рудного узла занимает массив Пильгуярви, в котором с запада на восток сгруппированы в виде цепочки рудные тела Ждановского месторождения: Юго-Западные рудные тела 1 и 2 (ЮЗРТ-1, 2), Западное (ЗРТ), Центральное (ЦРТ), Восточное (ВРТ) и Юго-Восточное (ЮВРТ) (рисунок 1.5). К этому же массиву приурочены не выходящие на поверхность месторождения Тундровое, которое залегает на западном фланге над ЮЗРТ-2 и месторождение Быстринское, залегающее над ЮВРТ. В центре массива на контакте с диабазами 3 вулканогенного покрова залегает Северное рудное тело месторождения Заполярное. На

западном фланге Северное рудное тело в месте флексурного перегиба массива Пильгуярви непосредственно примыкает к Центральному рудному телу Ждановского месторождения на всем протяжении по падению. Южное рудное тело (ЮРТ) и месторождение Северные Онки, находящиеся восточнее, приурочены к самостоятельным массивам.

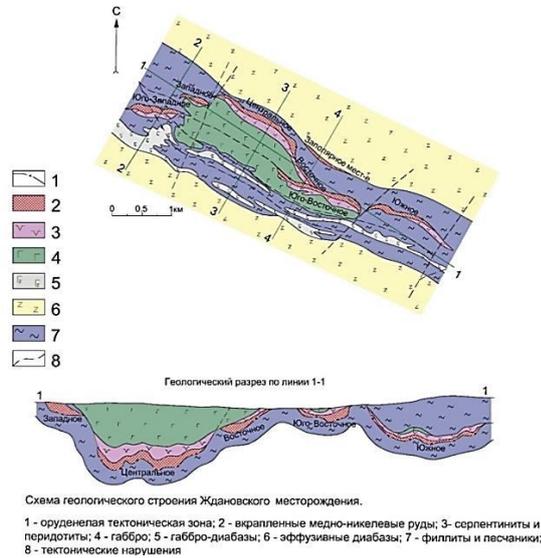


Рисунок 1.5 - Схема геологического строения и произвольный продольный разрез Ждановского месторождения [104]

Все рудные тела вышеперечисленных месторождений имеют вытянутую, удлиненно-линзообразную или пластообразную форму со слабоволнистыми контактами и имеют следующие размеры: по простиранию и падению – от первых сотен до 2500 м, мощность – от метров до 100-120 м. Углы падения изменяются от 20 до 70°, средний угол падения около 45-50° (рисунок 1.6) [3].

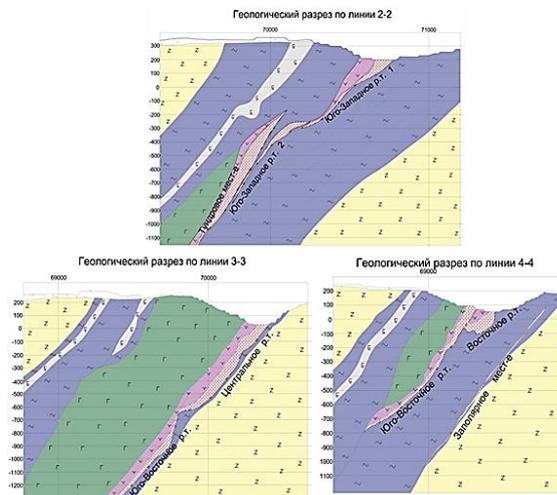


Рисунок 1.6 - Некоторые основные разрезы вкост рудных тел Ждановского месторождения [104]

### 1.2.3 Климатические и природно-географические условия

Район месторождений относится к Печенгским тундрам, протягивающимся в юго-восточном направлении от норвежской границы. Максимальные высотные отметки 636,6 м (гора Куорпукас) и 528 м (гора Матерт). Рельеф района, сформировавшийся под воздействием оледенения, характеризуется сглаженностью вершин и склонов гор, особенно с южной стороны, отсутствием четко выраженных водоразделов. Вершины гор и верхние части склонов выше отметок 150-200 м безлесны. Ниже появляется редкая древесная растительность вплоть до сосновых лесов в наиболее пониженных частях. Гидросеть ориентирована на северо-восток, реки и ручьи имеют сток в Баренцево море. Впадины рельефа сильно заболочены.

Климат Печенгского района, расположенного в береговой зоне Баренцева моря, морской – полярный. От города Заполярного до морского побережья 41 км. Лето длится 2,5-3 месяца, дождливое, пасмурное. Зима мягкая, ветреная, с частыми оттепелями. Среднегодовая температура воздуха 0°C. Снег выпадает в сентябре, а сходит обычно мае-июне. Зимой частые сильные метели со снежными заносами. Район не входит в состав территорий с развитием вечной мерзлоты.

По сейсмичности район относится к стабильным без значимых проявлений сейсмических событий [3].

### 1.2.4 Параметры системы разработки и порядок отработки запасов

Отработка основных запасов ведется системой подэтажного обрушения с торцевым выпуском руды (ПОТ) и штрековой (рисунок 1.7) подготовкой [67]. Параметры системы со штрековой подготовкой: высота подэтажа – 15 м, ширина вкрест простирания – горизонтальная мощность рудного тела, длина по простиранию – длина рудного тела. Ширина (пролет) буродоставочного штрека и орта 4 м, высота 4,5 м, расстояние между осями буродоставочных штреков на подэтаже 12,5 м. На смежных подэтажах буродоставочные штреки располагаются в шахматном порядке: буродоставочный штрек на нижележащем подэтаже располагается под центральной частью целика между буродоставочными штреками на вышележащем подэтаже.

Подэтаж рекомендуется отрабатывать в направлении от висячего бока рудного тела к лежащему боку и от центра рудного тела к его флангам, подэтажи – сверху вниз по падению рудного тела с опережением вышележащего относительно смежного нижележащего подэтажа на 25 м.

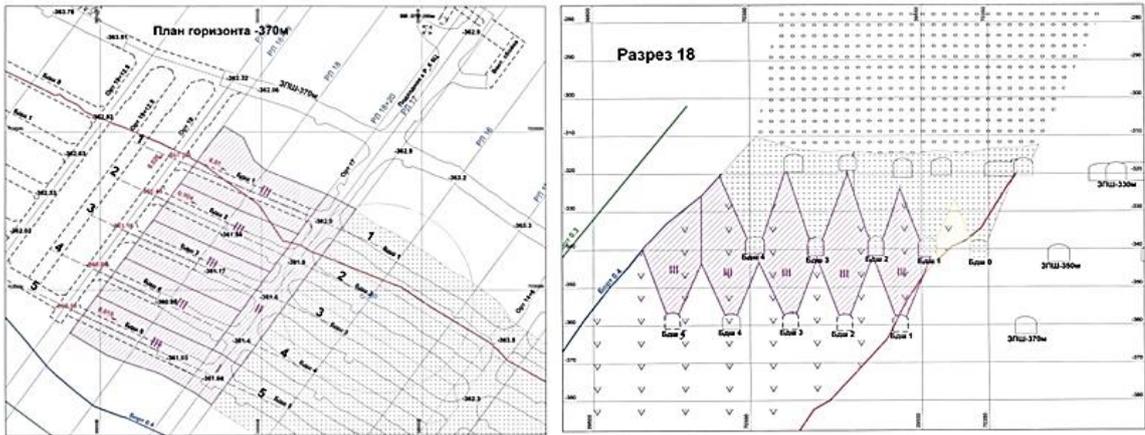


Рисунок 1.7 - План и разрез, характеризующие параметры системы разработки с подэтажным обрушением и штрековой подготовкой

Практика применения системы ПОТ показала, что состояние буро-доставочных выработок и массива, расположенных со стороны висячего бока, определяется значениями концентрации напряжений от консольно зависающих пород. В этих условиях в рудном теле со стороны восстания нагрузка от консольно зависших пород формирует зону опорного давления с максимумом напряжений, расположенным у контура отработанного подэтажа. В связи с этим, во время производства подготовительных работ наблюдались неблагоприятные проявления горного давления в виде вывалов и разрушения контура выработок, находящихся вблизи висячего бока рудного тела [125].

На некоторых участках месторождения применяется система разработки с открытым очистным пространством (рисунок 1.8). Особенностью данной системы является определение оптимальных размеров формируемых очистных камер и целиков, обеспечивающих устойчивое состояние массива в целом [46, 69, 70, 153].

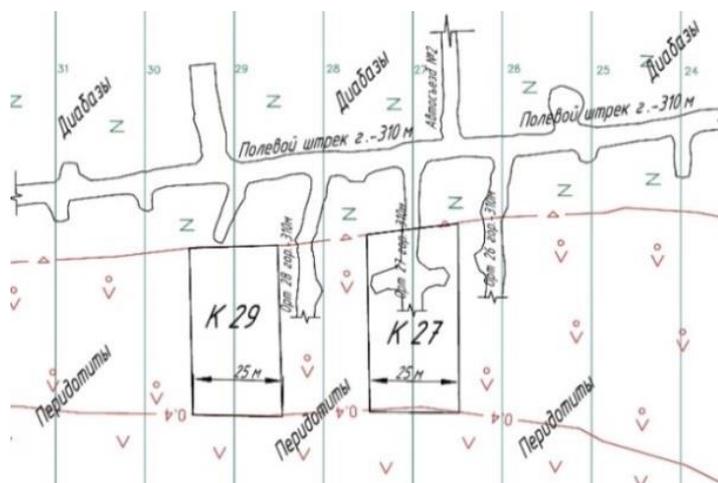


Рисунок 1.8 - Схема, характеризующая параметры системы разработки с открытым очистным пространством

Применение описанных выше систем разработки и интенсивное понижение фронта очистных работ требует тщательного исследования геомеханических характеристик массива пород Ждановского месторождения посредством изучения свойств основных литологических разностей, определения параметров напряженного состояния массива, а также прогнозной оценки трансформации поля напряжений в процессе ведения горных работ.

### **1.3 Обзор методов исследования геомеханических характеристик массива горных пород**

Одним из необходимых условий возникновения потенциальной удароопасности является способность массива к накоплению упругой энергии и ее мгновенной реализации в виде динамического разрушения, что зависит от физико-механических свойств горных пород. Вторым условием, при котором может произойти динамическое разрушение, является действие в массиве горных пород высоких сжимающих напряжений, близких к значению предела прочности пород при сжатии. Таким образом, при определенных физико-механических характеристиках пород и в условиях действия критических величин напряжений сжатия, реализуется процесс динамического разрушения массива горных пород. Определение потенциальной удароопасности основывается на исследовании физико-механических свойств образцов основных породных разностей и характеристик массивов горных пород, а также изучении параметров и особенностей полей действующих напряжений. Физико-механические свойства образцов пород исследуют при проведении лабораторных испытаний с учетом различных режимов и условий. Качественные характеристики массива пород определяют при описании керна геотехнических скважин либо в условиях массива пород при проведении картирования обнажений. Определение параметров напряженного состояния массива пород зачастую выполняют в натуральных условиях с применением различных методов, наиболее распространенными из которых являются визуальное обследование подземных выработок и метод инструментальных измерений, основанный на различных физических принципах. Прогнозирование трансформации напряженного состояния массива пород может быть выполнено аналитическими методами, но в настоящее время, в подавляющем большинстве случаев, используется численное геомеханическое моделирование.

### 1.3.1 Обзор методов определения характеристик образцов и массивов пород

Методы и порядок определения широкого спектра физико-механических характеристик образцов горных пород в России регламентированы в ГОСТах [21-24], а также рекомендованы стандартом Международного общества механики горных пород (ISRM) [165].

Для определения характеристик массивов пород используют рейтинговые классификации. Принцип рейтинговой классификации состоит в том, что массивы горных пород разделяют на домены с учетом различных характеристик, включающих параметры структурных неоднородностей, обводненность, влияние параметров НДС и прочие. Для каждого домена определяют количественную характеристику. По итоговой величине рейтинга можно оценить прочностные характеристики и устойчивость породного массива.

Впервые переход от проектирования, основанного на практическом опыте при строительстве тоннелей и проходке горных выработок, к формализованной системе классификации для расчетов параметров крепления выполнил Карл Вильгельм Риттер в 1879 году. В 20х годах XX века профессором М.М. Протодяконовым была разработана классификация горных пород по крепости. На основе сопротивляемости разрушению при воздействии механическими инструментами и энергией взрыва, основные горные породы были разделены на группы в соответствии с величиной крепости и упорядочены в шкалу. Данная шкала содержит 10 категорий горных пород, в которых коэффициент крепости изменяется от 0,3 до 20. В 1946 году, на основе опыта исследования объектов тоннелестроения Северной Америки, Карл Терцаги разработал подход к проектированию тоннелей, связанный с расчетом действия нагрузки массива на металлическую рамную крепь, при этом создав классификацию устойчивости массивов горных пород, носящую в своей основе описательный характер оценки [151].

Х. Лоффер в 1958 году обосновал взаимосвязь между временем устойчивого стояния незакрепленного участка выработки и качеством массива, в котором он пройден. В классификации по времени устойчивого стояния выработок массивы горных пород подразделяются на 7 классов согласно качественным характеристикам: от массивов с высокими прочностными параметрами до слабопрочных. С помощью номограммы, зная пролет и категорию качества массива, специалист может определить время устойчивого стояния выработки.

В 1967 году для оценки качества массива с использованием керна геологических скважин Д. Диром был разработан индекс качества массива (*RQD*). Значение *RQD* определяется как процентное отношение кусков керна длиной свыше 100 мм к длине интервала кернового материала.

В настоящее время наиболее популярными и зарекомендовавшими себя в многолетней практике за рубежом рейтинговыми системами классификации качества массивов горных пород являются: показатель качества массива Н. Бартона ( $Q$ ), геомеханическая классификация З.Т. Бенявского ( $RMR$ ) и геологический индекс прочности Э. Хука ( $GSI$ ).

Для определения устойчивости элементов горной технологии, расчета крепления подземных горных выработок и решения прочих инженерных задач используют показатель качества массива Н. Бартона  $Q$ .

Показатель качества массива  $Q$  изменяется от 0,001 до 1000 по логарифмической шкале и определяется по формуле (1.1):

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}, \quad (1.1)$$

где  $RQD$  – показатель качества массива пород (характеризует степень нарушенности массива);

$J_n$  – показатель количества систем трещин;

$J_r$  – показатель шероховатости поверхностей трещин;

$J_a$  – показатель степени выветривания, изменения поверхностей и заполнителя трещин;

$J_w$  – коэффициент, учитывающий обводненность массива и трещин;

$SRF$  – коэффициент, учитывающий напряженное состояние массива.

Таким образом, каждому отношению из формулы (1.1) соответствует следующее смысловое объяснение:

$\frac{RQD}{J_n}$  – характеризует размер и нарушенность структурного блока;

$\frac{J_r}{J_a}$  – характеризует межблоковую прочность на сдвиг с учетом шероховатости поверхностей трещин и свойств материала-заполнителя;

$\frac{J_w}{SRF}$  – характеризует действующие напряжения и влияние обводненности массива.

Для определения прочности породного массива по значению показателя  $Q$  используют таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Определение прочности массива горных пород по рейтинговому показателю  $Q$

Категория	Q -рейтинг	Степень нарушенности массива	Степень прочности массива
А	400 - 1000	Ненарушенный	Исключительно прочный
	100 - 400		Весьма прочный
	40-100		Очень прочный
Б	10-40		Прочный
В	4-10	Средней нарушенности	Средний

Продолжение таблицы 1.2

Г	1-4	Нарушенный	Слабый
Д	0,1-1,0		Очень слабый
Е	0,01-0,1	Очень нарушенный	Крайне слабый
Ж	0,01-0,001		Исключительно слабый

В связи с тем, что на качественные характеристики, и, соответственно, устойчивость массива пород в значительной степени оказывает влияние напряженно-деформированное состояние, которое меняется и сильно зависит от таких условий, как положение очистного пространства, наличие ослабленных зон и пр., дополнительно рассчитывают параметр  $Q'$  ( $Q'$  prime), который не учитывает влияние НДС, а также фактор обводненности массива.

В основе системы классификации *RMR* лежит оценка прочности массива горных пород с учетом шести параметров:

- 1) Прочность пород на одноосное сжатие ( $J_{A1}$ );
- 2) Показатель качества массива RQD ( $J_{A2}$ );
- 3) Расстояние между неоднородностями ( $J_{A3}$ );
- 4) Характеристика неоднородностей ( $J_{A4}$ ), которая включает:
  - 4.1) Шероховатость трещин ( $J_{A41}$ );
  - 4.2) Длину трещин ( $J_{A42}$ );
  - 4.3) Раскрытие трещин ( $J_{A43}$ );
  - 4.4) Заполнение трещин ( $J_{A44}$ );
  - 4.5) Выветрелость стенок трещин ( $J_{A45}$ ).

Параметр  $J_{A4}$  определяется по формуле (1.2):

$$J_{A4} = J_{A41} + J_{A42} + J_{A43} + J_{A44} + J_{A45} \quad (1.2)$$

- 5) Условия водопритока ( $J_{A5}$ );
- 6) Направленность неоднородностей ( $J_B$ ).

Таким образом, значение *RMR* вычисляют по формуле (1.3):

$$RMR = J_{A1} + J_{A2} + J_{A3} + J_{A4} + J_{A5} + J_B, \quad (1.3)$$

Для определения степени качества массива по значению показателя *RMR* используют таблицу 1.3.

Таблица 1.3 – Определение прочности массива горных пород по рейтинговому показателю *RMR*

Значение RMR	Характеристика прочности массива
81-100	Очень прочный
61-80	Прочный
41-60	Средней прочности
21-40	Слабый
<21	Очень слабый

Параметр  $GSI$  определяют либо при картировании обнажений и поверхностей подземных горных выработок, либо с использованием формул расчета.

Одной из наиболее распространенной зависимостью является расчет параметра  $GSI$  с использованием характеристик трещиноватости массива по З. Беньявскому [140], выполняемый по формуле (1.4):

$$GSI_{Bieniawski89} = \frac{RQD}{2} + 1.5 \cdot J_{Cond89}, \quad (1.4)$$

где  $J_{Cond89}$  – состояние поверхностей трещин по системе рейтинговой оценки  $RMR$  З. Беньявского [140].

Значение параметра состояния поверхностей трещин  $J_{Cond89}$  определяют в массиве при картировании поверхностей выработок с использованием таблицы 1.4 [87, 140].

Таблица 1.4 – Характеристика параметров трещин по рейтинговому показателю  $RMR$

Характеристика нарушения	Очень шероховатая поверхность, не протяженная, нет заполнителя, невыветрелые стенки трещины	Слегка шероховатая поверхность, Заполнитель <1 мм, слегка выветрелые стенки трещин	Слегка шероховатая поверхность, заполнитель <1 мм сильно выветрелые стенки трещин	Гладкая поверхность или заполнитель без контакта стенок <5 мм или раскрытие 1-5 мм протяженные	Мягкий заполнитель без контакта стенок >5 мм или раскрытие >5 мм, протяженные
Рейтинг	30	25	20	10	0
Длина нарушения (протяженность)	<1 м	1-3 м	3-10 м	10-20 м	Более 20 м
Рейтинг	6	4	2	1	0
Мощность (раскрытие)	Нет	<0,1 мм	0,1 – 1,0 мм	1-5 мм	Более 5 мм
Рейтинг	6	5	4	1	0
Шероховатость	Очень шероховатая	Шероховатая	Слегка шероховатая	Гладкая	С зеркалами скольжения
Рейтинг	6	5	3	1	0
Заполнитель	Нет	Твердый заполнитель <5 мм	Твердый заполнитель >5 мм	Мягкий заполнитель <5 мм	Мягкий заполнитель >5 мм
Рейтинг	6	4	2	2	0
Выветривание стенок	Невыветрелые	Слегка выветрелые	Средне выветрелые	Сильно выветрелые	Дезинтегрированные
Рейтинг	6	5	3	1	0

Также значения  $GSI$  определяют по методике, учитывающей состояние трещин по Н. Бартону 1974 [139] по формуле (1.5):

$$GSI_{Barton} = (52 \cdot J_r / J_a) / (1 + \frac{J_r}{J_a}) + \frac{RQD}{2} \quad (1.5)$$

Определение параметров  $J_r$  и  $J_a$  выполняют в соответствии с таблицей 1.5.

Таблица 1.5 – Определение параметров  $J_r$  и  $J_a$  по методике Н. Бартона [111, 139]

Показатель шероховатости трещин $J_r$	Рейтинг	Показатель изменения трещин $J_a$	Рейтинг
Прерывистые трещины	4	Плотно залеченные, твердые, не размягчающиеся заполнитель, непроницаемый наполнитель	0,75
Шероховатые и неровные, волнистые	3	Невыветрелые стенки трещин, только окрашивание стенок	1,0
Гладкие, волнистые	2	Слегка выветрелые стенки трещин, не размягчающиеся заполнитель, песчаные частицы, дезинтегрированные породы без глины и т.д.	2,0
С зеркалами скольжения, волнистые	1,5	Глинистые или песчано-глинистые заполнители, мелкая глинистая фракция (не размягчающаяся)	3,0
Шероховатые и неровные прямые	1,5	Размягчающая глина или глина с низким коэффициентом трения, минеральные покрытия, т.е. каолинит, слюда. Также хлориты, тальк, гипс, графит и т.д., также небольшие количества набухающих глин (прерывистые покрытия толщиной 1-2 мм или менее)	4,0
Гладкие, прямые	1,0		
С зеркалами скольжения, прямые	0,5		

В процессе картирования обнажений и поверхностей выработок параметр  $GSI$  определяют с помощью специальной диаграммы (рисунок 1.9) [150].

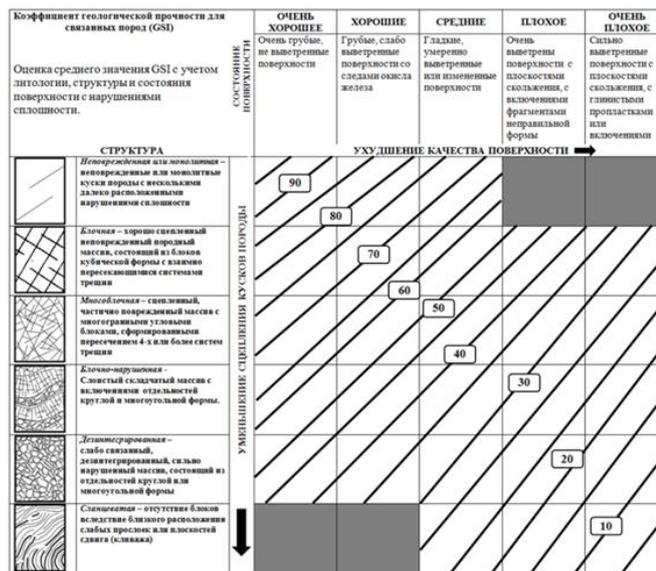


Рисунок 1.9 – Диаграмма определения параметра  $GSI$  с помощью картирования обнажений массива пород

Все перечисленные системы оценки качественных характеристик массивов горных пород имеют как свои преимущества, так и ограничения. В настоящее время ведутся работы по усовершенствованию рейтинговых классификаций для учета наиболее важных параметров массивов и, одновременно, упрощению расчетных методик.

### 1.3.2 Обзор методов исследования параметров напряженного состояния массива пород

С точки зрения геомеханики одной из наиболее важных задач является определение параметров природных полей напряжений. Для того, чтобы представить классификацию методов исследования параметров НДС массивов горных пород, необходимо дать некоторые пояснения из теории механики деформируемого тела.

#### 1.3.2.1 Типы напряженного состояния массива пород и основные методы его исследования

Известно [1, 4, 7, 38], что напряженное состояние в точке можно описать в виде комбинации нормальных ( $\sigma$ ) и касательных ( $\tau$ ) компонент. При этом в случае, когда  $\tau=0$ , нормальные компоненты тензора напряжений преобразуются в главные:  $\sigma_1(\sigma_{max}) \geq \sigma_2(\sigma_{np}) \geq \sigma_3(\sigma_{min})$ , которые описывают напряженное состояние элемента.

Природным напряженным состоянием массива является его состояние до начала горных работ (рисунок 1.10 а). Также его называют состоянием нетронутого массива. Напряженное состояние, претерпевшее изменения под влиянием горных работ, называют техногенно измененным или вторичным (рисунок 1.10 б).

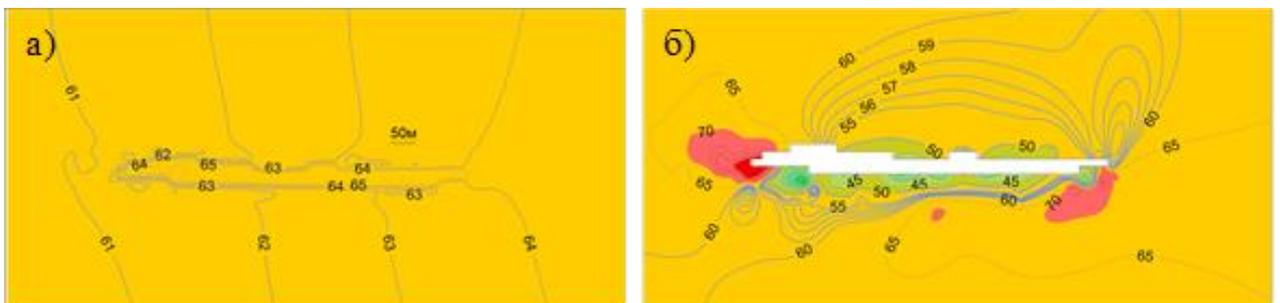


Рисунок 1.10 – Виды напряженного состояния массива пород:  
а) НДС нетронутого массива, б) техногенно измененное НДС массива пород

Напряженное состояние может быть простым или сложным. В случаях, когда действует только одна компонента главных напряжений, например,  $\sigma_1$ , а две остальные равны нулю  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ , говорят о линейном напряженном состоянии в точке тела. В условиях, когда действуют две главные компоненты  $\sigma_1, \sigma_2 \neq 0$ , а одна равна нулю  $\sigma_3 = 0$ , такое напряженное состояние называют плоским. В реальных массивах горных пород, в подавляющем большинстве случаев, реализуются условия действия всех трех компонент главных напряжений  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 \neq 0$ , и такое состояние называется объемным или сложным.

В свою очередь, объемное напряженное состояние массива пород характеризуется соотношением главных компонент напряжений. В случае, когда все три главные компоненты равны друг другу ( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ), напряженное состояние массива называют гидростатическим. Если же две или все три компоненты не равны друг другу ( $\sigma_1 = \sigma_2 \neq \sigma_3$  или  $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ ), то такое напряженное состояние является неравнокомпонентным.

В массивах горных пород принято выделять типы полей напряжений по соотношению главных компонент напряжений: гравитационный, который формируется за счет давления налегающей толщи пород; гравитационно-тектонический – от пригрузки, вызванной действием тектонических сил, и его частный случай – гидростатический (рисунок 1.11).

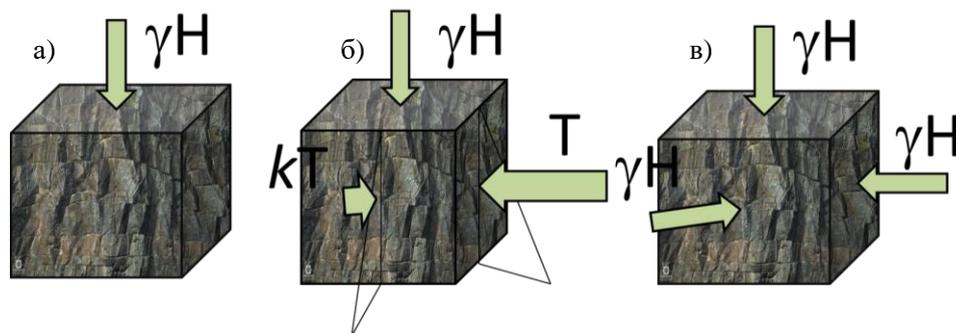


Рисунок 1.11 – Типы полей напряжений по соотношению главных компонент напряжений в массиве пород: а) гравитационный, б) гравитационно-тектонический, в) гидростатический

Знания о напряженном состоянии массива пород месторождений являются одними из основополагающих для понимания геомеханической ситуации, выбора параметров безопасного ведения горных работ, прогноза изменения НДС и оценки потенциальной удароопасности.

Существует несколько методов исследования напряженного состояния массивов горных пород. Их можно условно разделить на аналитические, натурные и численные. В основе всех этих методов лежат знания о физико-механических свойствах основных литологических разностей, слагающих месторождения, структурных особенностях массива пород, существующих тектонических нарушениях, технологических характеристиках применяемых систем разработки и множестве других параметрах.

Аналитические методы исследования напряженного состояния массива горных пород применяются в виде математических моделей, которые создают посредством решения систем уравнений с учетом идеализированных условий. Аналитические методы позволяют моделировать различные ситуации, в которых в виде переменных может быть заложено неограниченное количество влияющих факторов, позволяющих воссоздать реальные горно-технологические условия как по отношению к свойствам сред, так и к условиям нагружения. Преимуществом данного метода является то, что при изменении входных параметров можно достаточно быстро получать результат вычисления, а также фиксировать степень влияния конкретного фактора на конечный результат [6, 39]. В настоящее время аналитические методы исследования НДС массивов пород применяются редко, так как им повсеместно заменяют численные методы исследования, обеспечивающие автоматизированное выполнение многовариантных расчетов с помощью численного моделирования напряженного состояния.

Натурные методы исследования НДС массива позволяют определять параметры напряженного состояния непосредственно в массиве горных пород (*in-situ*) с использованием различных инструментальных способов. В зависимости от физических принципов, положенных в их основу, выделяют различные группы методов определения напряжений, действующих в массиве.

Численные методы исследования в геомеханике широко применяют для решения задач прогнозной оценки напряженного состояния массива при создании геомеханических моделей месторождений и рудных тел. Численные методы исследования напряженно-деформированного состояния массива горных пород основаны на математическом моделировании геомеханических процессов. Моделирование осуществляется путем решения систем уравнений математической физики, описывающих свойства массива, зависимости, согласно выбранного подхода. Иными словами, математическая модель имитирует геомеханическое поведение горного массива с определенными свойствами под воздействием заданных внешних условий. В связи со сложностью массива пород как объекта исследования и большим количеством влияющих на его состояние факторов, численное моделирование в настоящее время является эффективным методом исследования, учитывающим практически неограниченное количество условий [119]. Таким образом, метод численного моделирования является надежным и хорошо зарекомендовавшим себя инструментом для исследования параметров полей напряжений в массивах горных пород и обоснования закономерностей их изменения [120, 121, 122, 152, 153, 162, 163].

### 1.3.2.2 Натурные методы исследования напряженного состояния массива пород

Натурные исследования параметров НДС массива пород включают множество методов, различных по точности, трудоемкости и физическим принципам. Самым простым, но наименее точным, является метод визуального обследования состояния горных выработок. Он позволяет по характеру разрушения контура горных выработок или выемочных единиц с некоторым обобщением давать характеристику типу поля напряжений по направлению действия главных компонент напряжений, а также в пределах некоторых интервалов оценивать их значения. При визуальном обследовании фиксируются характер и степень разрушения приконтурной части массива, такие как вывалообразование, заколообразование, шелушение, стреляние. При этом, по характерным для данного участка массива вариантам деформирования, можно определить направление действия максимальной компоненты напряжений. Так, например, если разрушение выработки наблюдается преимущественно в кровле, и это не вызвано исключительно причинами, связанными со структурными особенностями массива, то можно заключить, что в данных условиях максимальные напряжения направлены субгоризонтально, что схематически показано на рисунке 1.12 [101].

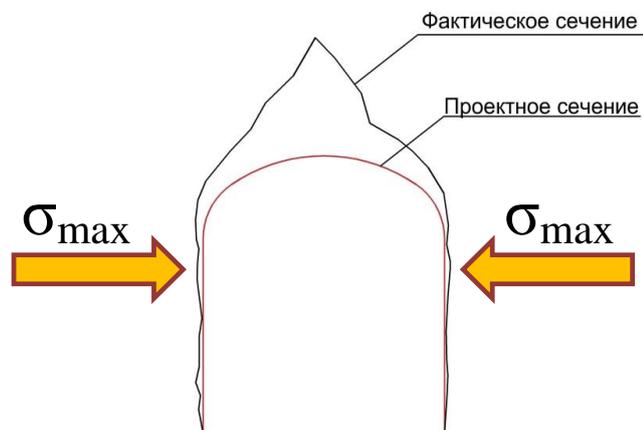


Рисунок 1.12 - Схема характерного разрушения контура выработки при действии максимальной компоненты напряжений в субгоризонтальном направлении

Метод дискования керна применяется при бурении разведочных и эксплуатационных скважин. В некоторых интервалах может наблюдаться разрушение керна на тонкие диски. По специальной номограмме (рисунок 1.13) можно определить категорию удароопасности исследуемого участка приконтурного массива пород [61, 131].

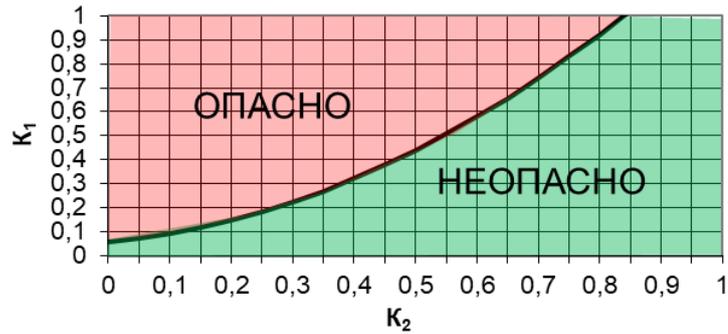


Рисунок 1.13 – Номограмма для определения категория удароопасности скважин по дискованию керна (для скважин диаметра 59 мм; керна диаметра 42 мм)

По оси ординат номограммы откладывается параметр  $K_1$ , определяемый как отношение по формуле (1.6):

$$K_1 = L_D / D_{\text{выр.}} \quad (1.6)$$

где  $L_D$  – длина зоны дискования, м;  $D_{\text{выр.}}$  – наибольший размер выработки, м.

По оси абсцисс откладывается отношение  $K_2$ , который определяют по формуле (1.7):

$$K_2 = (X_{\text{max}} - X_p) / D_{\text{выр.}} \quad (1.7)$$

где  $X_{\text{max}}$  – расстояние от контура выработки до максимума опорного давления, м;  $X_p$  – мощность приконтурной зоны разрушенных пород, м.

Геофизические методы определения параметров полей напряжений широко применяются на практике и основаны на взаимозависимостях искусственно наводимых физических полей с напряженным состоянием массива. Особенностью этих методов является то, что они позволяют охватывать значительные области приконтурных зон выработок и в целом массива горных пород, при этом учитывая влияние структурных неоднородностей. Из множества геофизических методов рассмотрим те, которые были применены при исследовании параметров НДС Ждановского месторождения.

Ультразвуковой каротаж входит в группу геофизических методов исследования параметров НДС и основан на зависимости между скоростью распространения упругих волн и напряжениями в массиве. Он позволяет определить значения главных компонент действующих напряжений. Наблюдательные станции могут быть выполнены в разных вариантах в зависимости от особенностей измерительного оборудования. Рассмотрим те из них, которые были оборудованы в условиях массива пород Ждановского месторождения.

В первом варианте станция состоит из вертикального и субгоризонтального кустов скважин, расположенных в кровле и стенке выработки в квазиперпендикулярных плоскостях. Каждый куст скважин бурят по вершинам равностороннего или прямоугольного треугольника, в каждом кусте по три параллельные скважины (рисунок 1.14). Источник и приемник ультразвуковых волн находятся в разных скважинах.

Принцип метода состоит в том, что, используя время прохождения продольных волн между скважинами, время распространения продольных волн в выбуренных образцах и значения упругих характеристик образцов горных пород (модуль Юнга и коэффициент Пуассона), определяют напряжения в точках измерений для каждого куста скважин, и затем вычисляют главные нормальные напряжения в массиве в трех ортогональных плоскостях [38].

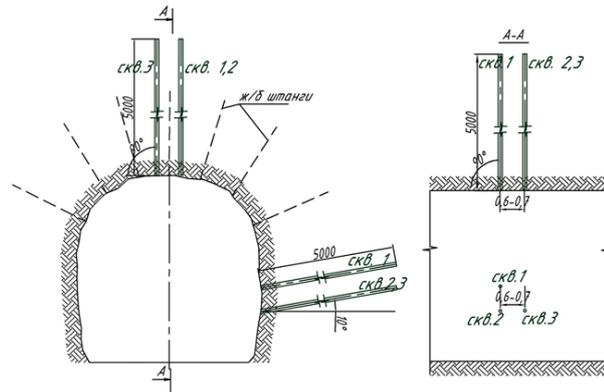


Рисунок 1.14 - Схема оборудования станции для ультразвукового исследования межскважинного пространства

Во втором варианте выполняли ультразвуковые исследования состояния приконтурного массива с целью определения параметров нарушенной зоны вокруг выработок. Для этого замеры получали в шпурах, обуренных в поперечном сечении выработки, при этом источник и приемник находились в одном шпуре (рисунок 1.15). Данный метод позволяет характеризовать состояние приконтурного массива выработки, при этом выходной информацией являются значения скоростей упругих волн, которые хорошо поддаются визуализации и позволяют отстраивать изолинии, получая скоростные модели приконтурного массива. Интерпретация картины распределения скоростей упругих волн позволяет качественно оценить направление действия максимальной компоненты тензора напряжений, действующих в массиве [114].

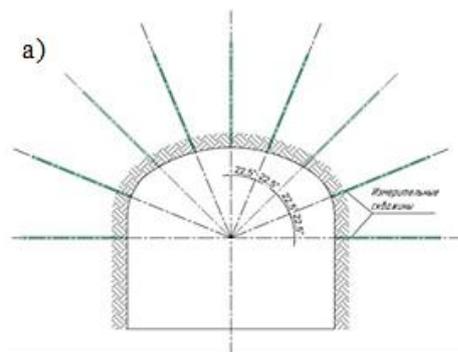


Рисунок 1.15 - Схема оборудования станции для ультразвуковых исследований состояния приконтурного массива

Компенсационные методы предполагают снятие нагрузки, которая первоначально действовала на исследуемом участке массива, и затем ее восстановление с инструментальной фиксацией значений. Наиболее зарекомендовавшим себя является метод гидроразрыва, при котором в скважину под давлением нагнетается значительное количество жидкости, при этом увеличение давления происходит вплоть до образования трещин разрыва [39, 71, 74]. Принципиальная схема метода приведена на рисунке 1.16 [75].

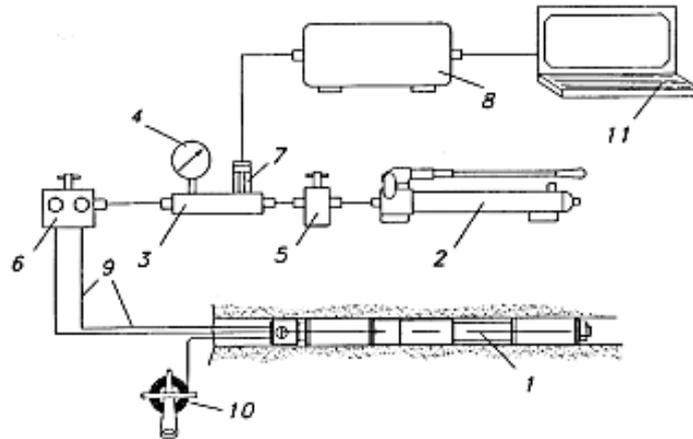


Рисунок 1.16 - Схема измерительно-вычислительного комплекса метода гидроразрыва:  
 1 – двухпакерный зонд в скважине; 2 – ручной насос; 3 – адаптер; 4 – контрольный манометр;  
 5, 6 – коммутирующие устройства; 7 – датчик давления с кабелем связи; 8 – регистратор  
 давления; 9 – маслопроводы; 10 – рулетка; 11 – персональный компьютер [75]

К деформационным относят методы, в основе которых лежат измерения деформаций и дальнейший их математический пересчет в значения действующих напряжений. Принцип деформационных способов исследования параметров НДС массива пород состоит в определении упругих деформаций при выбуривании породы, то есть ее разгрузки от напряжений, действующих в массиве [85, 154- 156]. Наиболее распространенным являются методы полной и частичной разгрузки [32, 82, 127]. Метод полной разгрузки является наиболее трудоемким, но позволяет получить параметры НДС в массиве пород на удалении от горной выработки, тогда как метод частичной разгрузки применим для значительно меньших областей массива.

В зависимости от применяемой методики, проведение измерений методом полной разгрузки возможно выполнять с использованием разных схем: схемы Н. Хаста, схемы Е. Лимана и по методике ВНИМИ (рисунок 1.17).

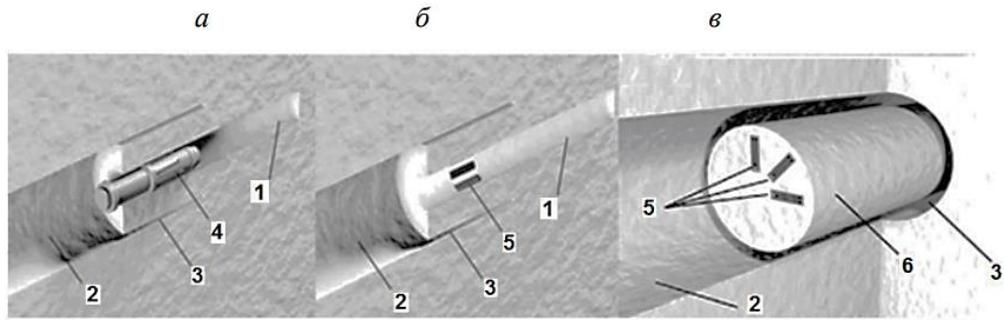


Рисунок 1.17 – Разновидности выполнения измерений методом полной разгрузки:  
а) схема Н. Хаста, б) схема Е. Лимана, в) согласно методике ВНИМИ [135]

В условиях массива пород Ждановского месторождения для выполнения исследования параметров НДС применялась технология измерений согласно методике ВНИМИ. Принцип измерений состоит в том, что в массиве пород бурятся скважины определенной глубины, обеспечивающей выход за пределы приконтурной зоны разрушенных пород. Обычно для измерений в массиве бурят 3 скважины во взаимно ортогональных направлениях (рисунок 1.18).

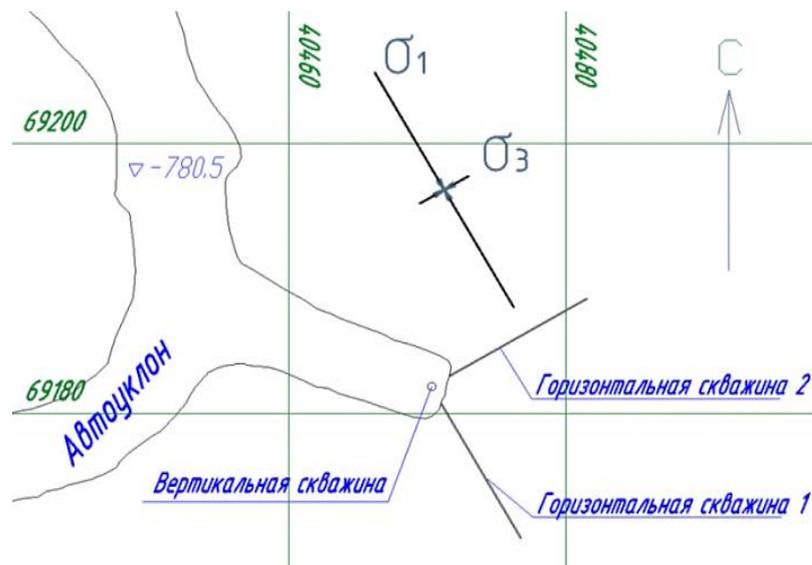


Рисунок 1.18 - Схема размещения скважин для измерения напряжений методом полной разгрузки

Датчики измерения деформации (тензодатчики) наклеиваются на плоский торец скважины. Затем скважина обустраивается с использованием колонковой коронки и вокруг участка скважины с наклеенными тензодатчиками формируется пустое кольцевое пространство (рисунок 1.19) [154-156]. Операция обустройства снимает напряжения, присутствующие на плоском торце скважины, и приводит к изменению значений деформаций.

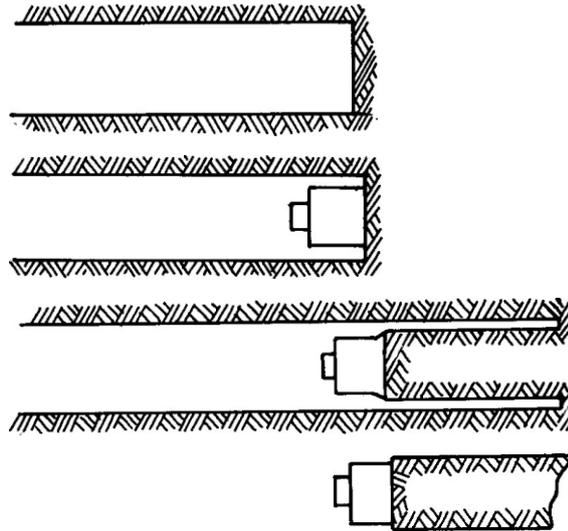


Рисунок 1.19 – Этапы обустройства скважины для определения параметров НДС массива пород методом полной разгрузки в варианте торцевых измерений [154]

Вычисление действующих в массиве напряжений выполняют с использованием математического аппарата теории упругости с учетом значений упругих констант породы (модуля упругости  $E$  и коэффициент Пуассона  $\nu$ ) в точках измерений [109, 154-156].

Для определения особенностей и закономерностей напряженного состояния массива пород, а также прогнозирования трансформации поля напряжений в процессе ведения горных работ, в настоящее время наиболее часто выполняют моделирование НДС с использованием численных методов.

### 1.3.2.3 Численные методы исследования напряженного состояния массивов пород

Численное моделирование, основанное на механике деформируемого твердого тела [5], в задачах геомеханики использует несколько методов, наиболее распространенными из которых являются метод конечных элементов, метод граничных элементов и метод дискретных элементов.

Метод конечных элементов является универсальным и предоставляет возможность эффективно решать все физические задачи, которые могут быть описаны дифференциальными уравнениями [92]. Области, в которых используется метод конечных элементов, очень разнообразны: гидродинамика, газодинамика, электричество и магнетизм, механика деформируемого твердого тела, теплообмен и др. Особое место среди областей применения данного метода занимают задачи геомеханики [2].

Принцип метода конечных элементов состоит в том, что вся исследуемая область делится на подобласти, достаточно малые, чтобы считать внутри их среду однородной и изотропной. Свойства среды в каждой из подобластей описываются постоянными (для данной подобласти) характеристиками. В случае решения задач геомеханики такими характеристиками являются упругие константы  $E$  и  $\nu$ , а также плотность  $\gamma$ . Эти подобласти называются конечными элементами. Они взаимодействуют друг с другом в узлах через узловые силы и узловые перемещения. Сообщая одному узлу усилие или перемещение, получают отклик во всей системе, в каждом из её узлов путем решения систем дифференциальных уравнений. В результате, в центре каждого элемента получают набор значений полного тензора напряжений, деформаций и перемещений.

В основе метода граничных элементов лежит теория интегральных уравнений. Суть метода состоит в разбиении бесконечного тела на бесконечное количество отрезков, примыкающих друг к другу, образуя некоторую замкнутую ломаную линию. Напряжения в произвольной точке среды получают, суммируя вклады от действия усилий на каждом из этих отрезков. Полученная ломаная представляет собой некоторую границу в упругом теле, а отрезки ломаной, на которых приложены усилия, называются граничными элементами. Численная процедура заключается в суммировании вкладов от усилий на каждом отрезке – граничном элементе. Влияние каждого усилия на соответствующем отрезке дает сингулярное решение, которое удовлетворяет уравнению равновесия [10]. Метод граничных элементов позволяет сократить количество вычислений, тем самым, не требуя значительных вычислительных мощностей, как при применении метода конечных элементов.

Метод дискретных элементов основан на численном решении трёхмерных стационарных и нестационарных уравнений динамики жидкости, газа и движении твёрдых частиц различной формы. Они включают в себя законы сохранения массы, импульса и энергии, уравнения состояния объекта в пространстве. Так как в приближении горный массив с его системной трещиноватостью можно представить как совокупность частиц, метод дискретных элементов применим для решения задач геомеханики. Таким образом, используемый для моделирования метод дискретных элементов позволяет, например, увидеть процесс сдвижения горных пород в результате ослабления физико-механических связей в структурных элементах горного массива [119].

Особенностью метода конечных элементов является дискретизация областей сложных геометрических форм с требуемой точностью и, как следствие, возможность получения наиболее корректного решения задач для объектов со сложным геометрическим строением, что характерно для большинства рудных тел. В связи с этим преимуществом, для расчета НДС массива пород Ждановского месторождения в работе использован метод конечных элементов.

Важным этапом, следующим после выполнения численного моделирования НДС, является интерпретация его результатов. Для определения областей потенциального разрушения массива пород требуется применение критерия, описывающего развитие его критических состояний.

### 1.3.3 Обзор наиболее распространенных критериев оценки прочности

Для определения условий, при которых произойдет разрушение, необходимо использовать критерий, учитывающий структуру или свойства массива пород, а также величины действующих напряжений. Например, для Хибинских месторождений условие удароопасности реализуется в случае, если действующие в массиве напряжения составляют более половины предела прочности на сжатие в образце горной породы [61].

Для того, чтобы иметь возможность корректно охарактеризовать массив Ждановского месторождения с точки зрения его прочности и потенциальной удароопасности, необходимо дать некоторые пояснения, касающиеся наиболее распространенных теорий прочности, а также критериев оценки удароопасности пород и горных массивов.

Вопрос определения прочности горных пород и массивов имеет одно из первостепенных значений для оценки их потенциальной удароопасности. В целом, прочность какого-либо материала характеризует его способность сопротивляться действию усилий, вызывающих какие-либо деформации или, иными словами, способность воспринимать воздействие внешних сил без разрушения [11]. На прочность материала могут оказывать влияние неограниченное количество факторов, а гипотезу о преимущественном влиянии определенного фактора называют теорией прочности [98].

В случае простого деформирования прочность какого-либо элемента определяют путем сравнения максимальных значений заданных напряжений  $\sigma_{max}$  с предельными значениями, которые получают экспериментально. При сложном напряженном состоянии такой подход неприменим в связи с тем, что предельное состояние может наступать при различных комбинациях главных напряжений [53].

В связи с тем, что массив горных пород является сложным природным объектом, напряженное состояние которого определяется глубиной ведения горных работ, свойствами горных пород, строением и т.д. [12], невозможно применять одну универсальную теорию прочности, описывающую процесс разрушения [6].

В наиболее общем виде существующие теории прочности горных пород и массивов можно условно разделить на классические и современные [76]. Среди классических теорий прочности традиционно выделяют пять основных.

1. Теория наибольших нормальных напряжений (первая теория прочности).

В случае, когда изучаемый участок массива находится в условиях линейного напряженного состояния, для определения опасных состояний применяют теорию наибольших нормальных напряжений [91]. Согласно этой теории, нарушение прочности материала возникает, когда наибольшее по абсолютной величине нормальное напряжение достигает предельного значения при простом растяжении или сжатии.

Условие прочности при этом записывают в следующем виде (1.8):

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma], \quad (1.8)$$

где  $\sigma_{\max}$  - величина наибольшего по модулю значения главного напряжения на исследуемом участке;  $[\sigma]$  - предельно допустимое значение напряжения при одноосном сжатии или растяжении.

Эта теория дает удовлетворительные результаты для хрупких материалов, хорошо подходит для описания хрупкого разрушения горных пород на контуре выработок [91], однако неприменима для материалов, демонстрирующих пластический характер разрушения [98] и не выполняется для случая сложного напряженного состояния.

2. Теория наибольших линейных деформаций (вторая теория прочности).

Данная теория учитывает в качестве критерия разрушения материала наибольшую по абсолютному значению относительную линейную деформацию  $\varepsilon_{\max}$ , иными словами, разрушение материала наступает при условии, когда наибольшее удлинение или укорочение материала достигает критического значения.

Условие прочности согласно теории наибольших линейных деформаций (1.9):

$$\varepsilon_{\max} \leq [\varepsilon], \quad (1.9)$$

где  $\varepsilon_{\max}$  - величина наибольшей по модулю деформации на исследуемом участке;  $[\varepsilon]$  - допускаемая величина деформации.

С использованием обобщенного закона Гука выражение (1.9) можно преобразовать следующим образом (1.10):

$$\varepsilon_{\max} = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)) \leq \frac{[\sigma]}{E}, \quad (1.10)$$

где  $\nu$  - коэффициент Пуассона.

В виде напряжений вторая теория прочности приобретает вид (1.11):

$$\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3) \leq [\sigma], \quad (1.11)$$

3. Теория наибольших касательных напряжений (третья теория прочности).

Причиной разрушения материала, согласно данной теории, считается сдвиг, вызываемый касательными напряжениями. Полагают, что предельное состояние возникает тогда, когда наибольшее касательное напряжение  $\tau_{max}$  достигает критического значения, которое соответствует предельному для данного материала при растяжении [98]. При этом предельное состояние материала выражается в виде разрушения или пластического течения.

Условие прочности согласно теории наибольших касательных напряжений (1.12):

$$\tau_{max} \leq [\tau], \quad (1.12)$$

где  $\tau_{max}$  - максимальное касательное напряжение;  $[\tau]$  - допускаемая величина касательного напряжения.

Необходимо принять, что переход от упругого состояния к пластическому происходит при достижении касательным напряжением величины  $\tau_{max}$  [11], значение которого определяется (1.13):

$$\tau_{max} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2}, \quad (1.13)$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  – значения максимальной и минимальной компонент главных нормальных напряжений на исследуемом участке. Таким образом, выражение (1.12) преобразуется и условие прочности приобретает следующий вид (1.14):

$$\tau_{max} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \leq [\tau] = \frac{[\sigma]}{2}, \quad (1.14)$$

где  $[\sigma]$  – предельно допустимое значение нормальных напряжений [39].

Теория подтверждается для пластичных материалов, одинаково сопротивляющихся растяжению и сжатию.

#### 4. Энергетическая теория прочности (четвёртая теория прочности).

В роли критерия прочности, согласно данной теории, выступает количество удельной потенциальной энергии формоизменения, при котором достигается предельное для данного материала состояние при растяжении.

Условие прочности в этом случае записывают следующим образом (1.15):

$$u_\phi \leq [u_\phi], \quad (1.15)$$

где  $u_\phi$  - удельная потенциальная энергия формоизменения;  $[u_\phi]$  - предельно допустимое значение удельной потенциальной энергии формоизменения при растяжении материала [98].

Энергетическая теория прочности дает более точный результат в плане совпадения теоретических и экспериментальных расчетов в сравнении с теорией наибольших касательных напряжений, при этом широко применяется для пластичных материалов, и неприменима для хрупких.

#### 5. Теория прочности Мора (пятая теория прочности).

Теория прочности Мора позволяет учесть различное сопротивление материалов растяжению и сжатию, при этом условия разрушения твердых тел определяются значениями действующих максимального ( $\sigma_1$ ) и минимального ( $\sigma_3$ ) главных напряжений [39], и прочность горных пород практически не зависит от величины среднего по величине напряжения  $\sigma_2$  [138]. Суть теории прочности, предложенная О. Мором, заключается в следующем: разрушение происходит в том случае, если касательные напряжения ( $\tau$ ), являющиеся функцией нормальных ( $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ ), достигнут критического уровня, а в случае, когда касательные напряжения отсутствуют ( $\tau = 0$ ), разрушение произойдет, когда нормальные растягивающие напряжения превысят предел прочности пород на растяжение ( $\sigma_p$ ). Важно, что на основании вышесказанного следует, что теория прочности О. Мора учитывает два вида разрушения в твердых телах: за счет сдвига и отрыва.

Таким образом, условие прочности О. Мора выражается следующим образом (1.16 и 1.17):

$$\sigma_1 - \frac{[\sigma_p]}{[\sigma_{сж}]} \sigma_3 \leq [\sigma_p]; \quad (1.16)$$

$$\sigma_1 \frac{[\sigma_{сж}]}{[\sigma_p]} - \sigma_3 \leq [\sigma_{сж}]. \quad (1.17)$$

При условии, когда  $\sigma_p = \sigma_{сж}$ , имеет место случай пластичности, и теория прочности О. Мора совпадает с третьей теорией прочности.

Помимо рассмотренных классических теорий прочности, для горных пород существуют несколько современных, полученных зачастую с использованием эмпирического подхода. Наиболее известными и распространенными современными подходами к определению прочности горных пород являются обобщенное уравнение паспорта прочности М.М. Протоद्याконова [132], критерий прочности З.Т. Бенявского [141], а также критерий прочности Хука-Брауна. В связи с тем, что первые две теории имеют ряд ограничений [76], не имеет большого смысла останавливаться на подробном их описании.

Эмпирический критерий прочности Хука-Брауна основан на значительном опыте описания характеристик горных массивов в процессе оценки и разработки месторождений и в настоящее время является одним из наиболее популярных при расчётах прочности массивов горных пород.

В общем виде нелинейный критерий прочности массива горных пород Хука-Брауна представлен (1.18):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m \cdot \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1.18)$$

где  $\sigma_{ci}$  - прочность на одноосное сжатие ненарушенных горных пород (в образце);  $m$  и  $s$  - безразмерные константы, характеризующие свойства материала, при этом  $4 \leq m \leq 33$  [29].

Показатель степени  $a$ , а также значения  $m$  и  $s$  определяют с помощью эмпирических уравнений (1.19 - 1.21):

$$m = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right); \quad (1.19)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right); \quad (1.20)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right), \quad (1.21)$$

где константы  $m_i$ ,  $GSI$  и  $D$  определяют экспериментально в натуральных и лабораторных условиях, учитывая свойства массива горных пород, его структурные особенности, степень трещиноватости, характеристики трещин и т.д. [76]. Несмотря на учет характеристик структурных неоднородностей массива и большой опыт применения этого критерия, он имеет ряд недостатков, и его использование в качестве единственного критерия при определении прочности массивов горных пород не является вполне корректным.

При оценке НДС массива пород важным является не только выявление областей критических состояний массива пород, но и прогнозирование вероятного вида разрушения по интенсивности проявлений (шелушение, стреляние, динамическое заколообразование, горный удар и пр). Выполнить такую оценку позволяет эмпирический критерий удароопасности массива пород, разработанный в Горном институте КНЦ РАН.

#### 1.3.4 Критерий удароопасности массивов пород Горного института КНЦ РАН

На основании результатов экспериментальной проверки [136] наиболее распространенных теорий прочности материалов и массивов горных пород определено, что все рассмотренные выше теории прочности не могут быть, безусловно, применены к случаям объемного напряженного состояния. В связи с этим, исследователи Горного института КНЦ РАН на протяжении многих лет занимались изучением закономерностей разрушения массивов горных пород. Наибольший опыт накоплен при исследовании Хибинского массива скальных пород [61, 126].

В результате исследований, которые включали визуальное обследование выработок, бурение скважин и описание интервалов дискования керна, лабораторные испытания образцов пород, а также натурные изменения напряжений, действующих в массиве, было определено, что состояние выработок зависит от уровня действующих в массиве пород напряжений ( $\sigma_d$ ) и значений предела прочности пород при одноосном сжатии ( $\sigma_{сж}$ ).

Можно выделить три уровня действующих напряжений вблизи контура выработок, характеризующихся различным состоянием устойчивости выработок:

1) Устойчивое состояние выработки, стреляние и отслоения пород приконтурной части отсутствуют при значении напряжений (1.22):

$$\sigma_d \leq 0,3 \cdot \sigma_{сж} \quad (1.22)$$

2) Разрушения в виде плитчатых отслаиваний и стреляния пород происходят при достижении напряжениями значений (1.23):

$$\sigma_d \geq (0,5 \div 0,8) \cdot \sigma_{сж} \quad (1.23)$$

3) Горные удары и интенсивное стреляние реализуются при условии, если (1.24):

$$\sigma_d > 0,8 \cdot \sigma_{сж} \quad (1.24)$$

Таким образом, по данным натурных измерений величины сжимающих напряжений, равные  $(0,5 \div 0,8) \sigma_{сж}$  должны считаться для условий Хибинских рудников предельными [61, 126]. Данная закономерность подтверждается наблюдениями и для других массивов скальных, высокопрочных и высоконапряженных пород. Преимуществом критерия удароопасности является относительная простота его применения при оценке вероятности разрушения массива пород в динамической форме, а также возможность определения интенсивности проявления потенциальных разрушений.

#### 1.4 Выполненные ранее исследования и научная новизна работы

Известно [49, 56, 83, 126], что напряженное состояние массива пород формируется совместным действием гравитационной (вертикальной,  $\sigma_v$ ) и тектонической (горизонтальной,  $\sigma_h$ ) составляющих. Соотношение и направление действия главных компонент тензора напряжений может пространственно меняться как по площади, так и по глубине под влиянием различных факторов. В некоторых случаях значения тектонической компоненты могут превышать значения вертикальных напряжений, что влияет на особенности проявлений горного давления [126]. Определение параметров напряженного состояния нетронутого массива пород является первостепенным для прогнозирования геомеханической ситуации в процессе ведения горных работ. Основными характеристиками НДС массива пород являются соотношение главных компонент тензора напряжений, направления их действия и изменение их значений с глубиной.

Вопросам изучения особенностей полей напряжений и закономерностей их трансформации с глубиной посвящено значительное количество исследований, в результате которых накоплена база знаний о параметрах НДС массивов пород, благодаря чему возможен

анализ их особенностей. В результате анализа данных экспериментальных измерений в разных районах мира определено, что распределение вертикальных напряжений описывается линейной зависимостью  $\sigma_v = \gamma H$  (где  $\gamma$  – плотность пород в массиве,  $H$  – глубина) (рисунок 1.20) [38, 39, 82, 128]. В то же время установлено, что распределение тектонической составляющей может иметь линейный характер, а может быть описано нелинейными зависимостями с учетом гипотезы замедления роста тектонической составляющей с некоторой глубины (рисунок 1.21) [73, 93].

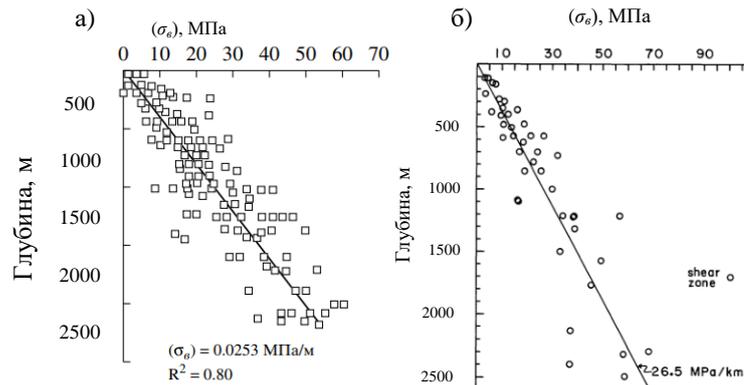


Рисунок 1.20 – Изменение значений вертикальных напряжений с глубиной и их аппроксимация линейными зависимостями: а) в Канаде [47], б) в ЮАР [158]

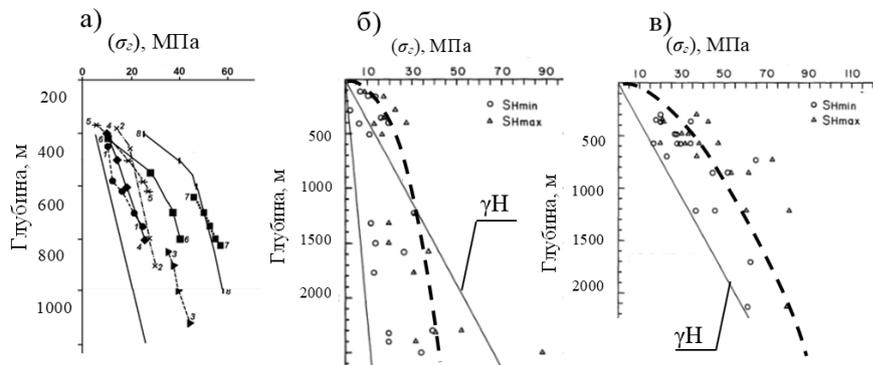


Рисунок 1.21 – Изменение значений горизонтальных напряжений с глубиной а) на рудниках СССР [47], б) в ЮАР, в) в Канаде [158]

Для сбора данных о параметрах полей действующих напряжений существует Мировая карта напряжений (World Stress Map – WSM). WSM является постоянно пополняемым международным проектом, который содержит информацию о напряженном состоянии верхней части земной коры. В настоящее время накоплено более 20000 записей, полученных в результате исследований типов природных полей напряжений по всему миру [66, 80, 146]. На карту с помощью условных обозначений наносят установленный в координатах измерений вид тектонического режима (сброс, взброс или сдвиг), а также проекцию направления действия главной горизонтальной компоненты напряжений [164]. На рисунке 1.22 представлен фрагмент Европейской части WSM.

В территориальной близости от Ждановского месторождения в базу данных Мировой карты напряжений внесены результаты исследования, выполненного методом оценки разрушений стенок скважин (рисунок 1.23). Определено, что главная компонента горизонтальных напряжений направлена на северо-запад с азимутом приблизительно равным  $115^\circ$ . Данные о тектоническом режиме в точке замера отсутствуют, поэтому невозможно сделать вывод о типе поля напряжений.

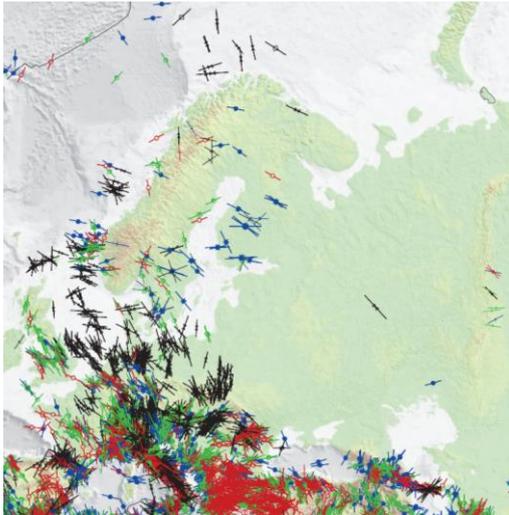


Рисунок 1.22 – Фрагмент Европейской части WSM [146]

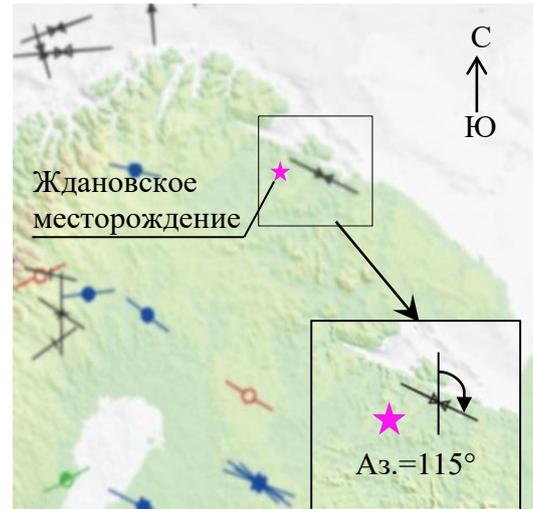


Рисунок 1.23 - Направление действия главной субгоризонтальной компоненты напряжений вблизи Печенгского рудного поля согласно данным WSM [146]

Наибольший вклад в направление исследования полей напряжений Печенгской структуры в советский и современный периоды внесли сотрудники профильных научно-исследовательских организаций: Кольского научного центра РАН, ВНИМИ, ИГД СО РАН и др.

Существует несколько гипотез о типе природного напряженного состояния массива пород Ждановского месторождения. Большой интерес представляют исследования НДС в процессе бурения Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3), расположенной в районе Печенгского рудного поля. Исследованию напряженно-деформированного состояния массива пород в районе Ждановского месторождения и СГ-3 посвящены несколько крупных научно-исследовательских работ [17, 27, 40, 45, 47, 58, 99, 100, 107]. Согласно наиболее распространенной гипотезе, сформулированной по результатам натурных исследований на месторождениях Кольского полуострова, в региональном масштабе максимальная компонента сжимающих напряжений ориентирована в субширотном направлении [47].

В работе [45] приводится карта напряженного состояния горных пород в основных горнопромышленных районах бывшего СССР по данным измерений в рудниках, фрагмент которой для Северо-Западной части России приведен на рисунке 1.24. Из рисунка видно, что по

данным исследований напряжений в Кольской сверхглубокой скважине максимальная сжимающая субгоризонтальная компонента напряжений направлена с азимутом равным  $64^\circ$ . В работах [17, 107] указано, что субгоризонтальные напряжения близки по величине, а максимальная сжимающая компонента направлена с азимутом  $140^\circ$ .



Рисунок 1.24 – Фрагмент карты напряженного состояния горных пород Северо-Западной части России по данным измерений в рудниках [107]

В разные годы коллективы различных научно-исследовательских институтов выполняли работы по изучению свойств горных пород и параметров напряженно-деформированного состояния массива пород Ждановского месторождения, на основании которых были сформулированы гипотезы о типе поля действующих напряжений.

Так, специалисты ИГД СО РАН выполняли работы по измерению напряжений в массиве методом щелевой разгрузки в районе Западного и Юго-Западного рудных тел Ждановского месторождения [27]. В результате измерений определено, что в районе ЗРТ субгоризонтальная компонента поля напряжений превышает вертикальную, тогда как в районе ЮЗРТ наблюдается обратная картина. На такие результаты, предположительно, могло повлиять то, что измерения выполняли в выработках, находящихся в зоне влияния очистных подземных работ и в области влияния карьера. Несмотря на высокую ценность результатов данных измерений, для корректной интерпретации необходимо проведение серии измерений в нетронутым массиве либо выполнение реконструкции природного поля напряжений, например, с использованием метода численного моделирования НДС. Помимо изучения параметров поля напряжений, были выполнены лабораторные испытания образцов основных породных разностей, слагающих Ждановское месторождение и определены значения основных физико-механических характеристик [28].

На протяжении нескольких лет специалисты АО «ВНИМИ» и ООО НИЭЦ «Техногем» (г. Санкт-Петербург) выполняли исследования по тематике геомеханического сопровождения горных работ на руднике «Северный» [99, 100]. В рамках научного сопровождения выполнен комплекс работ, включающий измерения действующих напряжений в массиве пород

Ждановского месторождения, наблюдения за сдвижением земной поверхности при ведении подземных горных работ, визуальное обследование горных выработок, а также разработку мероприятий и методик по управлению геомеханическими процессами и устойчивостью горного массива.

Измерения напряжений в массиве выполняли с использованием ультразвукового метода [99, 100]. По большей части был исследован район отработки Заполярного месторождения на глубинах ведения горных работ в интервалах от 800 до 1000 м от дневной поверхности и область очистных работ в районе ЦРТ на отметках подэтажей -222 м / -254 м. В результате исследований в районе Заполярного месторождения определено, что тип поля напряжений не является однородным: на одних участках зафиксировано преобладание вертикальной компоненты напряжений над горизонтальной (гравитационный тип), а на других – соотношение главных компонент, характерное для равнокомпонентного (гидростатического) типа поля напряжений. Такие результаты могут быть связаны с тем, что станции измерений напряжений располагались в зонах влияния очистных работ и вблизи камер, находящихся в различных фазах отработки и закладки. В районе ЦРТ также получены противоречивые результаты измерений напряжений, в связи с тем, что объектом исследования являлось изучение трансформации поля напряжений под влиянием подступающего фронта очистных работ, а также исследование эффективности разгрузочных мероприятий, при этом измерения были выполнены в зонах влияния очистных работ. Таким образом, нельзя сделать однозначный вывод о доминирующем типе природного поля напряжений Ждановского месторождений.

С 2016 года специалистами Горного института КНЦ РАН ведутся научно-исследовательские работы по геомеханическому сопровождению горных работ на Ждановском месторождении, которые позволили уточнить параметры НДС и дать ряд рекомендаций по рациональному развитию горных работ с точки зрения минимизации геодинамических рисков. Накоплен большой объем натурных, лабораторных и численных данных. Автор диссертации является одним из исполнителей упоминаемых работ и ставит перед собой задачу комплексного анализа и систематизации исторических данных и материалов исследований для получения новой информации об особенностях и установления зависимостей в вопросах изучения характеристик массивов горных пород и действующих в них природных и техногенных полей напряжений, что является основой для решения задач по повышению достоверности геомеханических прогнозов.

Результаты предыдущих исследований не дают однозначного ответа на вопрос о типе и параметрах природного напряженного состояния массива пород в районе Ждановского месторождения. Недостаточность и противоречивость результатов известных исследований требует более глубокого изучения параметров НДС массива пород Ждановского месторождения

и определения закономерностей распределения напряжений для прогнозирования геомеханической ситуации, выявления областей развития критических состояний и оценки вероятности разрушений массива пород в динамической форме. На основании вышеизложенного сформулированы цель и основные задачи исследования.

**Целью работы** является выявление 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.

В данном исследовании впервые совокупно представлены и обоснованы результаты комплексной оценки, включающей анализ и систематизацию характеристик горных пород и массива Ждановского месторождения, реконструкцию параметров его природного напряженного состояния и обоснование оптимального ведения горных работ с использованием численного геомеханического моделирования. В результате исследования определены характеристики массива с учетом его структурной неоднородности, соотношения и направления действия главных компонент природного поля напряжений, закономерности их изменения с глубиной, спрогнозировано изменение геомеханического состояния в процессе отработки запасов и определены условия, при которых появляется вероятность разрушений массива в динамической форме.

## ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ И ХАРАКТЕРИСТИК МАССИВА ПОРОД ЖДАНОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Для отнесения месторождений или их участков к категории склонных или опасных по горным ударам необходимо выполнение двух основных условий:

- 1) породы, слагающие массив, должны быть способны к накоплению значительных величин упругой энергии деформирования и высвобождению ее в виде хрупкого разрушения;
- 2) действие в массиве напряжений, значения которых близки к пределу прочности пород при сжатии  $\sigma_{сж}$  [131].

С целью оценки склонности горных пород к динамическому разрушению 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.

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. Корректная оценка устойчивости элементов разработки требует учета влияния трещиноватости на свойства массивов, для чего выполняют исследования их качественных характеристик, основанные на определении параметров структурных неоднородностей.

### **2.1 Исследование физико-механических свойств горных пород и оценка их склонности к динамическому разрушению**

Исследования физико-механических характеристик горных пород Ждановского месторождения, а также определение их склонности к разрушению в динамической форме были выполнены в рамках нескольких научно-исследовательских работ. Изучением свойств образцов породных разностей Ждановского месторождения занимались специализированные лаборатории ОАО «ВНИМИ», ООО НИЭЦ «Техногем» (г. Санкт-Петербург), ИГД СО РАН, Горного института ФИЦ КНЦ РАН и Санкт-Петербургского горного университета. В работе автором аккумулированы, статистически обработаны и проанализированы доступные результаты исследований физико-механических характеристик основных пород и руд изучаемых месторождений.

### 2.1.1 Анализ и обобщение результатов лабораторных исследований физико-механических характеристик основных породных разностей

При анализе результатов предыдущих исследований – лабораторных определений физико-механических характеристик пород Ждановского месторождения, выполненных разными научно-исследовательскими организациями [28, 30, 35, 43, 96, 99, 107], установлено, что в пределах всех породных разностей наблюдается сильная неоднородность свойств. Разброс значений физико-механических характеристик может быть обусловлен особенностями залегания и требует тщательной статистической обработки.

В научно-исследовательских работах АО «ВНИМИ» [99, 100] указано, что в пределах рудных тел значения плотности увеличиваются с ростом содержания полезного компонента (таблица 2.1).

Таблица 2.1 - Средние значения плотности основных породных разностей Ждановского месторождения

Увеличение содержания полезного компонента в рудном теле		Наименование породы	Среднее значение плотности $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>
		Брекчиевидные руды ЮЗРТ	4,18
		Сплошные руды ЮЗРТ	3,25
		Серпентинизированные перидотиты ЦРТ	2,95

В связи с отсутствием описания значительного количества испытаний, в Работе принято допущение о том, что плотность и другие физико-механические характеристики в пределах литологических разностей Ждановского месторождения являются однородными, при этом для определения средних значений применялись методы математической статистики.

В соответствии с требованиями нормативных документов [21-24] вычислены следующие статистические характеристики прочностных и деформационных свойств исследуемых пород:

1) среднее арифметическое значение характеристики по пробе  $x_{cp}$ , определяемое по формуле (2.1):

$$x_{cp} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}, \quad (2.1)$$

где  $x_i$  – значение показателя свойства горной породы ( $i = 1, 2, 3 \dots, n$ ),

$n$  – количество образцов в выборке.

2) среднеквадратичное (стандартное) отклонение  $S(x)$ , которое характеризует отклонение отдельных значений от среднего и вычисляется по формуле (2.2):

$$S(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_{cp} - x_i)^2}, \quad (2.2)$$

3) коэффициент вариации  $V(x)$  - отношение стандартного отклонения к среднему значению, определяется по формуле (2.3):

$$V(x) = \frac{S(x)}{x_{cp}} \cdot 100\% \quad (2.3)$$

Выявление выбросов, то есть аномально высоких либо низких значений, было выполнено с использованием метода отбраковки Смирнова-Граббса [16, 72]. В результате были получены наиболее достоверные средние значения физико-механических характеристик основных породных разностей Ждановского месторождения.

Следующим этапом обработки результатов являлось объединение породных разностей в домены (совокупности) на основании принципа соответствия значений свойств с применением критерия Стьюдента [25, 68]. В результате анализа экспериментальных данных и сравнения выборок определено, что основные породные разности, слагающие Ждановское месторождение, могут быть сгруппированы в три домена по принципу статистического соответствия физико-механических свойств. Первый домен включает интрузивные породы ультраосновного состава, слагающие рудные тела (перидотиты и приуроченные к ним пироксениты), второй – вмещающие интрузивные породы основного состава (габбро, диабазы, габбро-диабазы); к третьему домену относятся вмещающие породы туфогенно-осадочного происхождения. Значения основных физико-механических характеристик породных доменов представлены в виде диаграмм на рисунке 2.1, а также приведены в таблице 2.2.

В результате статистической обработки результатов исследований 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).

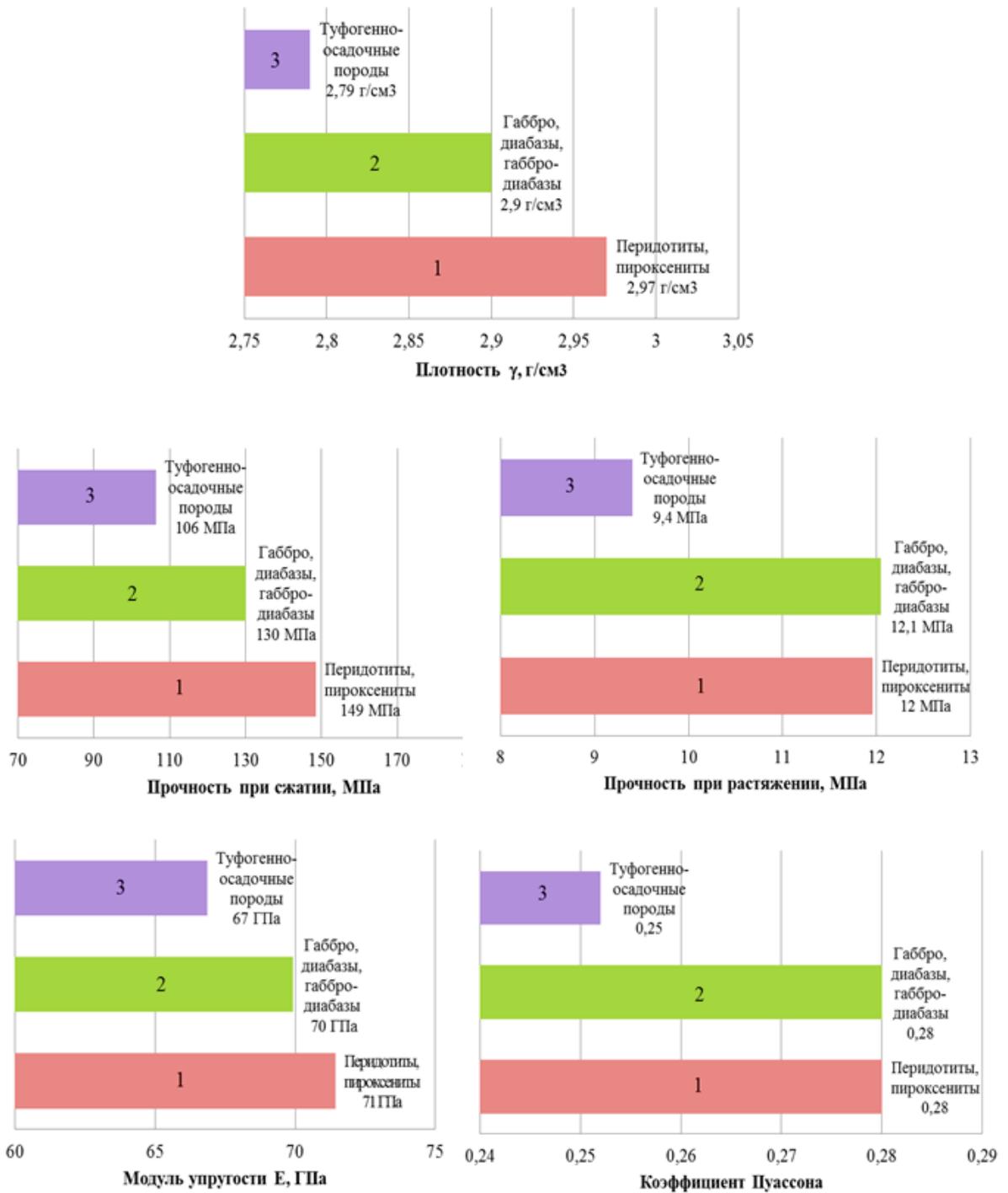


Рисунок 2.1 – Значения основных физико-механических характеристик доменов пород Ждановского месторождения

Таблица 2.2 - Средние значения основных физико-механических характеристик породных доменов Ждановского месторождения

Наименование совокупности породных разностей (домена)	Плотность $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>		Прочность при сжатии $\sigma_{сж}$ , МПа		Прочность при растяжении $\sigma_p$ , МПа		Модуль упругости $E$ , ГПа		Коэффициент Пуассона $\nu$		Сцепление $C$ , МПа		Угол внутр. трения $\phi$ , °	
	S	v	S	v	S	v	S	v	S	v	S	v	S	v
1 (перидотиты, пироксениты)	2,97		149		12,0		71		0,28		13		40	
	S	0,12	S	41,9	S	2,5	S	13,0	S	0,03	S	1,43	S	0,12
	v	4%	v	28%	v	21%	v	18%	v	10%	v	11%	v	4%
2 (габбро, диабазы, габбро-диабазы)	2,9		130		12,1		72		0,28		15		42	
	S	0,06	S	32,9	S	3,1	S	8,9	S	0,02	S	3,00	S	7,10
	v	2%	v	25%	v	25%	v	12%	v	8%	v	20%	v	17%
3 (туфогенно-осадочные породы, филлиты)	2,79		106		9,4		67		0,25		11		38	
	S	0,08	S	19,7	S	1,3	S	10,7	S	0,04	S	2,1	S	3,04
	v	3%	v	19%	v	14%	v	16%	v	15%	v	19%	v	8%
*примечание: S - стандартное отклонение (имеет размерность измеряемой величины), v - коэффициент вариации (%).														

## 2.1.2 Определение склонности горных пород к разрушению в динамической форме

Согласно п.3 раздела I «Методических рекомендаций по оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам» [86], основными рекомендуемыми методами определения склонности месторождения к горным ударам являются: 1) метод дискования керна; 2) метод отношения модуля спада к модулю упругости для типов горных пород, представленных на месторождении.

В работе рассмотрены результаты лабораторных исследований с использованием различных методов определения склонности пород к разрушению в динамической форме.

### 2.1.2.1 Оценка склонности пород к хрупкому разрушению

Способность горных пород полностью восстанавливать первоначальную форму после снятия нагрузки называется упругостью. Хрупкостью называют способность твердых горных пород разрушаться без заметных деформаций, развивающихся до разрушения.

Одним из наиболее простых критериев оценки хрупкости горных пород является оценка коэффициента хрупкости  $K_{хр}$  по отношению величины предела прочности при одноосном сжатии  $\sigma_{сж}$  к величине предела прочности при одноосном растяжении  $\sigma_p$ , описываемому по формуле (2.4):

$$K_{хр} = \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p} \quad (2.4)$$

Для того, чтобы определить степень хрупкости либо пластичности горных пород используют обратное соотношение:  $\sigma_p/\sigma_{сж}$ . Получаемая величина может изменяться от 0 до 1. При значении  $\sigma_p/\sigma_{сж} = 0$  можно говорить об идеальной хрупкости, а при  $\sigma_p/\sigma_{сж} = 1$  – об идеальной пластичности. Реальные горные породы, в связи с неоднородностью своего строения, занимают промежуточное положение, и подавляющее большинство скальных пород стремятся к значениям  $\sigma_p/\sigma_{сж} \approx 0,1$  [137]. В таблице 2.3, для наглядности, приведена выборка результатов испытаний образцов породных разностей Ждановского месторождения, изготовленных из штуфов. Исследования были выполнены сотрудниками Горного института КНЦ РАН в 2018 году [34].

Таблица 2.3 – Выборка результатов определения прочностных свойств и коэффициента хрупкости  $K_{хр}$  пород Ждановского месторождения

Наименование породы	Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$ , МПа	Предел прочности при растяжении $\sigma_p$ , МПа	Коэффициент хрупкости $K_{хр}$	$\sigma_p/\sigma_{сж}$
Перидотит	188	16	11,7	0,09
	193	14,5	13,3	0,08
	190	7,6	25	0,04
	183	19,4	9,4	0,11
	187	14,2	13,2	0,08
	201	12	16,7	0,06
	167	13,3	12,6	0,08
	179	13,6	13,2	0,08
	168	14	12	0,08
	149	11,8	12,6	0,08
	143	11,4	12,5	0,08
	154	11,7	13,2	0,08
	Среднее значение $K_{хр}$			
Диабаз, габбро, габбро-диабаз	70	22,7	3,1	0,32
	86	13,3	6,5	0,15
	93	14,4	6,4	0,16
	70	11,6	6	0,17
	47	19,8	2,4	0,42
	92	9,5	9,7	0,1
	99	20	5	0,2
	174	23	7,6	0,13
	150	22,9	6,5	0,15
	97	16,1	6	0,17
	74	14,4	5,1	0,19
	69	23,2	3	0,34
	Среднее значение $K_{хр}$			
Туфогенно-осадочная порода	132	14,8	9	0,11
	98	13,2	7,4	0,14
	123	8,9	13,8	0,07
	154	21,8	7,1	0,14
	174	17,1	10,2	0,1
	158	6,6	23,8	0,04
	90	11,6	7,8	0,13
	110	20,5	5,4	0,19
	86	13,9	6,2	0,16
	98	15,4	6,3	0,16
	52	11,4	4,6	0,22
	107	10	10,7	0,09
Среднее значение $K_{хр}$				<b>0,13</b>

Из данных таблицы 2.3 можно сделать вывод о том, что практически все исследованные образцы пород Ждановского месторождения демонстрируют склонность к хрупкому разрушению, так как значение соотношения  $\sigma_p/\sigma_{сж}$  близко к нулю.

### 2.1.2.2 Оценка потенциала удароопасности пород по критерию П. Кайзера

Еще одним методом оценки склонности пород к горным ударам является критерий П. Кайзера [9, 42, 142]. Этот критерий позволяет оценивать потенциал удароопасности пород исходя из значений их коэффициента хрупкости и прочности при одноосном сжатии. Полученные для основных породных разностей Ждановского месторождения результаты оценки потенциала удароопасности по критерию П. Кайзера представлены на рисунке 2.2.

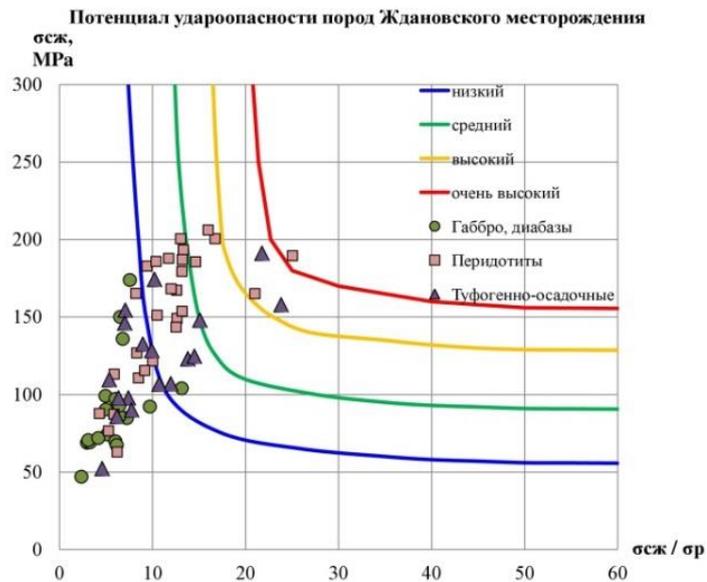


Рисунок 2.2 - Потенциал удароопасности основных породных разностей Ждановского месторождения по критерию П. Кайзера

Из графика, приведенного на рисунке 2.2, видно, что 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). Вмещающие породы габбро-верлитового комплекса по критерию П. Кайзера демонстрируют низкую и среднюю потенциальную удароопасность, образцы пород туфогенно-осадочного происхождения также в большей степени имеют низкий и средний потенциал удароопасности. Образцы пород, слагающих рудные тела (перидотиты и пироксениты) характеризуются низким и средним потенциалом удароопасности, но некоторые из них демонстрируют высокий потенциал удароопасности.

### 2.1.2.3 Оценка склонности пород к динамическому разрушению по критерию Горного института КНЦ РАН

Сущность критерия оценки склонности пород к горным ударам, разработанного в Горном институте КНЦ РАН, заключается в анализе графиков деформирования образцов при одноосном нагружении и сопоставлении их расчетной фактической и идеально упругой энергии деформирования. Если кривая деформирования в допредельной части имеет вогнутую форму относительно идеально упругого случая, а разница значений расчетной идеально упругой и фактической энергий деформирования больше 10%, то породу относят к типу, в котором разрушение происходит в статическом режиме. Если же график деформирования образцов до предела прочности имеет выпуклый вид или близок к линии идеально упругого деформирования, а разница значений расчетной идеально упругой энергии и фактической энергии деформирования меньше 10% или же величина фактической энергии превышает величину идеально упругой, то породы будут разрушаться в динамической форме. Преимуществом данного метода является то, что испытания на одноосное сжатие можно выполнять на стандартных прессах без соблюдения требования их «жесткости», как для критерия А.Н. Ставрогина [42, 43].

Для основных породных разностей Ждановского месторождения была выполнена оценка склонности к горным ударам 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 2.3. При этом разница между расчетной фактической и идеально упругой энергией деформирования составляет менее 10%. Соответственно, все исследованные породы являются склонными к разрушению в динамической форме.

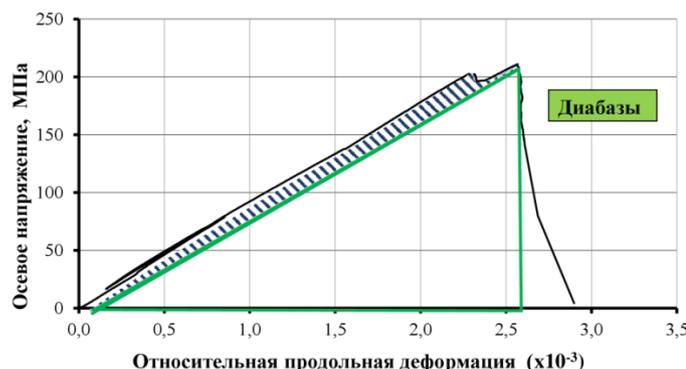


Рисунок 2.3 - График деформирования образца, представленного диабазами, при одноосном сжатии

#### 2.1.2.4 Оценка склонности пород к горным ударам по критерию А.Н. Ставрогина

В ходе испытаний образцов пород Ждановского месторождения при одноосном сжатии установлено, что для них характерно разрушение в динамической форме. Это, в свою очередь, косвенно подтверждает их склонность к горным ударам. Тем не менее, чтобы удостовериться в этом, необходимо определить значение коэффициента удароопасности пород  $K_y$  по критерию А.Н. Ставрогина. Данный метод является фундаментальным и единственным из описанных выше методов, регламентированным в нормативных документах Российской Федерации по оценке удароопасности месторождений [86].

Методика оценки склонности пород к динамическому разрушению по критерию А.Н. Ставрогина состоит в том, что в процессе испытаний образца при одноосном сжатии производят измерения деформаций, на основании чего строят график, изображенный на рисунке 2.4.

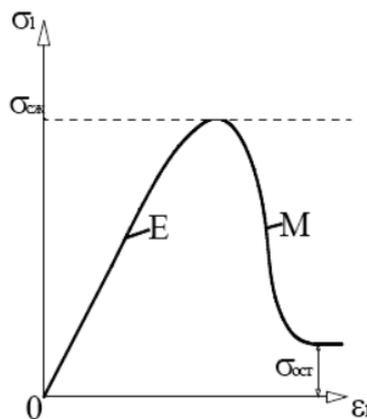


Рисунок 2.4 - Схематическая диаграмма «напряжение-деформация» при одноосном сжатии, где:  $\sigma_I$  – осевое давление на образец, МПа;  $\varepsilon_I$  – продольная деформация образца;  $E$  – модуль упругости образца, ГПа;  $M$  – модуль спада образца, ГПа;  $\sigma_{ост}$  – предел остаточной прочности, МПа;  $\sigma_{сж}$  – предел прочности при одноосном сжатии [86]

График, приведенный на рисунке 2.4, называется диаграммой деформирования. Максимальная несущая способность образца называется пределом прочности, а соответствующая ей деформация называется разрушающей. Разрушающая деформация условно делит процесс деформирования на две стадии: стадию допредельного деформирования и стадию запредельного деформирования (стадия разупрочнения). Если испытания проводят на специальном оборудовании, характеризующемся большей жесткостью нежели материал образца, то получают полную диаграмму деформирования с допредельным и запредельным участками. Если испытания проводят на мягком, относительно образца, оборудовании, то получают

допредельный участок нагружения, так как после достижения предела прочности хрупкого образца происходит его динамическое разрушение, сопровождающееся разлетом осколков.

По графику деформирования образца, приведенному на рисунке 2.4, определяют модуль упругости  $E$  и модуль спада  $M$ . При коэффициенте удароопасности  $K_y = E/M < 1$  порода считается удароопасной, при  $K_y = E/M > 1$  – неудароопасной [86]

Согласно п.4 и п.5 раздела I «Методических рекомендаций ...» [86] месторождение считается потенциально удароопасным с определенной глубины, на которой в породах, составляющих не менее 10% планируемого к отработке объема выполняется соотношение  $K_y = E/M < 1$ , и при этом значения действующих напряжений превышают 80% от предела прочности пород при одноосном сжатии. В случае, когда соотношение  $K_y = E/M < 1$  выполняется так же для не менее, чем 10% планируемого к отработке объема, а действующие напряжения превышают предел прочности пород при одноосном сжатии на определенной глубине, месторождение рекомендовано считать удароопасным.

Наиболее представительные результаты исследований по определению коэффициента удароопасности пород Ждановского месторождения описаны в двух научно-исследовательских работах в 2011 и 2021 годах [35, 96]. В 2011 году в рамках работы по геомеханическому районированию Ждановского месторождения (ООО НИЭЦ «Техногем», г. Санкт-Петербург, [96]) были выполнены лабораторные испытания образцов основных породных разностей при одноосном сжатии и оценка их склонности к горным ударам. В 2021 году специалисты Горного института КНЦ РАН и Санкт-Петербургского горного университета совместно выполняли исследования физико-механических свойств и определение склонности к горным ударам основных породных разностей в районе Центрального рудного тела Ждановского месторождения [35, 43]. Результаты испытаний, выполненных независимо друг от друга, показали, что все типы пород, слагающих исследуемый участок, являются склонными к горным ударам за исключением нескольких проб, составляющих около 3% от общего количества (таблицы 2.4 и 2.5).

Таблица 2.4 – Результаты определения склонности горных пород Ждановского месторождения к горным ударам (лабораторные исследования 2011 года). Фрагмент

Расположение точки отбора	Наименование породы	Модуль упругости $E$ , ГПа	Модуль спада $M$ , ГПа	Коэффициент удароопасности $K_y = E/M$	Заключение о склонности к горным ударам
Юго-западное рудное тело гор. -95 м	Рудные перидотиты	49,0	165,3	0,30	склонен
		64,5	164,3	0,39	склонен
		37,6	175,9	0,21	склонен
		52,1	401,5	0,13	склонен
		32,9	170,3	0,19	склонен
		45,7	278,8	0,16	склонен
		354,9	694,6	0,51	склонен
100,0	654,0	0,15	склонен		
Юго-западное рудное тело гор. -140 м	Рудные перидотиты	58,0	309,8	0,19	склонен
		48,2	174,0	0,28	склонен
		73,0	59,3	1,23	не склонен
		74,4	203,8	0,37	склонен
	Туфогенно-осадочные породы	80,7	487,3	0,17	склонен
36,0		204,5	0,18	склонен	
44,7		107,1	0,42	склонен	
Юго-западное рудное тело гор. -140 м	Туфогенно-осадочные породы	25,6	58,0	0,44	склонен
	Рудные перидотиты	29,0	15,8	1,83	не склонен
	Габбро	43,5	60,2	0,72	склонен
	Рудные перидотиты	36,3	271,5	0,13	склонен
		87,0	358,0	0,24	склонен
Восточное рудное тело гор. -140 м	Габбро	84,7	264,5	0,32	склонен
		55,2	250,6	0,22	склонен
	Туфогенно-осадочные породы	55,5	216,6	0,26	склонен
		40,4	114,3	0,35	склонен
	Рудные перидотиты	65,8	167,6	0,39	склонен
		49,2	96,8	0,51	склонен
		72,6	136,5	0,53	склонен

Таблица 2.5 - Результаты оценки склонности горных пород Центрального участка Ждановского месторождения к горным ударам (лабораторные исследования 2021 года)

Расположение точки отбора	Наименование породы	Модуль упругости $E$ , ГПа	Модуль спада $M$ , ГПа	Коэффициент удароопасности $K_y = E/M$	Заключение о склонности к горным ударам
Центральное рудное тело	Диабазы	90,4	457,5	0,20	склонен
		83,1	612,0	0,14	склонен
		100,3	585,1	0,17	склонен
		87,9	625,4	0,14	склонен
		85,4	374,1	0,23	склонен
		77,5	491,0	0,16	склонен
Центральное рудное тело	Рудные перидотиты	77,5	650,7	0,12	склонен
		81,5	629,1	0,13	склонен
		79,5	413,0	0,19	склонен
		76,0	586,8	0,13	склонен
		84,6	558,9	0,15	склонен
		76,8	502,1	0,15	склонен
Центральное рудное тело	Туфогенно-осадочные породы	61,0	189,3	0,32	склонен
		67,2	145,2	0,46	склонен
		57,7	413,1	0,14	склонен
		57,6	413,9	0,14	склонен
		61,9	466,0	0,13	склонен
		56,2	613,6	0,09	склонен

Установлено, что значения коэффициента удароопасности  $K_y$  практически для всех образцов меньше единицы ( $K_y = E/M < 1$ ), что говорит о склонности к горным ударам всех исследованных породных разновидностей изучаемых месторождений. Результаты испытаний приведены в таблице 2.4 и проиллюстрированы на рисунке 2.5.

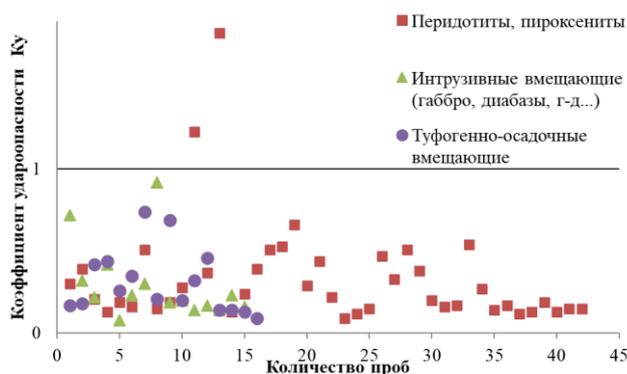


Рисунок 2.5 - Значения коэффициента удароопасности  $K_y$  для образцов пород Ждановского месторождения

Анализ результатов двух независимых исследований по определению коэффициента удароопасности образцов породных разновидностей Ждановского месторождения показал, что все

породы являются склонными к разрушению в динамической форме, соответственно выполняется одно из условий склонности месторождения к горным ударам.

## 2.2 Определение коэффициента структурного ослабления массива пород Ждановского месторождения на основе исследований качественных характеристик

В настоящее время в зарубежной и российской практике проектирования и эксплуатации горнодобывающих предприятий широко применяются рейтинговые классификации качества массива горных пород, которые обеспечивают наиболее комплексный подход к оценке факторов, характеризующих нарушенность массивов. В частности, такие системы классификации используют для оценки прочностных свойств и устойчивости массивов, горных выработок и элементов горной технологии, при проектировании горных предприятий, а также для выбора оптимальных параметров крепления выработок. Наиболее популярными и зарекомендовавшими себя в многолетней практике в России и за рубежом рейтинговыми системами классификации качества массивов горных пород являются: индекс качества массива Н. Бартон ( $Q$  и  $Q'$ ), геомеханическая классификация З.Т. Бенявского ( $RMR$ ), рейтинг массива для горных работ Д. Лобшира ( $MRMR$ ) и геологический индекс прочности Э. Хука ( $GSI$ ).

В основе оценки качества геологической среды лежит описание характеристик массива и поверхностей неоднородностей, таких как: направление и распространение основных систем трещин, степень шероховатости и волнистости поверхностей трещин, их измененность, заполненность, раскрытие стенок трещин, оценка напряженно-деформированного состояния массива, присутствие ослабленных зон, обводненность массива и пр. (рисунок 2.6).

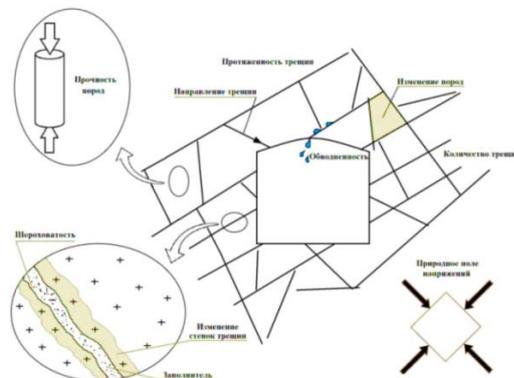


Рисунок 2.6 – Основные характеристики массивов горных пород, исследуемые при оценке качества среды [105]

В работе проанализированы результаты натуральных исследований качественных характеристик массива пород Ждановского месторождения и определены значения коэффициентов структурного ослабления для основных литотипов.

### 2.2.1 Натурные исследования качественных характеристик массива пород

Для оценки качественных характеристик массива пород и руд Ждановского месторождения были определены рейтинговые показатели на основании результатов геотехнического описания керна скважин и картирования обнажений подземных горных выработок.

#### 2.2.1.1 Обработка и анализ данных геотехнического описания керна пород Ждановского месторождения

Выполнена обработка данных геотехнического описания керна четырех скважин, обуренных в районе Центрального рудного тела (ЦРТ) Ждановского месторождения. Нисходящие скважины пройдены из подземной горной выработки в отметке -440 м.

В результате обработки фотографического материала и данных описания ориентированного керна определено, что скважины пересекают несколько литологических разностей, сгруппированных на основании соответствия значений физико-механических свойств (раздел 2.1 данной работы) в три основных домена: 1) интрузивные вмещающие породы (в т.ч. диабазы, габбро и габбро-диабазы); 2) породы туфогенно-осадочного комплекса; 3) перидотиты (в т.ч. пироксениты).

В связи с тем, что показатель нарушенности массива пород трещинами ( $RQD$ ) используется для расчета большинства рейтинговых характеристик породных массивов, важно оценить адекватность полученных результатов. Установлено, что в пределах исследуемых скважин параметр  $RQD$  имеет некоторые разбросы значений, в основном приуроченные к зонам тектонических контактов пород, но в целом отклонения не являются значительными (рисунок 2.7а) и позволяют выполнить общую оценку  $RQD$  по всем скважинам. Корректность определения  $RQD$  может быть проверена с помощью оценки корреляции значений  $RQD$  и частоты трещин ( $FF$ ). В результате обработки данных определено, что зависимость значений  $RQD$  и  $FF$  качественно соответствует функциональной зависимости (2.5), установленной

Пристом и Хадсоном [160] (рисунок 2.7б), что указывает на хорошее качество интерпретации фотографического материала и данных геотехнического описания керна скважин.

$$RQD = 100 \cdot e^{-0,1FF} \cdot (0,1 \cdot FF + 1) \quad (2.5)$$

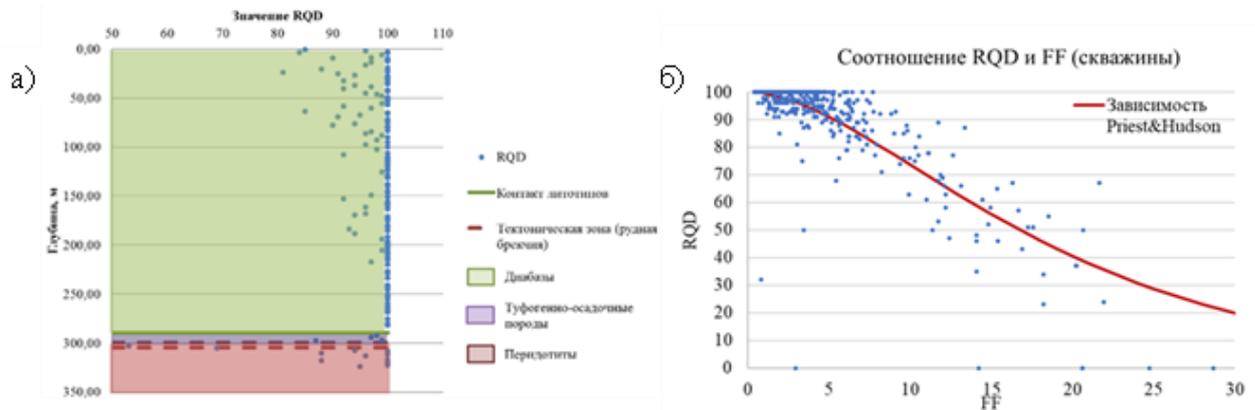


Рисунок 2.7 – Анализ результатов определения параметров нарушенности массива Ждановского месторождения, полученных при обработке данных геотехнического описания скважин: а) распределение значений  $RQD$  по глубине одной из скважин; б) соотношение значений  $RQD$  и  $FF$

Распределения значений показателей нарушенности массива пород ( $RQD$  и  $FF$ ) отображены на рисунке 2.8. Подобные типы распределений характеризуют породный массив как слаборазрушенный.

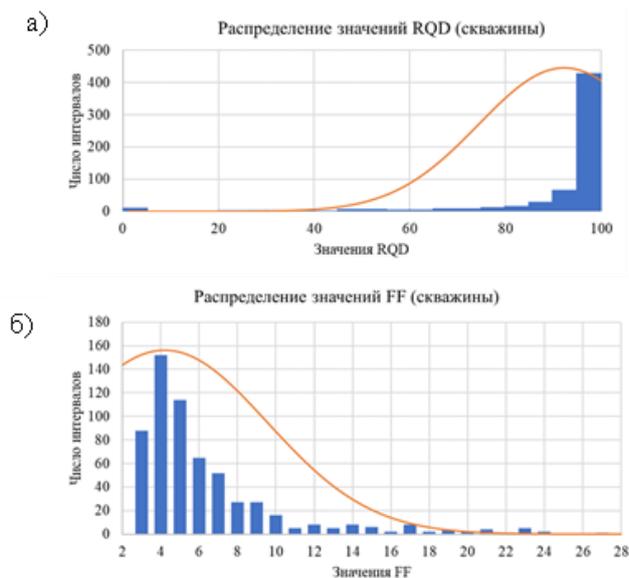


Рисунок 2.8 – Распределения значений показателей нарушенности массива пород по результатам обработки данных геотехнического описания керна скважин Центрального участка Ждановского месторождения: а)  $RQD$ ; б)  $FF$

Для всех литотипов, пересекаемых скважинами, рассчитаны значения рейтинговых характеристик качества массива:  $Q$ ,  $RMR(89Basic)$ ,  $GSI$ . В таблице 2.6 приведены средние значения качественных характеристик породных доменов.

Таблица 2.6 – Средние значения основных качественных характеристик породных доменов Ждановского месторождения по данным геотехнического описания керна скважин

$RQD$	$Q$	$Q'$	$RMR_{B89Basic}$	$GSI_{2013} = RQD/2 + 1.5 \cdot J_{Cond89}$	$GSI_{2013} = RQD/2 + 1.5 \cdot J_{Cond89}$	$GSI_{2013} = (52 \cdot J_r/J_a)/(1 + J_r/J_a) + RQD/2$
Для всех разностей						
94	1,4	18,4	65	70	59	64
Перидотиты						
90	2,1	10,4	60	65	57	57
Габбро, диабазы, габбро-диабазы						
98	7,0	35,2	68	73	61	69
Туфогенно-осадочные породы						
97	0,6	29,4	68	73	60	69

В результате анализа данных геотехнического описания керна скважин, пробуренных в районе ЦРТ Ждановского месторождения и определения значений основных качественных характеристик породных доменов определено, что в целом массив в исследованных интервалах характеризуется высокими значениями качественных характеристик и прочностными свойствами.

#### 2.2.1.2 Результаты определения качественных характеристик массива пород Ждановского месторождения при картировании поверхностей горных выработок

Исследования проводили в незакрепленных (без торкретбетона) участках выработок. Для оценки качественных характеристик массива вмещающих пород и руд Ждановского месторождения были обследованы полевые и подготовительные выработки, пройденные в Центральном (выработки гор. -370 м, -390 м, -410 м ЦРТ) и Юго-Западном (выработки гор.-335 м и -355 м ЮЗРТ) рудных телах. Частично участки обследования приведены на рисунке 2.10. По результатам рейтинговой оценки были определены интервалы горных выработок со схожими геомеханическими характеристиками и близкими значениями рейтинговых показателей. На рисунке 2.9 выделенные интервалы разделены по цветам, где зеленым цветом окрашены участки массива с высокими прочностными характеристиками, а красным – с низкими.

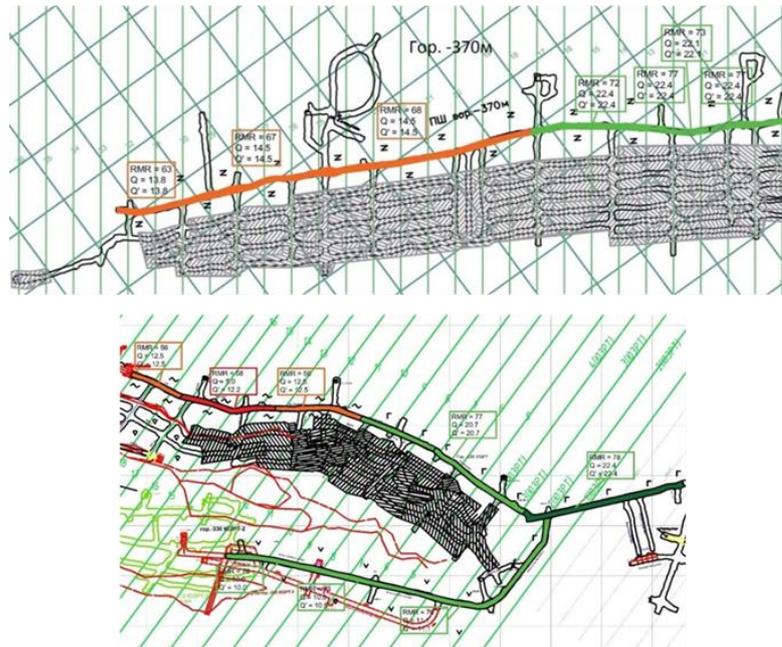


Рисунок 2.9 – Схемы интервалов картирования обнажений подземных горных выработок Ждановского месторождения

Результат определения средних значений основных качественных характеристик породных доменов представлен в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Результаты определения основных качественных характеристик породных доменов Ждановского месторождения по данным картирования поверхностей горных выработок

$RQD$	$Q$	$Q'$	$RMR_{B89Basic}$	$GSI_{2013} = RQD/2 + 1.5 \cdot J_{Cond89}$	$GSI_{2013} = RQD/2 + 1.5 \cdot J_{Cond89}$	$GSI_{2013} = (52 \cdot J_r/J_a)/(1 + J_r/J_a) + RQD/2$
Для всех разностей						
85	2,4	3,8	56	63	51	59
Перидотиты						
86	1,4	2,7	53	60	52	57
Габбро, диабазы, габбро-диабазы						
90	5,5	5,1	60	68	52	64
Туфогенно-осадочные породы						
77	5,3	3,1	56	62	50	59

В результате обработки данных геомеханического картирования поверхностей горных выработок можно сделать несколько общих выводов. В целом, степень прочности массива пород Ждановского месторождения на разных участках варьирует в широких пределах: от высокой до слабой. Массивы со слабыми показателями прочности в основном приурочены к зонам, на которые оказывают влияние высокие напряжения от воздействия очистных работ, вызывающие значительные деформации стенок и кровли выработок (рисунок 2.10).



Рисунок 2.10 – Разрушенная часть кровли полевого штрека гор.-335м ЮЗРТ в зоне влияния очистных работ (разрезы 13-16)

В наибольшей степени разрушению подвержены выработки, пройденные в туфогенных метаосадочных породах в связи с тем, что они имеют значительное количество карбонатных и кварц-карбонатных прожилков, раскрывающихся при воздействии взрывных работ и под влиянием пригрузки от очистного пространства. Также интенсивно разрушаются выработки, пройденные в рудном теле, в связи с тем, что заполнителем трещин является серпентин, формирующий гладкие поверхности, иногда с зеркалами скольжения, характеризующиеся слабым сцеплением или его отсутствием (рисунок 2.11).

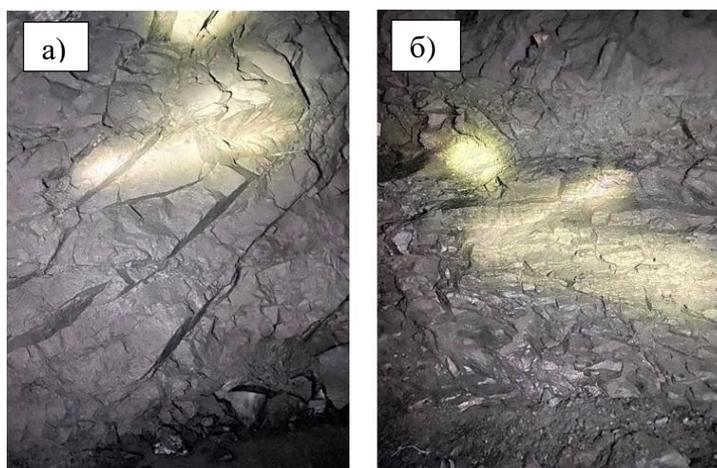


Рисунок 2.11 – Поверхность стенок буродоставочного штрека №1 в районе разреза 4 гор.-355м ЮЗРТ. а) массив представлен рудным перидотитом, б) массив представлен туфогенно-осадочными породами

Помимо этого, снижение прочности массива происходит на участках выработок, пересекающих ослабленную зону контакта лежащего бока рудных тел с вмещающим массивом (рисунок 2.12).



Рисунок 2.12 – Буродоставочный штрек №1 блока 12-15 ЦРТ. Вывал по контакту рудного тела с прослойкой брекчии

### 2.2.2 Определение коэффициентов структурного ослабления

Для определения параметров и оценки устойчивости элементов разработки в процессе ведения горных работ необходимо учитывать влияние структурных неоднородностей на прочностные свойства массива горных пород (рисунок 2.13).

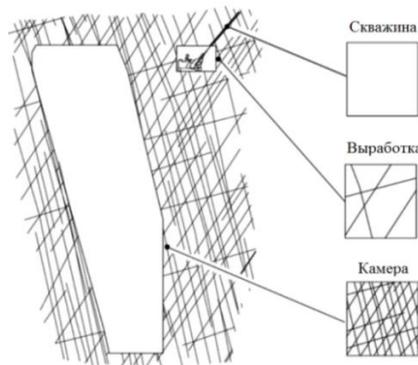


Рисунок 2.13 – Схематическая визуализация влияния структурных неоднородностей на свойства массивов при различных масштабных уровнях [147]

Для перехода от свойств образца к свойствам массива используют коэффициент структурного ослабления  $k_c$ , равный отношению прочности массива  $\sigma_m$  к прочности образца  $\sigma_{ci}$  (2.6):

$$k_c = \frac{\sigma_m}{\sigma_{ci}} \quad (2.6)$$

Определение  $k_c$  возможно с использованием нескольких методик, учитывающих разные параметры, характеризующие неоднородность массива горных пород. Наиболее простой

является методика определения  $k_c$  по степени нарушенности массива пород согласно СП 91.13330.2012.

### 2.2.2.1 Определение коэффициентов структурного ослабления по степени нарушенности массива пород

Согласно СП 91.13330.2012 «Подземные горные выработки»  $k_c$  определяют в зависимости от расстояния между неоднородностями по таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Значение  $k_c$  массивов пород согласно СП 91.13330.2012

Среднее расстояние между поверхностями ослабления пород, м	Значение коэффициента $k_c$
Свыше 1,5	0,9
Менее 1,5 до 1	0,8
Менее 1 до 0,5	0,6
Менее 0,5 до 0,1	0,4
Менее 0,1	0,2

Результаты определения расстояний между трещинами по данным геотехнического описания керна скважин и картирования поверхностей горных выработок для породных доменов представлены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Результаты определения количества трещин на метр и расстояний между трещинами по данным геотехнического описания керна скважин и картирования поверхностей горных выработок

Расстояние между трещинами, м (геотехническое описание керна)	$k_c$	Расстояние между трещинами, м (картирование горных выработок)	$k_c$
Для всех разностей			
0,3	0,4	0,1	0,4
Перидотиты			
0,2	0,4	0,2	0,4
Габбро, диабазы, габбро-диабазы			
0,5	0,4	0,2	0,4
Туфогенно-осадочные породы			
0,3	0,4	0,1	0,4

Определено, что с учетом данных геомеханического описания керна скважин и по результатам картирования обнажений подземных горных выработок  $k_c = 0,4$  для всех доменов. Данная методика позволяет с достаточной простотой определять значение коэффициента структурного ослабления, но не учитывает множество немаловажных параметров структурных

неоднородностей, влияющих на прочностные свойства массивов пород, например, характеристики трещин, заполнителя и т.д.

### 2.2.2.2 Определение коэффициентов структурного ослабления с применением геологического индекса прочности Э. Хука (GSI)

Учет и анализ фактора влияния неоднородностей на свойства массива является актуальной задачей и в настоящее время получил широкое развитие в рейтинговых классификациях качества массива. Наибольшее развитие получила оценка прочности массивов пород согласно обобщенному критерию прочности Хука-Брауна.

В основе оценки прочности массивов пород согласно обобщенному критерию прочности Хука-Брауна, рассчитываемому по формуле (2.7), лежит учет свойств неоднородностей, понижающих прочностные характеристики массива, тем самым приближая свойства модели к реальному природному породному массиву:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m \cdot \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (2.7)$$

где  $\sigma_{ci}$  – прочность на одноосное сжатие ненарушенных горных пород (в образце);  $m$  и  $s$  – безразмерные константы, характеризующие свойства материала, при этом  $4 \leq m \leq 33$  [29].

Показатель степени  $a$ , а также значения  $m$  и  $s$  определяют с помощью эмпирических уравнений (2.8-2.10):

$$m = m_i \exp \left( \frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right); \quad (2.8)$$

$$s = \exp \left( \frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right); \quad (2.9)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right), \quad (2.10)$$

где  $GSI$  (*Geological Strength Index*) – геологический индекс прочности,  $m_i$  – параметр ненарушенной породы,  $D$  – коэффициент нарушения.

Константы  $m_i$ ,  $GSI$  и  $D$  определяют экспериментально в натуральных и лабораторных условиях, учитывая свойства массива горных пород, его структурные особенности, степень трещиноватости, характеристики трещин и т.д. [76].

На основе оценки параметра  $GSI$  в качестве характеристики трещиноватых массивов возможно определение коэффициента структурного ослабления по фактору влияния нарушенности.

Параметр  $GSI$  был определен на основании данных геотехнического описания керна скважин и картирования поверхностей подземных горных выработок. Выполнение расчета

параметра  $GSI$  возможно с использованием трех равнозначных методик, приведенных в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Результаты расчета параметра  $GSI$  по данным геотехнического описания керна скважин и картирования поверхностей подземных горных выработок

$GSI_{2013} = RQD/2 + 1.5 \cdot J_{Cond89}$	$GSI_{2013} = 2 \cdot J_{Cond76} + RQD/2$	$GSI_{2013} = (52 \cdot J_r/J_a)/(1 + J_r/J_a) + RQD/2$
Все разности		
Геотехническое описание керна		
70	59	64
Картирование горных выработок		
63	51	59
Перидотиты		
Геотехническое описание керна		
65	57	57
Картирование горных выработок		
60	52	57
Габбро, диабазы, габбро-диабазы		
Геотехническое описание керна		
73	61	69
Картирование горных выработок		
68	52	64
Туфогенно-осадочные породы		
Геотехническое описание керна		
73	60	69
Картирование горных выработок		
62	50	59

Для применения в дальнейших этапах работы выбран способ расчета с использованием параметров рейтинговой классификации Н. Бартона:  $GSI_{2013} = (52 \cdot J_r/J_a)/(1 + J_r/J_a) + RQD/2$ . Полученные расчетным путем значения  $GSI$  по результатам картирования обнажений подземных выработок согласуются с данными, полученными при определении  $GSI$  с помощью диаграммы при полевых работах, представленной на рисунке 2.14. Квадрант, описывающий параметры массива пород Ждановского месторождения по значению  $GSI$  для всех исследованных участков выработок, выделен красным пунктиром.

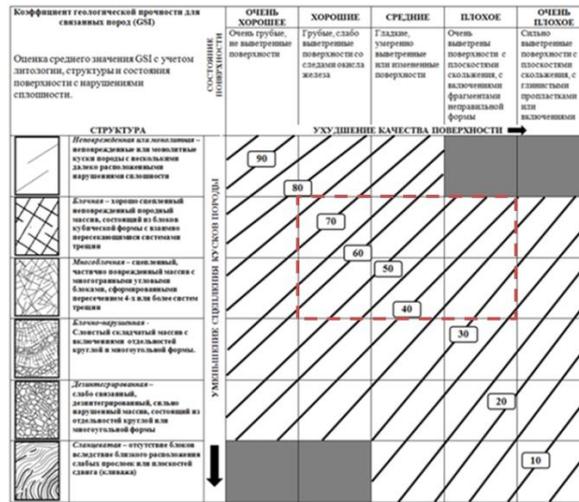


Рисунок 2.14 – Диаграмма определения параметра GSI с помощью картирования обнажений подземных горных выработок с выделенной зоной значений, полученных при картировании подземных горных выработок одного из участков массива

С использованием программы *RocData* выполнена обработка результатов лабораторного исследования образцов породных разностей при объемном сжатии, одноосном сжатии и растяжении [133]. Определены параметры прочности массивов пород согласно обобщенному критерию прочности Хука-Брауна:  $\sigma_{ci}$  – рассчитанная прочность при сжатии ненарушенной породы;  $\sigma_{cm}$  – прочность при сжатии в массиве пород;  $E_m$  – модуль упругости для массива пород;  $k_c$  – коэффициент структурного ослабления. Для всех доменов рассчитаны параметры, характеризующие их свойства с учетом нарушенности по результатам геотехнического описания керна и картирования обнажений поверхностей выработок (таблица 2.11).

Таблица 2.11 – Параметры прочности массивов породных доменов Ждановского месторождения согласно критерию Хука-Брауна и значения коэффициентов структурного ослабления породных доменов по данным геотехнического описания керна и картирования обнажений выработок

$GSI$	$m_i$	$\sigma_{ci}$ , МПа	$\sigma_{cm}$ , МПа	$E_m$ , ГПа	$k_c$
Геотехническое описание керна скважин					
Перидотиты					
57	19	228	62	15	0,3
Габбро, диабазы, габбро-диабазы					
69	23	148	57	30	0,4
Туфогенно-осадочные породы					
69	8	72	18	25	0,3
Картирование поверхностей выработок					
Перидотиты					
57	19	228	62	15	0,3
51					
64	23	148	51	22	0,3
Туфогенно-осадочные породы					
59	8	72	14	14	0,2

По данным таблиц 2.6-2.7 и 2.10-2.11 видно, что качественные характеристики массива пород Ждановского месторождения по результатам картирования обнажений выработок имеют более низкие значения, нежели полученные при описании керна геотехнических скважин. Очевидно, что это связано с влиянием технологических факторов на контуре выработок. При этом, в наибольшей степени под влиянием горных работ снижаются прочностные свойства массива туфогенно-осадочных пород, тогда как вмещающие породы интрузивного происхождения и руды менее подвержены технологическому воздействию.

### 2.2.2.3 Определение коэффициентов структурного ослабления с учетом ориентации вектора $\sigma_{max}$ в массиве пород

Геологический индекс прочности  $GSI$  в наибольшей степени учитывает влияние характеристик неоднородностей на свойства трещиноватых породных массивов, однако не рассматривает влияние фактора напряжений, действующих в массиве пород. Влияние абсолютных величин напряжений учитывается при расчете параметра  $Q$  по методике Н. Бартона [139], однако в наиболее популярных рейтинговых классификациях качества породных массивов не рассматривается фактор ориентировки вектора максимальной компоненты тензора напряжений относительно залегания структурных неоднородностей.

В «Методических указаниях по управлению горным давлением при подземной разработке месторождений ГК «Печенганикель», (1985 г., ВНИМИ) представлена методика определения  $k_c$  в зависимости от частоты трещин и их ориентировки относительно действия максимальной компоненты напряжений (таблица 2.12).

Таблица 2.12 – Приближенное значение  $k_c$  в зависимости от частоты трещин и ориентировки вектора  $\sigma_{max}$

Угол $\alpha$ , град	Коэффициент $k_c$ при числе трещин на 1 м			
	до 4	5-10	11-20	20
0-20	0,7	0,5	0,4	0,3
25-30	0,5	0,4	0,3	0,2
35-45	0,3	0,25	0,2	0,1
50-90	0,7	0,4	0,34	0,2

В результате натуральных измерений параметров поля напряжений массива пород Ждановского месторождения [32] определено, что  $\sigma_{max}$  в нетронутом массиве действует по направлению простирания основных рудных тел, с азимутом простирания  $\approx 120^\circ$ . Для всех выделенных породных доменов Ждановского месторождения определены параметры залегания

структурных неоднородностей. По результатам геотехнического описания керна скважин и картирования обнажений подземных горных выработок определена частота трещиноватости  $FF$  для каждого из породных доменов. Выполнено определения  $k_c$  массива пород Ждановского месторождения в зависимости от  $FF$  и их ориентировки относительно действия максимальной компоненты напряжений согласно методике ВНИМИ. Результаты представлены в таблице 2.13.

Таблица 2.13 – Результаты определения характеристик параметров трещиноватости и значений коэффициентов структурного ослабления породных доменов Ждановского месторождения по данным геотехнического описания керна и картирования обнажений выработок

№ системы	Азимут простирания, °	Угол падения, °	Угол м/у $\sigma_{max}$ и системой, °	FF (геот. описание керна)	FF (картирование)	$k_c$	$k_c$
Домен 1 (перидотиты)							
1.	132	61	12	5	6	0,4	0,4
2.	310	46	10				
Домен 2 (габбро, диабазы, габбро-диабазы)							
1.	157	86	37	2	5	0,3	0,25
2.	126	75	6				
3.	342	57	42				
4.	319	73	19				
Домен 3 (габбро, диабазы, габбро-диабазы)							
1.	135	57	15	3	8	0,7	0,5

Коэффициент структурного ослабления массива пород, определенный на основе геологического индекса прочности  $GSI$ , наиболее полно учитывает характеристики структурных неоднородностей, но при наличии данных о параметрах напряженного состояния, по мнению автора, предпочтительно уточнять его по фактору влияния ориентировки  $\sigma_{max}$ , опираясь на методику, изложенную выше. Влияние частоты трещиноватости ( $FF$ ) учитывается в  $GSI$  при расчете с использованием параметров Н. Бартона через  $RQD$ , так как между  $FF$  и  $RQD$  существует корреляционная связь [160]. Соответственно, для учета направления действия  $\sigma_{max}$  из зависимости, приведенной в таблице 2.12, необходимо выделить самостоятельный параметр, который можно определить как поправочный коэффициент по ориентировке  $\sigma_{max}$  –  $k_{\sigma_{max}}$ . В таблице 2.14 приведены поправочные коэффициенты  $k_{\sigma_{max}}$ , учитывающие влияние ориентировки вектора  $\sigma_{max}$  относительно залегания основных систем трещин.

Таблица 2.14 – Значения  $k_{\sigma_{max}}$  в зависимости от ориентировки вектора  $\sigma_{max}$  относительно залегания основных систем трещин

Угол $\alpha$ , град	0-20	25-30	35-45	50-90
Коэффициент $k_{\sigma_{max}}$	1,0	0,9	0,8	1,0

Для основных породных доменов массива Ждановского месторождения выполнено определение значений коэффициентов структурного ослабления с использованием 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 сводной таблице 2.15.

Таблица 2.15 – Результаты определения  $k_c$  массива пород Ждановского месторождения, полученные с использованием различных методик

$k_c$ (СП 91.13330.2012)	$k_c$ (методика ВНИМИ)	$k_c$ (GSI)
<b>Перидотиты</b>		
Геотехническое описание керна		
0,4	0,4	0,3
Картирование горных выработок		
0,4	0,4	0,3
<b>Габбро, диабазы, габбро-диабазы</b>		
Геотехническое описание керна		
0,4	0,3	0,4
Картирование горных выработок		
0,4	0,25	0,3
<b>Туфогенно-осадочные породы</b>		
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  $k_c = 0,4$ . Также представляет интерес, что полученные значения  $k_c$  соответствуют значениям критериев удароопасности массивов пород Горного института КНЦ РАН, которые классифицируют состояния устойчивости выработок в прочных скальных массивах. Именно, согласно исследованиям Горного института КНЦ РАН, начальные признаки динамического разрушения в выработках могут возникать при достижении напряжениями значений 0,3-0,4 от предела прочности при одноосном сжатии в образце.

## Выводы по Главе 2

1. Значения физико-механических характеристик образцов пород Ждановского месторождения варьируют в широком диапазоне в связи со значительной природной изменчивостью. В результате статистической обработки выделено три домена (разности) на основании статистически близких значений физико-механических характеристик: первый домен – интрузивные породы ультраосновного состава (перидотиты, пироксениты); второй домен – интрузивные породы основного состава (диабазы, габбро и габбро-диабазы); третий домен – породы туфогенно-осадочного происхождения.

2. Все породы и руды Ждановского месторождения имеют значительные величины предела прочности ( $\sigma_{сж}$ ) на сжатие и относятся к скальным. Среднее значение  $\sigma_{сж}$  для пород первого домена составляет 149 МПа, для пород второго домена - 130 МПа, для пород третьего домена - 106 МПа.

3. Все породы и руды Ждановского месторождения являются хрупкими и потенциально склонны к разрушению в динамической форме.

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

В результате обработки и анализа данных лабораторных и натуральных исследований образцов и породных массивов сформулировано **первое научное положение: 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).**

### ГЛАВА 3 РЕКОНСТРУКЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИРОДНОГО ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ ЖДАНОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Знания о напряженном состоянии массива пород месторождений являются одними из основополагающих для понимания геомеханической ситуации, выбора параметров безопасного ведения горных работ, прогноза изменения НДС и оценки потенциальной удароопасности.

Напряжения, действующие в массиве горных пород, могут быть как природного, так и техногенного происхождения. Природное, или исходное, поле напряжений формируется за счет давления налегающей толщи пород (гравитационный тип поля напряжений) либо в комплексе с пригрузкой, вызванной действием тектонических сил (гравитационно-тектонический тип поля напряжений). Техногенное поле напряжений трансформируется из природного в процессе ведения горных работ. Для корректной оценки и прогноза потенциальной удароопасности важно определять тип природного поля и закономерности распределения напряжений, как в нетронutom массиве пород, так и в процессе ведения горно-добычных работ.

Для определения величин и направлений действия главных компонент напряжений, формирующих природное поле, проводят комплекс натуральных инструментальных исследований в условиях массива горных пород и моделирование НДС в процессе ведения горных работ с целью оценки и прогнозирования геомеханической ситуации.

Натурные исследования напряженно-деформированного состояния массивов пород являются одним из наиболее важных этапов комплексной работы по оценке потенциальной удароопасности месторождений. Они позволяют получить базовые данные для исследования закономерностей распределения напряжений, как до начала производства горных работ, так и в процессе разработки. В данном разделе работы приводится методика натуральных исследований НДС Ждановского месторождения и анализ их результатов.

#### **3.1 Результаты натуральных исследований параметров напряженного состояния массива**

В условиях массива пород Ждановского месторождения регулярно выполняются исследования его напряженного состояния с целью оценки геомеханической ситуации с использованием различных методов в натуральных условиях. В разные годы исследования проводились сотрудниками Горного института КНИЦ РАН [34, 36], АО «ВНИМИ» [99, 100], а также ИГД СО РАН [27].

Преимущественно применяются методы визуального обследования состояния подземных выработок, метод полной разгрузки напряжений в варианте торцевых измерений, а также метод ультразвуковых измерений.

### 3.1.1 Визуальное обследование состояния горных выработок

Визуальное обследование выполняется с целью качественной оценки состояния приконтурной части выработок и позволяет оценить приблизительную величину и направление действия максимальных сжимающих напряжений в нетронутом массиве [81]. В подземных выработках рудника «Северный» с 2019 года визуальные наблюдения выполнялись под руководством ведущего инженера отдела Геомеханики ГоИ КНЦ РАН А.В. Пантелеева.

В результате анализа закономерностей распределения характерных признаков динамических проявлений горного давления при визуальном обследовании получены следующие закономерности:

1. Максимальным разрушениям подвержены выработки, находящиеся в зонах влияния очистных работ и в областях воздействия пригрузок от консольно зависших пород висячего бока.
2. Наибольшей степени разрушения приконтурной части выработок подвержены выработки штрекового направления, то есть пройденные вдоль простирания рудного тела.
3. Зоны разрушения в подавляющем большинстве случаев приурочены к кровле, замковой части и пяте свода выработок, что показано на рисунке 3.1. Данный вид разрушения косвенно указывает на преобладание тектонической составляющей поля напряжений над гравитационной.

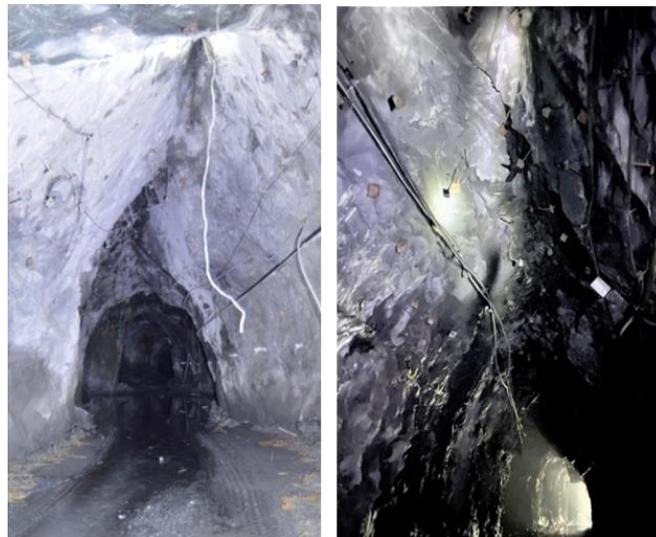


Рисунок 3.1 - Типичная форма разрушения выработок штрекового направления

4. На степень разрушения выработок оказывают существенное влияние трещиноватость массива и наличие тектонических зон контактов рудных тел и вмещающих пород. На рисунке 3.2 показана типичная конфигурация разрушения выработки в зоне ослабленного контакта лежачего бока, представленного брекчиевидными рудами.



Рисунок 3.2 - Разрушение области контакта рудного тела и вмещающих пород в выработке штрекового направления

В результате визуального обследования подземных горных выработок можно сделать предположение о действии в массиве пород Ждановского месторождения гравитационно-тектонического типа поля напряжений с выраженной субгоризонтальной составляющей.

### 3.1.2 Исследование параметров поля напряжений по разрушению стенок вертикальных выработок

Принцип данного метода аналогичен принципу визуального обследования горных выработок. На рисунке 3.3 показан фрагмент графического плана в отметке -505м, на котором отображено местоположение вертикальной выработки – бункера дробленой руды (пунктиром). Выработка пройдена на удалении ~ в 1400м от районов ведения горных работ (на рисунке 3.3. ближайшее рудное тело выделено желтым цветом), поэтому можно исключить влияние очистной выемки.

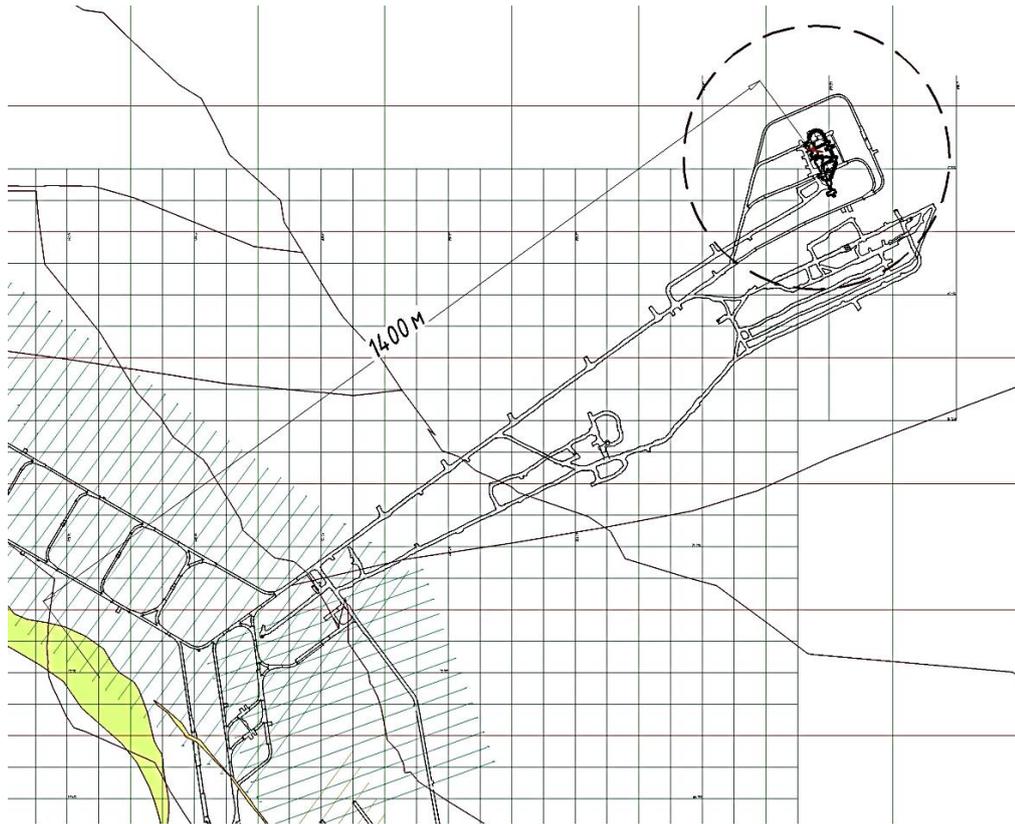


Рисунок 3.3 - Местоположение бункера дробленой руды

Сотрудниками маркшейдерского отдела рудника «Северный» была выполнена съемка геометрических параметров данной выработки, которая выявила системное разрушение ее стенок вдоль одного направления, что показано на рисунке 3.4.

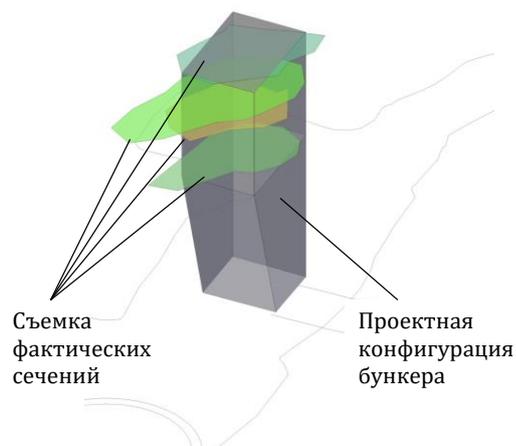


Рисунок 3.4 - Проектная и фактическая конфигурация бункера дробленой руды

Характерное разрушения стенок бункера позволяет сделать предположение о направлении действия максимальной компоненты напряжений. Для данного случая азимут

простирается максимального сжатия  $\sigma_{max}$  составляет  $\approx 100^\circ$ . На рисунке 3.5 представлен план участка и направление действия максимальной сжимающей компоненты напряжений, определенные по результатам съемки разрушений вертикальной выработки.

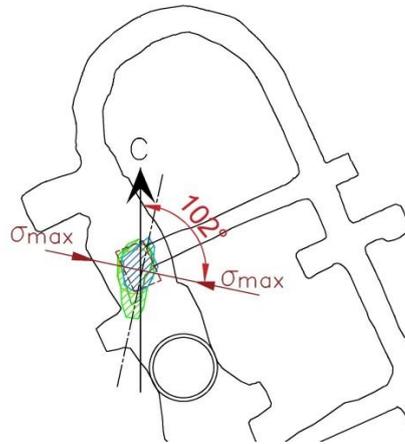


Рисунок 3.5 - Направление действия максимальной сжимающей компоненты напряжений в районе бункера дробленой руды на высотной отметке -505м

На основании анализа результатов визуального обследования и съемки разрушений подземных горных выработок, пройденных в массиве пород Ждановского месторождения, можно заключить, что максимальная компонента тензора напряжений  $\sigma_{max}$  является тектонической. Таким образом, можно сформулировать гипотезу о том, что поле напряжений массива пород Ждановского месторождения относится к гравитационно-тектоническому. Данные о направлении действия  $\sigma_{max}$  в плане по результатам обследования расходятся. Предположительно, это может быть обусловлено тем, что обследования выполнялись в разных условиях: в области влияния очистных работ и на удалении от нее.

Для уточнения параметров напряженного состояния массива пород выполняют натурные инструментальные измерения НДС с использованием различных физических принципов и методик.

### 3.1.3 Исследование параметров приконтурного массива пород с использованием ультразвукового метода

В 2016 году сотрудники Горного института КНЦ РАН выполняли ультразвуковые исследования состояния приконтурного массива горных выработок Ждановского месторождения с целью определения параметров нарушенной зоны. Метод ультразвукового каротажа (УЗК)

позволяет характеризовать состояние приконтурного массива выработки, при этом выходной информацией являются значения скоростей, которые хорошо поддаются визуализации.

Измерения проводились в двух выработках в пределах ЦРТ: полевом штреке и в орте. Участок полевого штрека, где проводились измерения, характеризовался как устойчивый, без видимых разрушений на контуре, пройден в диабазе. Результат ультразвукового исследования приконтурной зоны массива пород полевого штрека показан на рисунке 3.6 в виде изолиний скоростей прохождения продольной волны. Области низких скоростей с предполагаемой нарушенной зоной на рисунках показаны синим цветом, области высоких скоростей – красным.

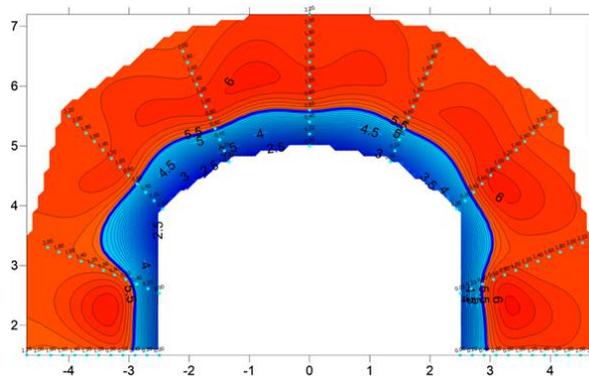


Рисунок 3.6 – Ультразвуковые исследования состояния приконтурного массива пород полевого штрека гор.-290м ЦРТ

Из рисунка 3.6 видно, что нарушенная зона имеет равномерную конфигурацию и в боках, и в кровле выработки, при этом ее размеры колеблются от 0,3 до 0,6 м.

На рисунке 3.7 представлены результаты измерений в выработке ортового направления, пройденной в рудных перидотитах и подверженной разрушениям.

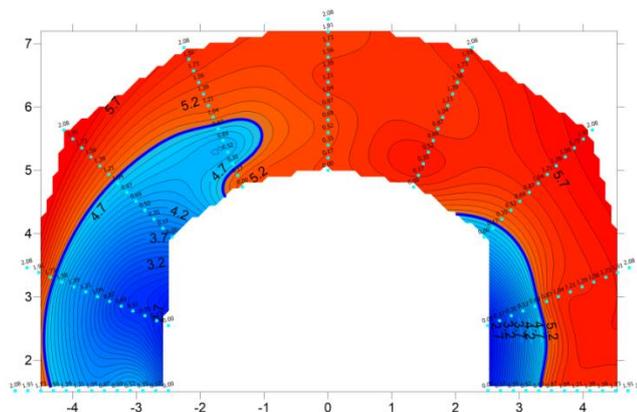


Рисунок 3.7 – Ультразвуковые исследования состояния приконтурного массива пород орта 17<sup>+16</sup> гор.-290м ЦРТ

Результаты измерений показали, что наиболее нарушенный массив находится в стенках выработки, максимальный размер нарушенной зоны достигает 1,7 м. При этом необходимо отметить, что исследуемая выработка находилась в зоне влияния очистных работ.

#### 3.1.4 Исследование параметров напряженного состояния массива методом полной разгрузки

Применение методов визуального обследования выработок и выполнение исследований, основанных на геофизических измерениях, не является достаточным для формирования полноценного представления о параметрах напряженного состояния массива. Для определения абсолютных значений главных напряжений, действующих в массиве, используют метод разгрузки в торцевом варианте [82, 127]. С 2016 года специалисты Горного института КНЦ РАН практически ежегодно выполняют измерения параметров НДС на различных участках Ждановского месторождения. Натурные измерения параметров напряженного состояния массива пород Ждановского месторождения методом полной разгрузки в варианте торцевых измерений выполняли на восьми станциях, расположенных на горизонтах -260 м, -310 м, -410 м, -440 м, -680 м и -780 м. На рисунке 3.8 показаны проекции станций измерений напряжений в плане на высотной отметке -440 м.

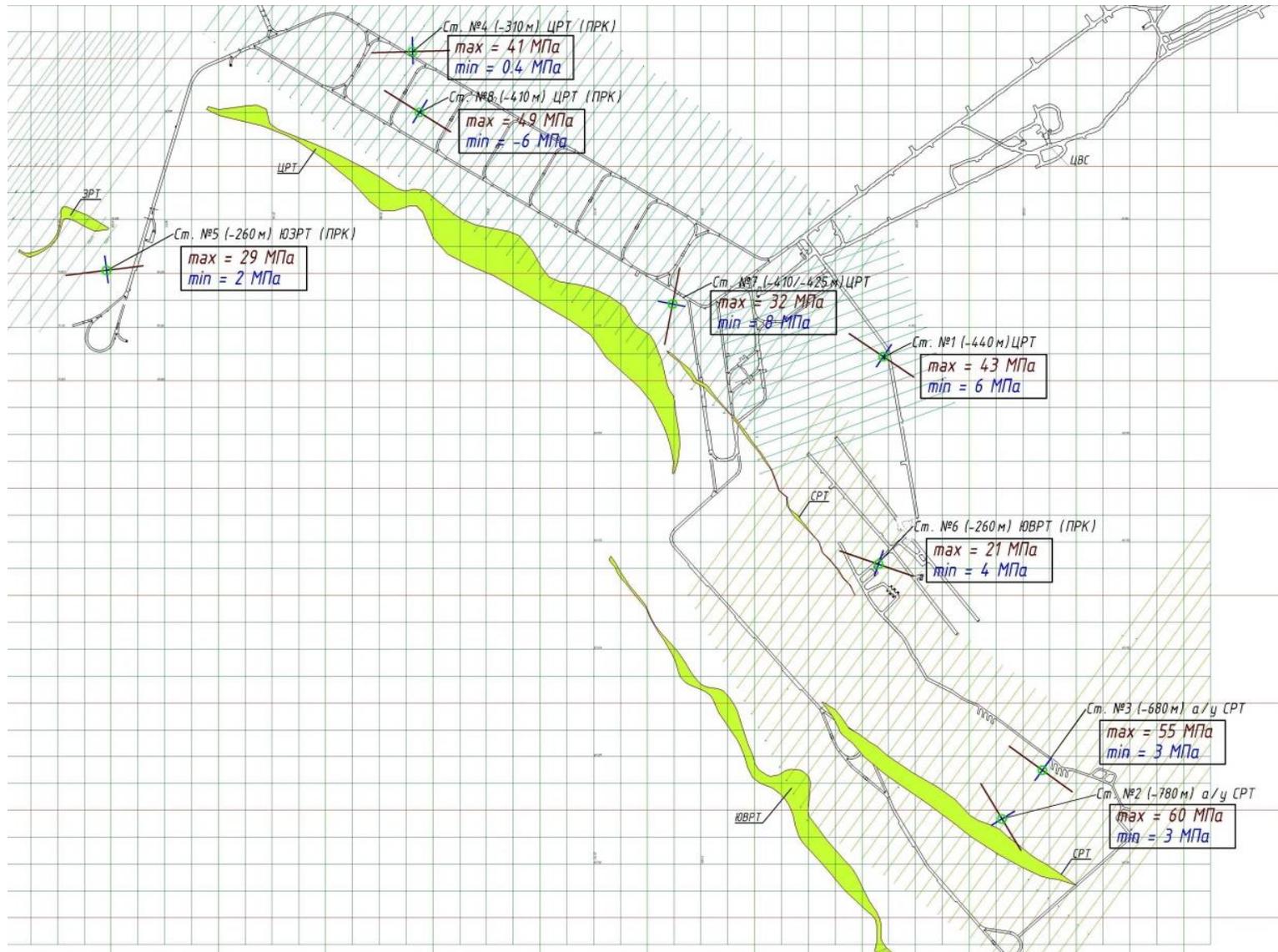


Рисунок 3.8 - Схема расположения станций измерения напряжений. Проекция на горизонтальную отметку -440 м

Из рисунка 3.8 видно, что измерения рассредоточены по площади запасов и расположены в районах залегания всех разрабатываемых рудных тел Ждановского месторождения. Стрелками показаны направления действия максимальной и минимальной тектонических компонент напряжений для каждой станции.

На рисунке 3.9 показан график, отражающий изменение значений главных компонент напряжений с глубиной по данным восьми измерений. Красными точками показаны измеренные значения  $\sigma_{max}$ , зелеными –  $\sigma_{np}$ , синими –  $\sigma_{min}$ .

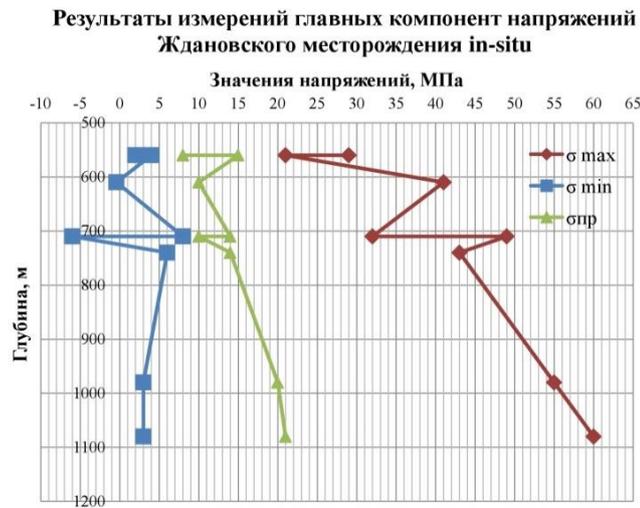


Рисунок 3.9 – Результаты измерений главных компонент напряжений ( $\sigma_{max}$ ,  $\sigma_{np}$  и  $\sigma_{min}$ ) методом полной разгрузки в массиве пород Ждановского месторождения

В таблице 3.1 представлены измеренные значения главных компонент напряжений и их соотношения.

Таблица 3.1 – Значения главных компонент напряжений, полученные методом полной разгрузки в массиве пород Ждановского месторождения

Отметка гор.	Глубина, м	$\sigma_{max}$ , МПа	$\sigma_{np}$ , МПа	$\gamma_H$ , МПа	$\sigma_{min}$ , МПа	$\sigma_3/\sigma_1$	$\lambda_1$	$\lambda_2$
-260м ЮЗРТ	560	29	8	16	2	0,07	3,6	0,25
-260м ЮВРТ	560	21	15	16	4	0,19	1,4	0,27
-310м	610	41	10	18	-0,4	-0,01	4,1	0,04
-410м	710	32	14	21	8	0,25	2,3	0,57
-410м	710	49	10	21	-6	-0,12	4,9	0,60
-440м	740	43	14	22	6	0,14	3,1	0,43
-680м	980	55	20	29	3	0,05	2,8	0,15
-780м	1080	60	21	32	3	0,05	2,9	0,14
						$\overline{\sigma_3/\sigma_1} =$ 0,12	$\overline{\lambda_1} =$ 3,1	$\overline{\lambda_2} =$ 0,3

В таблице 3.2 и на рисунке 3.10 показаны результаты определения направлений векторов максимальной компоненты напряжений по выполненным натурным измерениям в массиве пород Ждановского месторождения. Видно, что наибольшее количество векторов сосредоточено в одном секторе, и направления действия максимальных напряжений варьируют в пределах азимута 120-150° (300-330°).

Таблица 3.2. – Значения и направления действия  $\sigma_{max}$ , полученные методом полной разгрузки в варианте торцевых измерений

Горизонт, м	Глубина, м	$\sigma_{max}$ , МПа	Азимут простирания $\sigma_{max}$ , °	Угол падения $\sigma_{max}$ , °
-260 (ЮЗРТ)	560	29	83	-31
-260 (ЮВРТ)	560	21	110	-15
-310 (ЦРТ)	610	41	87	-4
-410 (ЦРТ)	710	32	101	19
-410 (ЦРТ)	710	49	122	16
-440 (ЦРТ)	740	43	123	24
-680 (СРТ)	980	55	125	-17
-780 (СРТ)	1080	60	149	-26

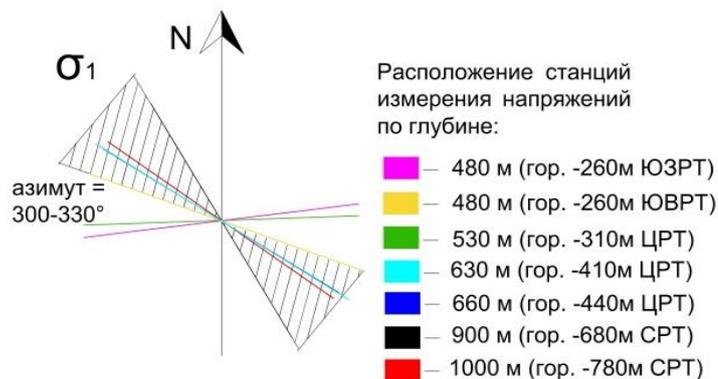


Рисунок 3.10 - Направления векторов максимальной компоненты напряжений, полученные по результатам измерений в массиве

По результатам измерений определено, что максимальная и минимальная компоненты напряжений ( $\sigma_{max}$  и  $\sigma_{min}$ ) направлены субгоризонтально и являются тектоническими, а промежуточная компонента ( $\sigma_{np}$ ) направлена субвертикально является гравитационной. Измеренные значения гравитационной компоненты с некоторым разбросом, но в целом коррелируют с расчетными при учете веса налегающей толщи пород на исследуемых глубинах. Соотношение  $\sigma_{max}/\sigma_{min} \approx 9-10$ ; коэффициенты бокового давления ( $\lambda = \sigma_{гор}/\sigma_{верт}$ ) равны соответственно:  $\lambda_1 = \sigma_{max}/\sigma_{np} \approx 3$ ,  $\lambda_2 = \sigma_{min}/\sigma_{np} \approx 0,3$ . Соотношение главных компонент тензора напряжений составляет:  $\sigma_{max} : \sigma_{np} : \sigma_{min} = 1 : 0,3 : 0,1$ . Соответственно,

можно сделать вывод о том, что поле напряжений на данных участках массива является гравитационно-тектоническим.

В связи с тем, что угол простирания основных рудных тел Ждановского месторождения меняется в достаточно небольших пределах, можно определить, как действует максимальная компонента напряжений по отношению к простиранию рудных тел. Из рисунка 3.11 видно, что генеральное направление главных компонент напряжений, полученное при измерениях *in-situ* соответствует направлению простиранию рудных тел, то есть **максимальная компонента напряжений  $\sigma_{max}$  субгоризонтальна и направлена вдоль простирания рудных тел Ждановского месторождения.**

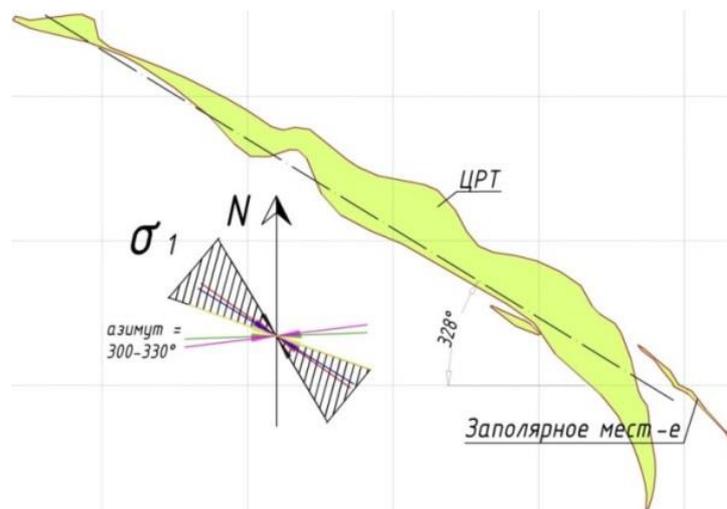


Рисунок 3.11 - Ориентация максимальной компоненты напряжений относительно простирания рудных тел

Результаты, полученные при измерениях напряжений методом полной разгрузки, подтверждают гипотезу о действии на Ждановском месторождении высоких субгоризонтальных напряжений, значения которых существенно превышают вертикальную гравитационную составляющую. Напряженное состояние Ждановского месторождения можно отнести к гравитационно-тектоническому типу [162, 163].

В массиве пород вблизи очистной выемки происходит перераспределение напряжений, и параметры НДС меняются. Такое поле напряжений является техногенно измененным. Для выполнения исследований параметров НДС 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.

В результате натурных исследований техногенно измененного напряжённого состояния массива пород Ждановского месторождения определено:

1. Соотношение главных компонент тензора напряжений составляет:  
 $\sigma_{max}(T_1) : \sigma_{np}(\gamma_H) : \sigma_{min}(T_2) = 1 : 0,3 : 0,1$ .

2. В массиве Ждановского месторождения действуют значительные субгоризонтальные напряжения.

3. По значениям субгоризонтальная компонента напряжений является максимальной, она направлена по простиранию рудных тел.

Для определения параметров природного напряженного состояния и исследования закономерностей распределения главных компонент напряжений с глубиной выполнена реконструкция НДС массива пород Ждановского месторождения с помощью численного геомеханического моделирования.

### **3.2 Восстановление параметров природного напряженного состояния массива пород Ждановского месторождения с использованием численного моделирования**

#### **3.2.1 Разработка численной геомеханической модели Ждановского месторождения**

Наличие адекватной модели природно-технической системы позволяет прогнозировать ситуацию по мере развития горных работ и выбирать наиболее безопасный порядок их ведения, а также разрабатывать комплекс мероприятий, сводящий к минимуму геомеханические и геодинамические риски.

Для 3D моделирования напряженного состояния массива Ждановского месторождения было использовано специальное программное обеспечение *Sigma GT* [44, 46]. В основе расчета напряженно-деформированного состояния в программном комплексе *Sigma GT* лежит метод конечных элементов, задача решается в упругой постановке [110, 130]. К настоящему времени программный комплекс *Sigma GT* с пополняемыми моделями установлен на рудниках АО «Апатит», АО «СЗФК», ПАО «ППГХО», АО «Кольская ГМК» (Приложение В) [112, 113].

Численная геомеханическая модель Ждановского месторождения была создана под методическим руководством зав. отдела Геомеханики Горного института КНЦ РАН в.н.с., к.т.н. Семенов И.Э. с участием к.т.н., доцента, с.н.с. Аветисяна И.М., н.с. Дмитриева С.В. и ведущего программиста Шестова А.А.

### 3.2.1.1 Методика генерации численных геомеханических моделей

В общем виде основными этапами при моделировании НДС массивов пород для решения задач геомеханики с использованием метода конечных элементов являются:

- 1) постановка задачи и определение цели эксперимента;
- 2) изучение данных, необходимых для моделирования;
- 3) создание геолого-структурной модели;
- 4) задание граничных условий
- 5) планирование последовательности расчетов;
- 6) проведение заверочных расчетов;
- 7) проверка адекватности математической модели;
- 8) формулирование выводов по данным моделирования и практическое использование результатов моделирования.

При формировании комплекса моделей в программном комплексе *Sigma GT*, в соответствии с разработанной методикой последовательных приближений, в первую очередь, осуществляют постановку и решение ряда трехмерных мелкомасштабных задач, отражающих основные горно-геологические и горно-технологические особенности моделируемого массива [62].

Последовательность операций на первом этапе (мелкомасштабное моделирование), следующая:

- 1) определение параметров мелкомасштабной расчетной области, соответствующих району залегания месторождения;
- 2) обоснование граничных условий и последовательности решения ряда трехмерных задач механики горных пород для определения основных факторов, влияющих на закономерности формирования первичного поля напряжений на региональном уровне;
- 3) разработка инженерно-геологической и численной модели;
- 4) сопоставление результатов расчетов с данными других (прямых или косвенных) методов оценки исходного напряженного состояния массива;
- 5) проведение при необходимости корректировки модели и повтор расчетов;
- 6) выбор участков для более детального моделирования НДС месторождений.

Соответствие получаемого на этом этапе поля напряжений реальному геомеханическому состоянию массива во многом зависит от обоснованного выбора размеров модели и граничных условий. Областью моделирования на первом этапе являлся протяженный участок массива Печенгского рудного поля, включающий все рудные тела Ждановского месторождения. Удаление границ от объекта моделирования определяется

принципом Сен-Венана [102], согласно которому, зона влияния распространяется на расстояние не более трех ее характерных размеров. На этом этапе учитывается исходный и техногенный рельеф дневной поверхности, параметры рудных тел и геологических разностей, вводится информация о разломных структурах III-IV ранга. В результате рассчитываются параметры поля напряжений и деформаций, которые используются в качестве начальных условий на следующем этапе моделирования.

Второй этап (крупномасштабное моделирование) включает в себя:

- 1) определение области влияния максимально достигаемых объемов отработанных пустот как подземным, так и открытым способом при сравнении соответствующих вариантов мелкомасштабного моделирования;
- 2) определение размеров следующей расчетной области;
- 3) задание на ее границах узловых перемещений, полученных на предыдущем этапе;
- 4) проведение расчетов для моделирования последовательной выемки запасов;
- 5) анализ расчетных данных и определение безопасных параметров систем разработки, применяемых или планируемых к применению на месторождении.

Для детализации поля напряжений осуществляется сгущение сети конечных элементов с заданием граничных перемещений из модели второго этапа. В *Sigma GT* данный этап может выполняться автоматически.

На третьем этапе проводят уточненный расчет НДС в окрестности элементов системы разработки, одиночной или системы выработок с учетом поля напряжений, сформировавшегося при определенной геометрии очистных пространств путем задания граничных перемещений из соответствующего варианта и имитации создания камер, проходки выработок и т.п [33]. Подобная вложенность моделей позволяет осуществлять ретроспективные, текущие и перспективные прогнозы изменения напряженно-деформированного состояния сложных природно-технических систем. Результаты расчетов НДС являются основой выбора наиболее безопасной по геомеханическим условиям системы разработки ее параметров на перспективных месторождениях; а также используются при планировании безопасного порядка выемки запасов на действующих горных предприятиях [115].

### 3.2.1.2 Обработка и адаптация исходных данных

Для приведения исходных геологических и технологических данных к виду, необходимому для генерации 3D модели в среде программного комплекса *Sigma GT*, были обработаны исходные данные в виде литолого-структурной модели Печенгского рудного поля, а также геодезические съемки дневной поверхности и карьеров. В результате анализа геологических данных в модель внесено 5 рудных тел и вмещающий массив [162]. Все рудные тела представлены перидотитами, вмещающий массив представлен переслаиванием диабазов, габбро-диабазов и туфогенно-осадочных пород. Мощность рудных тел колеблется от 7 до 90 м. Средний угол падения составляет приблизительно 50°. Центральное рудное тело является крупнейшим среди всех рудных тел Печенгского рудного поля. Большинство рудных тел разведано до глубины -1700 метров.

Полученные данные были адаптированы для отображения в ГГИС MINEFRAME, разработанном и используемом в ГоИ КНЦ РАН для целей геологического и технологического моделирования. Из ГГИС MINEFRAME (рисунок 3.12) экспортировали сечения будущей геомеханической модели для генерации сетки конечных элементов.

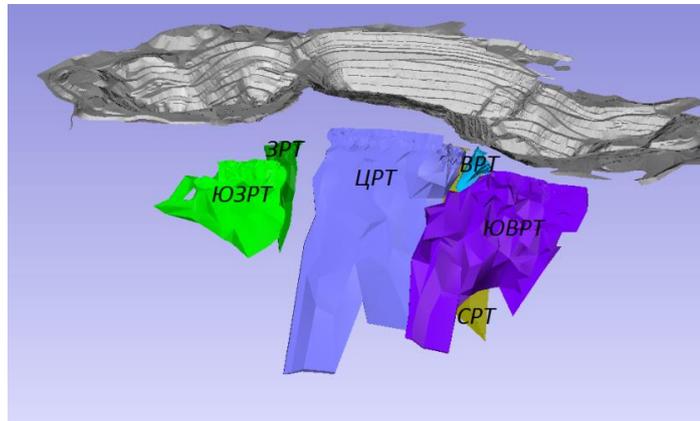


Рисунок 3.12 – Вид предоставленных исходных данных в ГГИС MINEFRAME

Прежде всего был построен совмещенный план месторождения, определены границы модели и расположение сечений. Границы области моделирования удалены на достаточное расстояние от обрабатываемых рудных тел, так как в них не должно происходить изменений НДС даже при максимальной перспективной отработке запасов месторождения. В результате, параметры модели в плане 6000 м × 4400 м (рисунок 3.13). Каждому рудному участку соответствует определенное сгущение сечений с минимальным шагом 10 м. Общее количество сечений – 278.

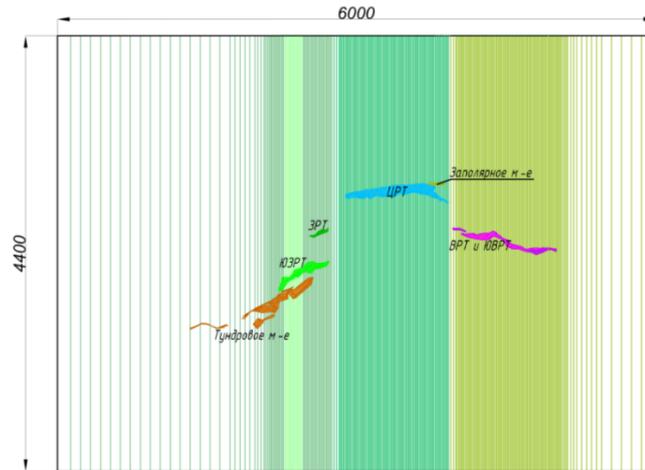


Рисунок 3.13 – План с расположением рудных тел и сечений конечно-элементной модели

Далее разрабатывался совмещенный типовой разрез. Для более корректного учета в модели геометрии рудных тел и углов их падения было принято решение о наклонном направлении поперечных сечений модели в диапазоне глубин, соответствующих основному объему отработки запасов месторождения подземным способом, от -140 до -1000 м. Наклон линий варьируется в соответствии с параметрами залегания каждого рудного тела (рисунок 3.14).

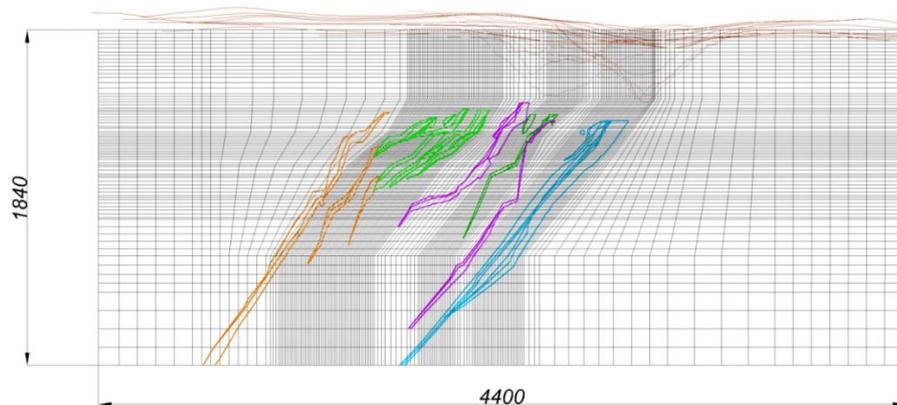


Рисунок 3.14 – Совмещенное типовое сечение конечно-элементной модели

Дно модели находится на отметке -1600 м. Минимальные расстояния между горизонтальными сечениями (10 м) приурочены к зоне активного ведения горных работ в настоящее время и на ближайшую перспективу. Для корректной оценки деформирования подработанной толщи пород и отражения геометрии карьерных выемок верхняя часть модели разбита также с достаточной детальностью. Ко дну модели размеры элементов увеличиваются. Итоговая размерность конечно-элементной модели  $279 \times 79 \times 166 = 3\,658\,806$  узлов и  $3\,577\,860$  элементов.

Для удобства использования результатов прогноза НДС высотные отметки горизонтальных сечений соответствуют отметкам этажей и подэтажей, а вертикальные сечения совпадают по направлению с рудничной системой координат.

Для генерации конечно-элементной трехмерной модели использовалась процедура автоматизированной сбойки сечений, после чего проводился процесс задания элементам типа пород, соответствующего определенному рудному телу (рисунки 3.15 – 3.16).

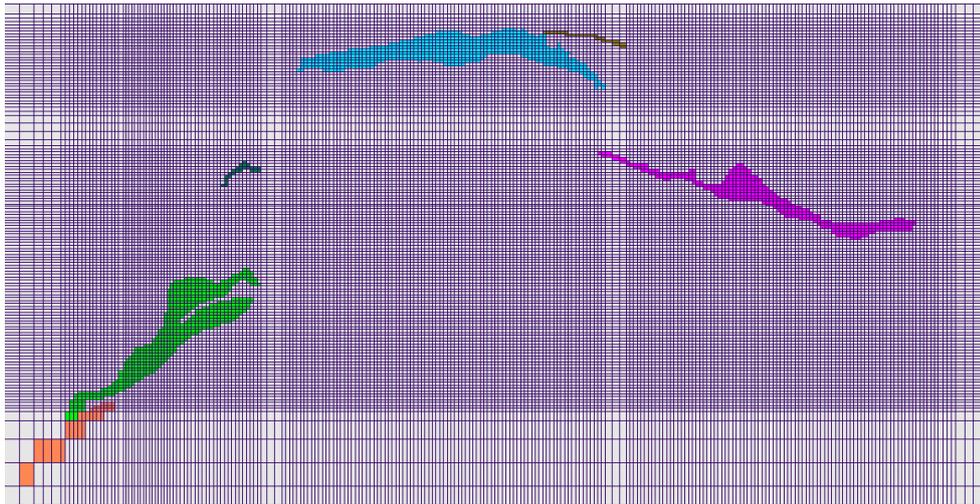


Рисунок 3.15 – Участок горизонтального сечения мелкомасштабной модели Ждановского месторождения

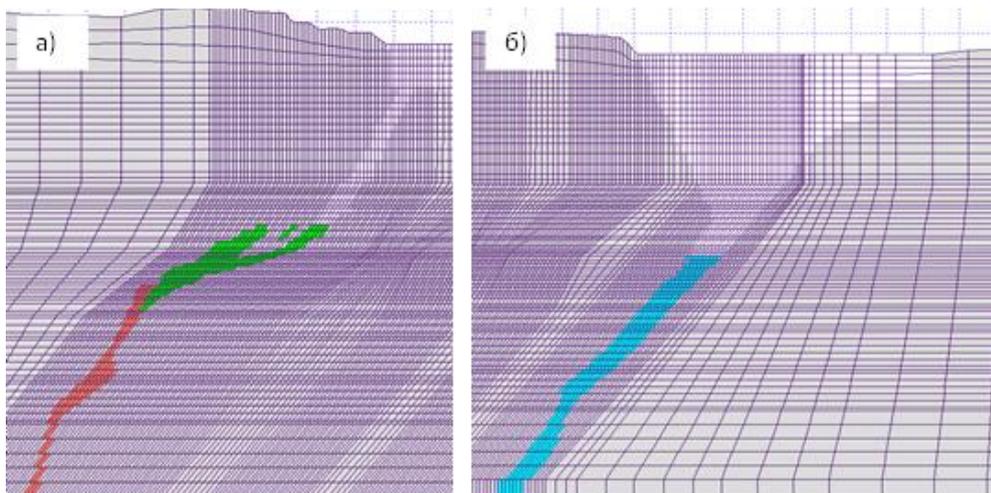


Рисунок 3.16 – Участки вертикальных сечений мелкомасштабной модели Ждановского месторождения: а) ЮЗРТ и Тундровое месторождение; б) Центральное рудное тело

На рисунке 3.17 представлен более детально фрагмент модели в районе Центрального рудного тела с нанесенными отметками основных горизонтов. В результате сформирована конечно-элементная 3D модель Ждановского месторождения (рисунок 3.18).

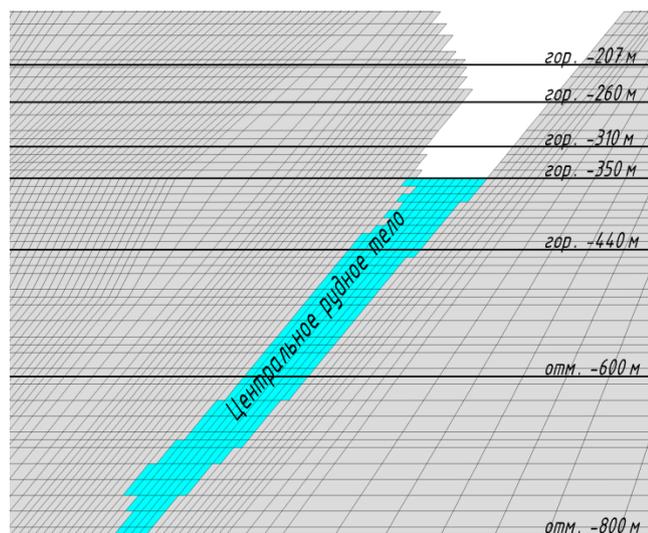


Рисунок 3.17 – Участок вертикального сечения с высотными отметками ведения горных работ

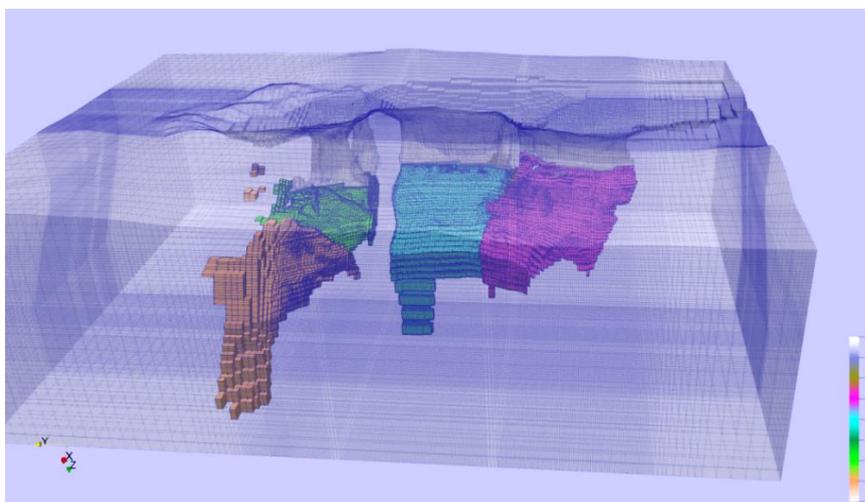


Рисунок 3.18 – Вид сформированной конечно-элементной 3D модели

### 3.2.1.3 Задание граничных условий

Одним из самых ответственных этапов разработки численной геомеханической модели является задание граничных условий. От этого во многом зависит адекватность получаемых результатов и их соответствие фактическому напряженному состоянию массива горных пород.

Граничные условия для модели задавали на основе натуральных измерений напряжений методом полной разгрузки в варианте торцевых измерений и последующей реконструкции параметров природного напряженного состояния массива пород Ждановского месторождения, а также геологической и маркшейдерской документации.

Для вмещающих пород и рудных тел в модели были учтены значения физико-механических характеристик (таблица 3.3), определенные в результате анализа данных лабораторных испытаний образцов и натуральных исследований параметров породного массива (глава 2 данной работы).

Таблица 3.3 – Физико-механические свойства основных литологических разностей, принятые в модели

Тип пород	Цвет в модели	Модуль упругости E, [ГПа]	Коэффициент Пуассона $\nu$	Плотность $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>
Вмещающие породы		54	0,28	2,85
Тундровое рудное тело		38	0,26	2,97
Юго-западное рудное тело		38	0,26	2,97
Западное рудное тело		38	0,26	2,97
Центральное рудное тело		38	0,26	2,97
Восточное и Юго-восточное рудные тела		38	0,26	2,97

### 3.2.1.4 Выполнение тестовых расчетов

Традиционно для первоначальной оценки сформированной модели рассматривается распределение напряжений при учете только собственного веса пород. Результаты представлены в виде изолиний распределения максимальных и минимальных действующих напряжений по продольному вертикальному разрезу, секущему Центральное рудное тело и вышележащий карьер. Местоположение разреза приведено на рисунке 3.19. Данный разрез выбран в связи с тем, что он пересекает самое крупное из рудных тел Ждановского месторождения, в пределах которого ведутся горные работы, и является наиболее представительным для анализа закономерностей распределения напряжений на разных этапах очистной выемки.

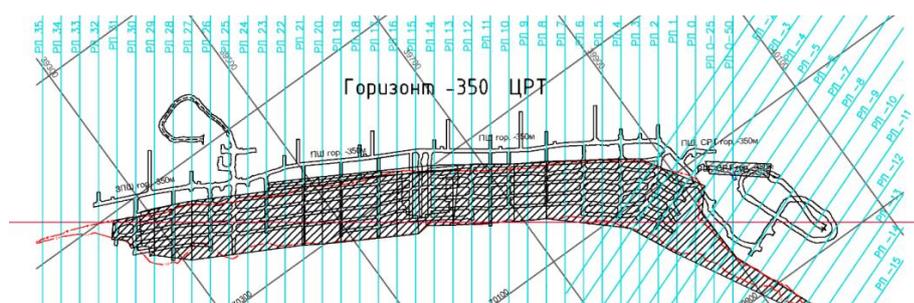


Рисунок 3.19 – Местоположение продольного разреза для обработки результатов моделирования (темно-красная линия)

Расчетный вариант вдоль выбранного разреза представлен на рисунке 3.20 и учитывает техногенный рельеф до начала подземных горных работ, дно карьера на отм. - 140 м. В данном случае величины  $\sigma_{max}$  меняются от 0 МПа у дневной поверхности до 35 МПа на нижней границе области; направление действия  $\sigma_{max}$  вертикально в областях, удаленных от карьерной выемки. У дна карьера формируются области растягивающих напряжений ( $\sigma_{max} < 0$ ) с их переориентировкой относительно исходного НДС ненарушенного массива. Результат, полученный при моделировании гравитационного типа поля напряжений для условий отработки запасов Ждановского месторождения, согласуется с аналитическими и эмпирическими представлениями о распределении напряжений в массивах при влиянии собственного веса пород [38, 82].

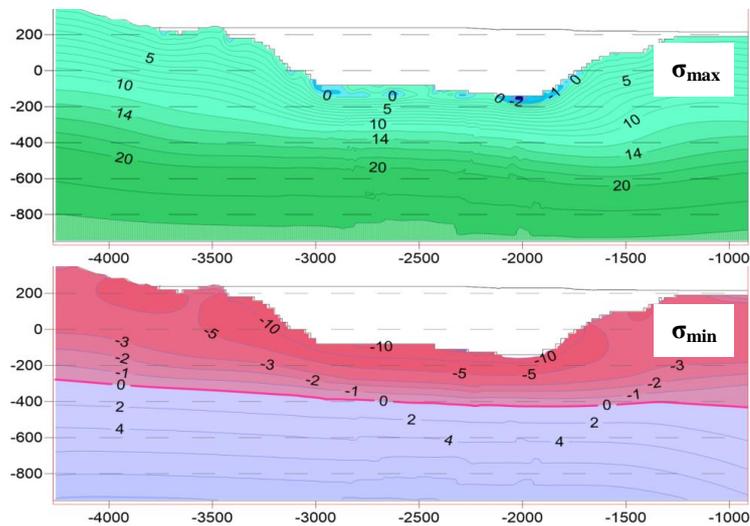


Рисунок 3.20 – Распределение напряжений при действии гравитации

### 3.2.2 Определение параметров природного поля напряжений

#### 3.2.2.1 Оценка влияния выработанного пространства на параметры НДС

Для оценки изменения параметров поля напряжений под влиянием очистной выемки были промоделированы три фазы ведения горных работ: первая (исходная) учитывала приближенную конфигурацию рельефа на момент начала горных работ открытым способом. Вторая фаза имитировала положение горных работ на момент окончания ведения добычных работ карьерами (отм.-140 м). Третий блок включал модели с положениями очистного пространства, соответствующими стадиям очистной подземной выемки на момент выполнения каждого из измерений.

На боковые грани были заданы значения тектонических сил, полученные в результате анализа результатов измерений, выполненных в натуральных условиях. Грани, противоположные граням с нагрузками, были закреплены по соответствующим направлениям. Нижняя грань была закреплена по всем трем направлениям. В качестве вертикальной пригрузки учтено влияние собственного веса пород ( $\gamma H$ ). На рисунке 3.21 показан трехмерный вид конечно-элементной модели со схемой его тектонического нагружения.

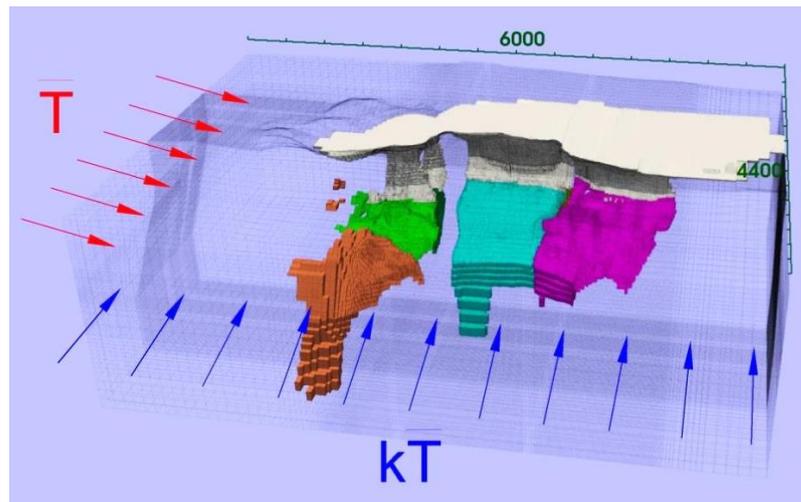


Рисунок 3.21 – Схема тектонического нагружения конечно-элементной модели

Задача решалась в упругой постановке, что требует соблюдение условий неразрывности, сплошности и изотропности свойств моделируемых объектов [24]. Обрушенные породы, заполняющие очистное пространство, не являются средой, отвечающей требованиям для решения задач в упругой постановке, соответственно в рассматриваемой модели принято допущение, позволяющее представлять очистное пространство в виде пустой выемки. В результате моделирования были получены распределения напряжений в условиях действия гравитационно-тектонического поля напряжений для разных этапов ведения горных работ

Вариант, учитывающий стадию до начала горных работ, наиболее достоверно описывает распределение напряжений в нетронутым массиве. Из рисунка 3.22 видно, что зона концентрации максимальных сжимающих напряжений приурочена к породам рудного тела и окружающим его областям вмещающего массива, минимальная компонента ( $\sigma_{min}$ ) имеет более равномерное распределение по глубине.

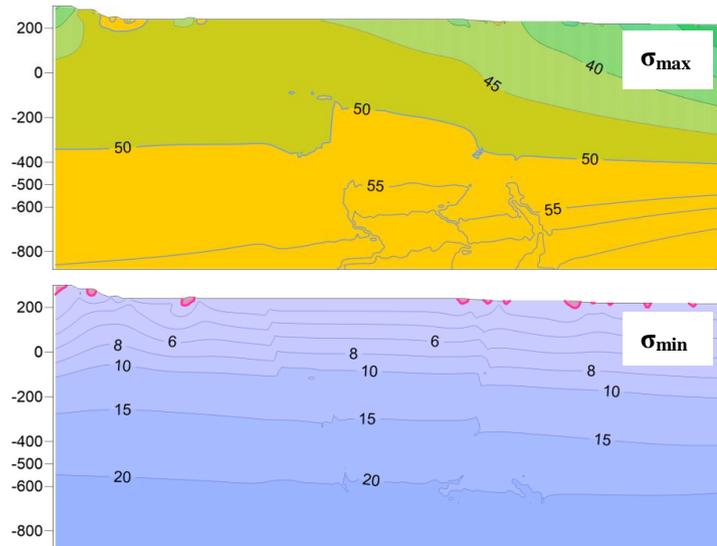


Рисунок 3.22 – Распределение напряжений при гравитационно-тектоническом варианте нагружения. Стадия 1 - до начала горных работ

При анализе результатов моделирования на момент окончания горных работ открытым способом (рисунок 3.23) видно, как влияют карьерные выемки на начальное поле напряжений: зоны концентрации  $\sigma_{max}$  охватывают значительные области моделируемого массива вплоть до дна карьерных выемок. Во фланговых зонах значения  $\sigma_{max}$  достигают 60-65 МПа. У дна карьера формируются области растягивающих напряжений ( $\sigma_{min} < 0$ ) с их переориентировкой относительно исходного НДС ненарушенного массива.

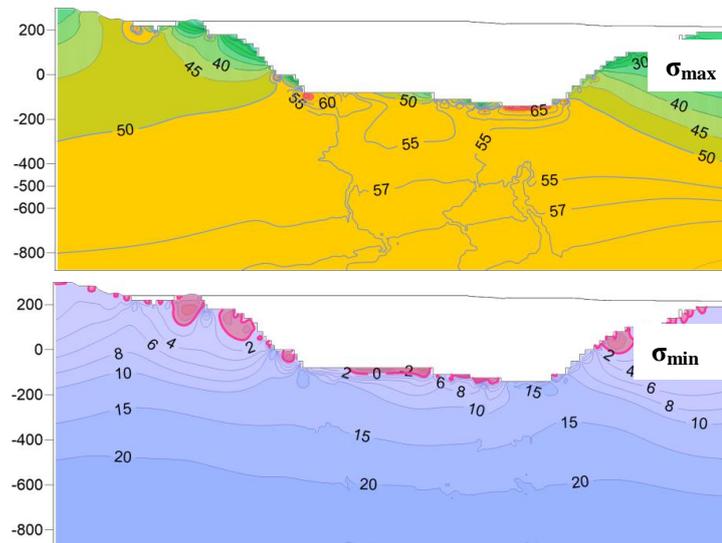


Рисунок 3.23 – Распределение напряжений при гравитационно-тектоническом варианте нагружения. Стадия 2 - окончание горных работ открытым способом

При моделировании подземных горных работ, соответствующих их состоянию на момент создания модели и гравитационно-тектоническом типе нагружения (рисунок 3.24), величины максимальной компоненты напряжений составляют 40-45 МПа у бортов карьера и достигают 70 МПа у нижнего фронта очистных работ, который расположен на гор. -440 м, что соответствует глубине около 700-750 м от дневной поверхности. Видно, что при углублении горных работ происходит рост сжимающих напряжений, соответственно увеличивается вероятность проявления динамических форм горного давления при дальнейшей выемке запасов Ждановского месторождения. При анализе распределения минимальной компоненты главных напряжений отмечено увеличение зон растяжения у дневной поверхности, на участках борта подработанного карьера и у границ подземного очистного пространства, что свидетельствует об увеличении интенсивности процессов трещинообразования в данных зонах.

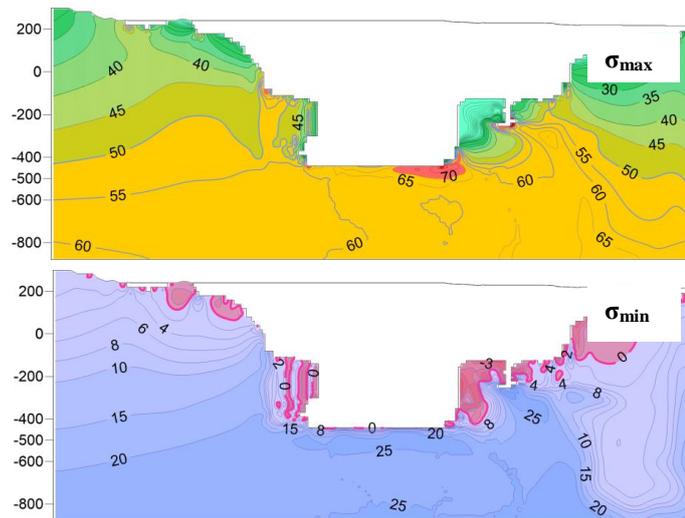


Рисунок 3.24 – Распределение напряжений при гравитационно-тектоническом варианте нагружения. Стадия 3 – положение очистной выемки при подземной отработке на отметке гор. -440м

Для каждой ситуации были определены значения главных компонент напряжений в точках замеров параметров НДС. На рисунке 3.25 представлен пример сравнения результатов моделирования исходного и измененного полей напряжений в районе измерительной станции №8, а также сопоставление с результатами измерений главных компонент напряжений, которые обозначены красным ( $\sigma_{max}$ ) и синим ( $\sigma_{min}$ ) шрифтом. Видно, что величины максимальной сжимающей компоненты в области измерений изменились незначительно, в то время как значения  $\sigma_{min}$  существенно снизились из-за формирования зоны разгрузки от очистных работ. На контуре очистного пространства выделяются области с отрицательными значениями  $\sigma_{min}$ , что говорит о действии

растягивающих напряжений. Наличие растягивающих напряжений также зафиксировано при выполнении измерений методом полной разгрузки *in-situ*.

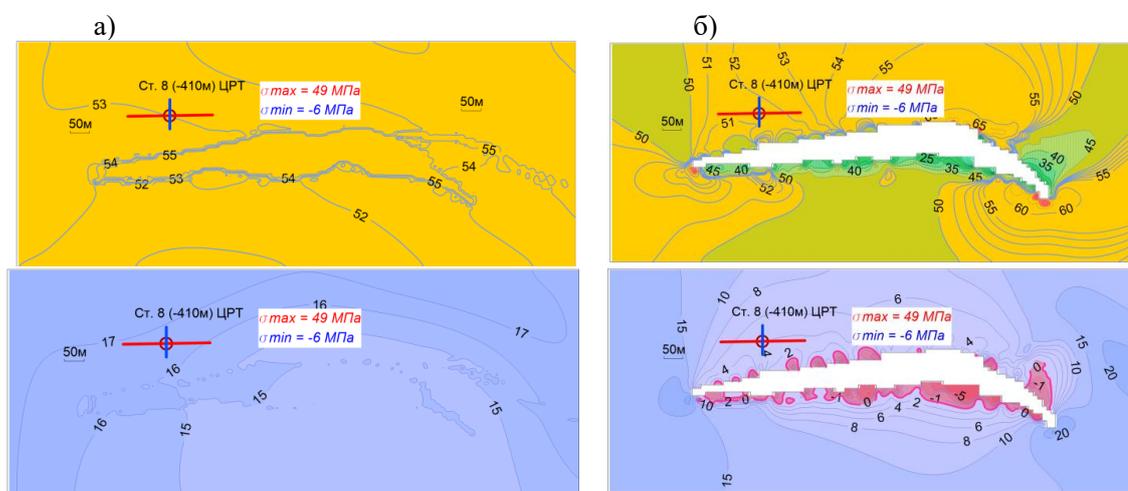


Рисунок 3.25 – Сравнение результатов моделирования исходного (а) и измененного (б) полей напряжений

При сравнении результатов моделирования исходного и измененного горными работами НДС определено, что часть измерительных станций была оборудована в зонах влияния очистных работ, и результаты измерений описывали техногенное поле напряжений. Корректная оценка геомеханической ситуации и прогноз ее изменения в процессе ведения горных работ требуют определения параметров природного поля действующих напряжений, поэтому была решена задача по реконструкции исходного НДС массива пород Ждановского месторождения.

### 3.2.2.2 Оценка влияния консоли налегающих пород на параметры НДС

При отработке запасов системой разработки с подэтажным обрушением формируется область массива вмещающих пород, консольно зависающая над выработанным пространством и висячим боком рудного тела. Такая зона оказывает влияние на НДС массива, создавая дополнительную пригрузку. В процессе углубления горных работ в налегающей консоли происходит возникновение и развитие трещин отрыва, части массива постепенно отделяются и заполняют очистное пространство. Определение параметров обрушения в массивах налегающей толщи пород является одной из важнейших задач обеспечения геомеханической безопасности при ведении горных работ.

Для определения степени влияния консольно зависших пород на параметры НДС массива Ждановского месторождения выполнено численное геомеханическое моделирование для двух вариантов конфигурации пород налегающей толщи: в первом варианте учитывалось, что консоль не была подвержена деформациям (рисунок 3.26 а), второй вариант предполагал развитие обрушения под углом  $65^\circ$  от дневной поверхности (рисунок 3.26 б). Положение очистного пространства промоделировано до отметки гор. -440 м.

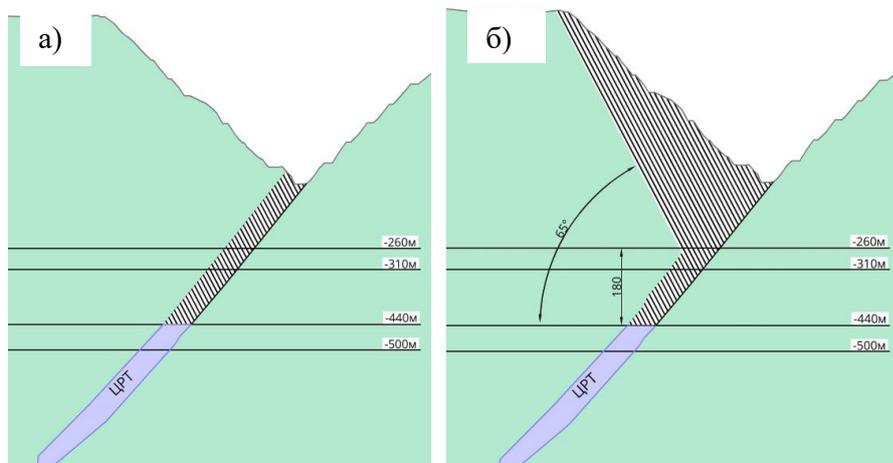


Рисунок 3.26 – Схема конфигурации консоли налегающих пород:  
 а) при отсутствии обрушения налегающих пород,  
 б) при развитии обрушения под углом  $65^\circ$  от дневной поверхности

В результате моделирования получены значения главных компонент напряжений для обоих вариантов конфигурации консоли налегающих пород. Для иллюстрации изменения параметров НДС выбраны горизонтальные сечения в отметке гор. -440м ЦРТ и вертикальные, соответствующие разрезам вкrest простирания рудного тела: Р.1, Р.12 и Р.27.

Значения максимальной сжимающей компоненты ( $\sigma_{max}$ ) изменились незначительно: в областях лежачего и висячего боков рудного тела произошла незначительная разгрузка (рисунок 3.27 а,б).

При сравнении распределений минимальной компоненты главных напряжений для обоих вариантов (рисунки 3.28 - 3.29 а,б) наблюдается снижение значений  $\sigma_{min}$  в области пород висячего бока, тогда как в лежащем боку ситуация фактически не изменилась: картина распределения минимальных напряжений практически идентична.

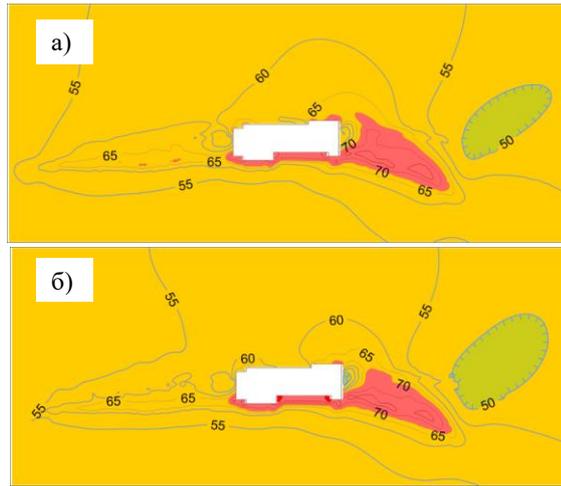


Рисунок 3.27 – Изменение максимальной компоненты главных напряжений при разной конфигурации консоли налегающих пород: а) с консолью; б) без консоли

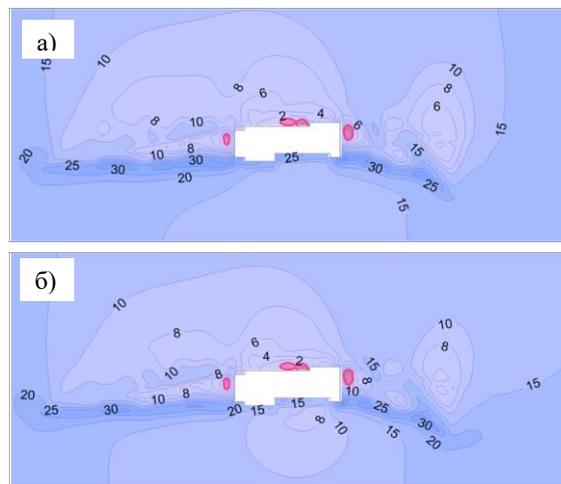


Рисунок 3.28 – Изменение минимальной компоненты главных напряжений при разной конфигурации консоли налегающих пород: а) с консолью; б) без консоли

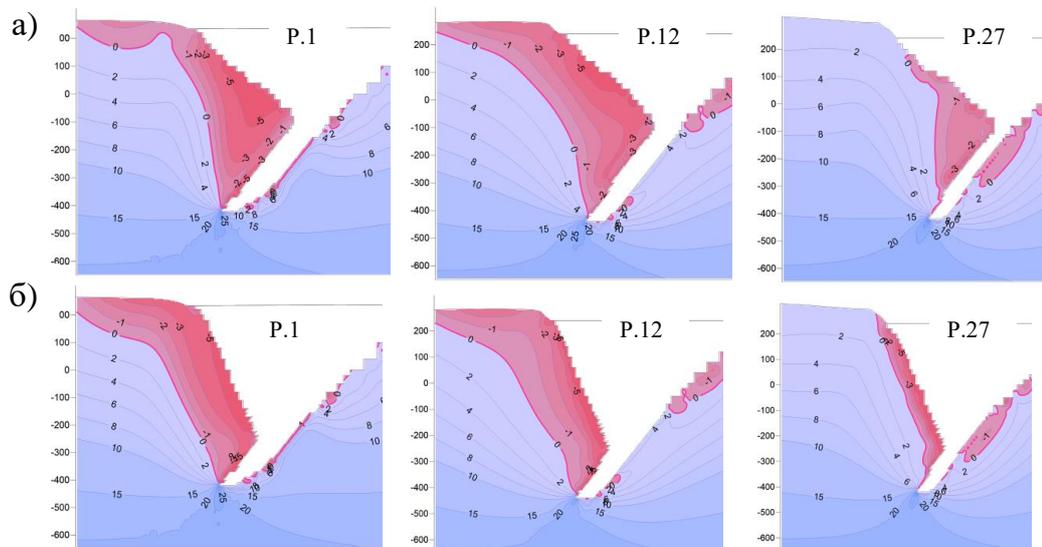


Рисунок 3.29 – Изменение минимальной компоненты главных напряжений при разной конфигурации консоли налегающих пород: а) с консолью; б) без консоли

Таким образом, можно заключить, что при изменении конфигурации консоли налегающих пород происходит перераспределение напряжений в породах висячего бока, тогда как в массиве лежачего бока параметры НДС практически не меняются. В наибольшей степени трансформируется минимальная компонента главных напряжений: ее значения снижаются при разгрузке от части объема зависания, при этом значения максимальных сжимающих напряжений практически не меняются. В связи с тем, что станции натуральных измерений параметров НДС оборудованы во вмещающем массиве лежачего бока рудного тела, нет необходимости учитывать влияние консоли налегающих пород при реконструкции природного поля напряжений Ждановского месторождения.

### 3.2.3 Результаты реконструкции природного поля напряжений

#### Ждановского месторождения при вариации нагрузок на грани модели

Для определения параметров исходного поля напряжений Ждановского месторождения было выполнено восстановление горнотехнической ситуации на момент выполнения замеров и последовательное моделирование НДС. В результате расчетов при вариации граничных условий, в областях точек замеров получены значения главных компонент напряжений, наиболее допустимо соответствующие результатам измерений *in-situ* методом разгрузки.

В результате выполнения расчетов, учитывающих различные комбинации значений главных компонент напряжений и их соотношений, определен вариант, при котором заданные на границы нагрузки наиболее приемлемо отражают особенности распределения природного поля напряжений Ждановского месторождения (рисунок 3.30, таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Значения главных компонент напряжений, полученных в результате реконструкции природного поля напряжений для массивов пород Ждановского и Заполярного месторождений

Отметка гор.	Глубина, м	$\sigma_{\max}$ , МПа	$\sigma_{\text{пр}} = \gamma H$ , МПа	$\sigma_{\min}$ , МПа	$\sigma_3/\sigma_1$	$\lambda_1$	$\lambda_2$
-260м	560	33	16	13	0,40	2,0	0,8
-310м	610	36	18	14	0,40	2,0	0,8
-410м	710	41	21	16	0,40	2,0	0,8
-440м	740	43	22	17	0,40	2,0	0,8
-680м	980	60	29	24	0,40	2,1	0,8
-780м	1080	70	32	28	0,40	2,2	0,9
					$\overline{\sigma_3/\sigma_1} = 0,4$	$\overline{\lambda_1} = 2,0$	$\overline{\lambda_2} = 0,8$

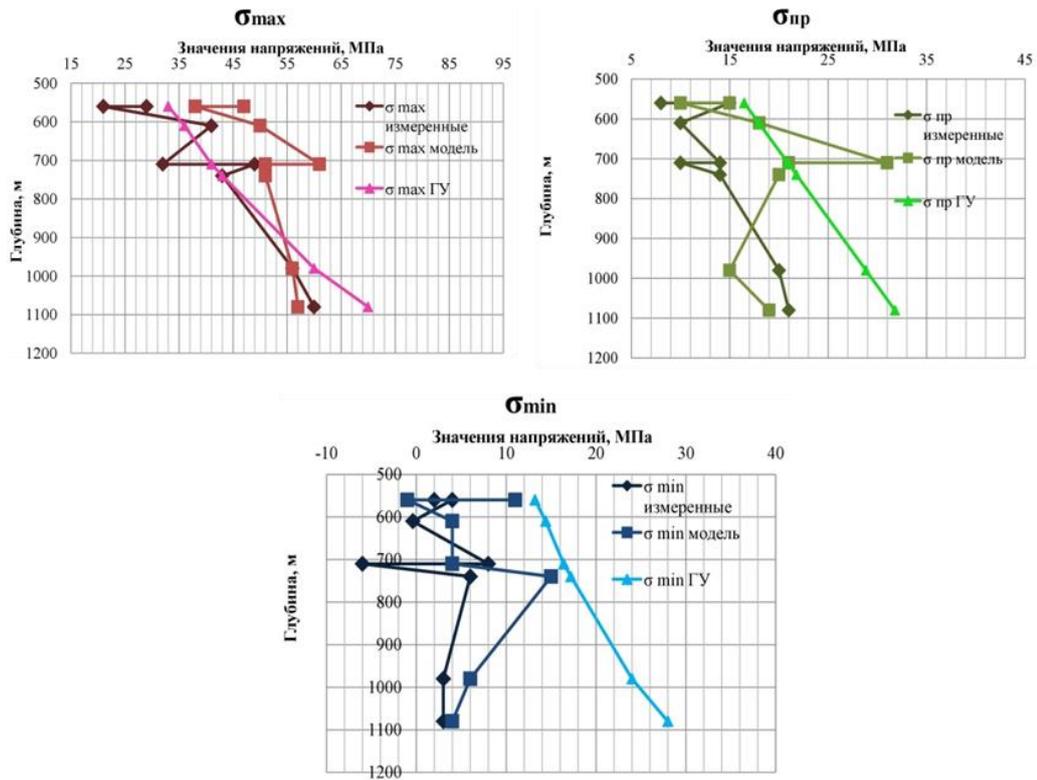


Рисунок 3.30 – Сравнение значений главных компонент напряжений: измеренных в массиве ( $\sigma$  измеренные), заданных в модели в виде граничных условий ( $\sigma$  ГУ) и полученных в результате моделирования ( $\sigma$  модель)

График распределения главных компонент природного поля напряжений Ждановского месторождения с глубиной в интервалах измерений, представлен на рисунке 3.31.

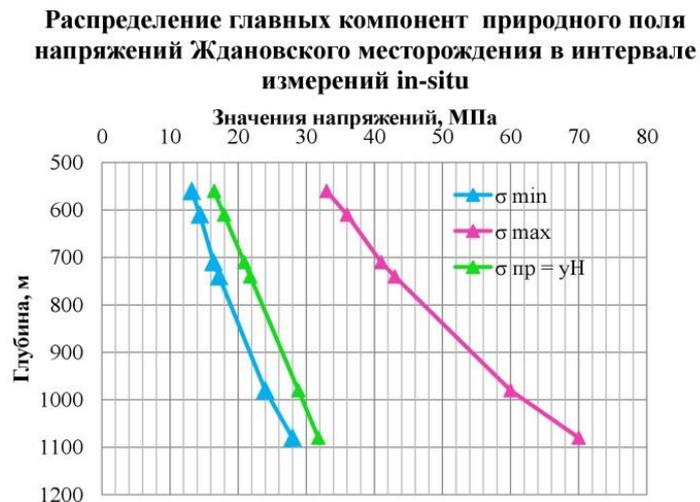


Рисунок 3.31 – Результат реконструкции главных компонент тензора природного поля напряжений массива пород Ждановского месторождения в интервалах глубин измерений  
 Определены соотношения значений главных компонент природного поля напряжений Ждановского месторождения:  $\sigma_{max} / \sigma_{min} = 2,5$  коэффициенты бокового давления

( $\lambda = \sigma_{гор} / \sigma_{верт}$ ) равны соответственно  $\lambda_1 = \sigma_{max} / \sigma_{np} = 2$ ,  $\lambda_2 = \sigma_{min} / \sigma_{np} = 0,8$ . Таким образом, соотношение главных компонент природного поля напряжений Ждановского месторождения составляет:  $\sigma_{max(T_1)} : \sigma_{np(\gamma H)} : \sigma_{min(T_2)} = 1 : 0,5 : 0,4$ .

Необходимо отметить, что процесс измерений с использованием метода полной разгрузки достаточно чувствителен к техническим параметрам и характеристикам массива пород (например, трещиноватости), поэтому имеет определенную погрешность. Помимо этого, при численном моделировании НДС также допускаются некоторые локальные искажения, в основном связанные с особенностями конфигурации рудных тел и очистного пространства. В связи с наличием погрешностей в обоих методах, крайне затруднительно получение точного совпадения результатов численного моделирования с результатами измерений *in-situ*. Однако совокупность данных методов позволяет достаточно достоверно получать основные закономерности распределения напряжений для оценки НДС в процессе ведения горных работ.

#### 3.2.4 Прогноз изменения параметров природного поля напряжений массива пород Ждановского месторождения

На рисунке 3.32 представлено изменение значений главных компонент напряжений, полученных интерполяцией и экстраполяцией до верхней и нижней границы модели в абсолютных отметках от +300 м до -1600 м. Принято, что экстраполяция значений до верхней границы моделирования (дневной поверхности) имеет линейный характер. При выполнении экстраполяции на глубину до нижней границы моделирования учитывалась гипотеза о том, что при увеличении глубины существует тенденция замедления роста значений тектонических компонент напряжений [73, 93]. Данная гипотеза также подтверждена исследованиями НДС массивов горных пород месторождений Кольского региона [83, 108].

Сравнение значений главных компонент напряжений, полученных в результате моделирования НДС со значениями, измеренными *in-situ* методом разгрузки в целом показывает приемлемую корреляцию с учетом погрешностей обоих методов.

В результате выполненного исследования определено, что изменение значений природных тектонических субгоризонтальных напряжений с глубиной для условий Ждановского месторождения с высокой достоверностью аппроксимации ( $R^2=0,9951$ )

можно выразить в виде полиномиальных зависимостей (3.1, 3.2), графики которых представлены на рисунке 3.33:

$$\sigma_{max} = -2 \cdot 10^{-8} z^3 + 5 \cdot 10^{-5} z^2 + 0,03z + 5, \text{ МПа} \quad (3.1)$$

$$\sigma_{min} = -8 \cdot 10^{-9} z^3 + 2 \cdot 10^{-5} z^2 + 0,01z + 2, \text{ МПа} \quad (3.2)$$

где  $z$  – глубина от дневной поверхности, м.

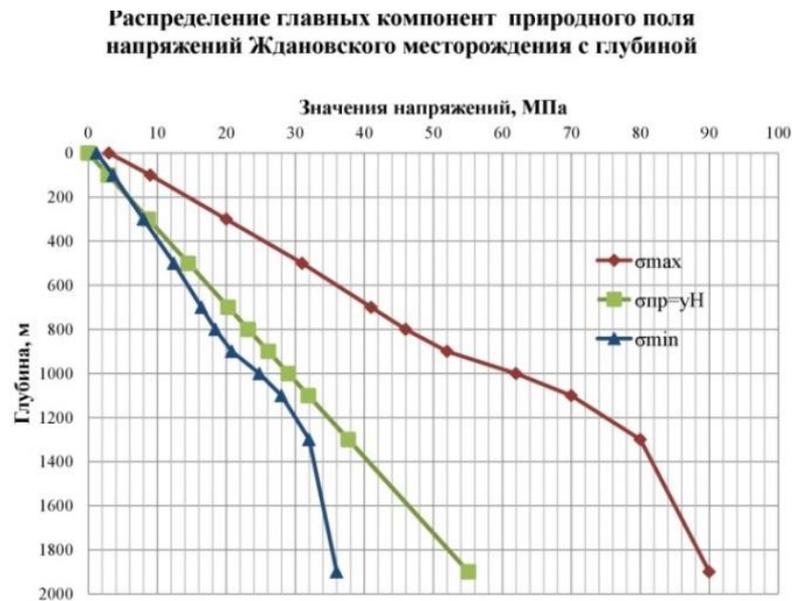


Рисунок 3.32 – Распределение значений главных компонент природного поля напряжений массива пород Ждановского месторождения с глубиной

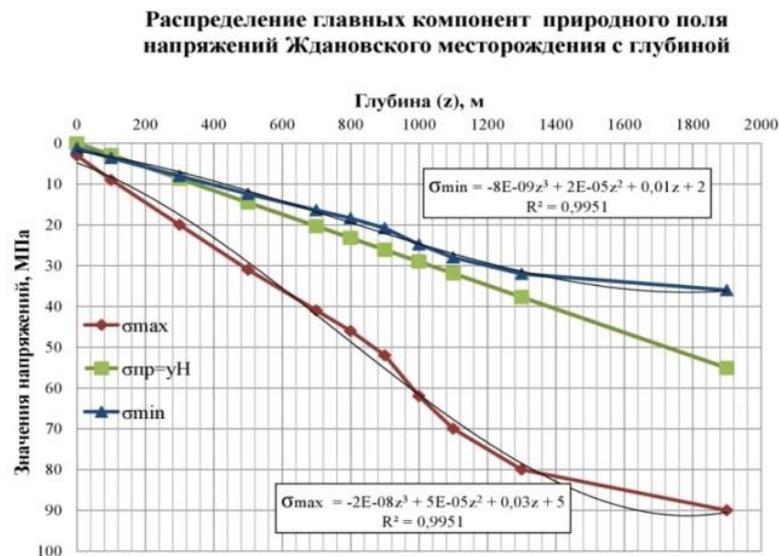


Рисунок 3.33 – Полиномиальная аппроксимация изменения главных компонент природного поля напряжений массива пород Ждановского месторождения с глубиной

Также для приблизительного расчета изменение  $\sigma_{max}$  и  $\sigma_{min}$  можно представить с достаточно высокой степенью достоверности в виде следующих линейных аппроксимаций (3.3, 3.4), (рисунок 3.34):

$$\sigma_{max} = 0,05z + 6,5, \text{ МПа} \quad (3.3)$$

$$\sigma_{min} = 0,02z + 2,5, \text{ МПа} \quad (3.4)$$

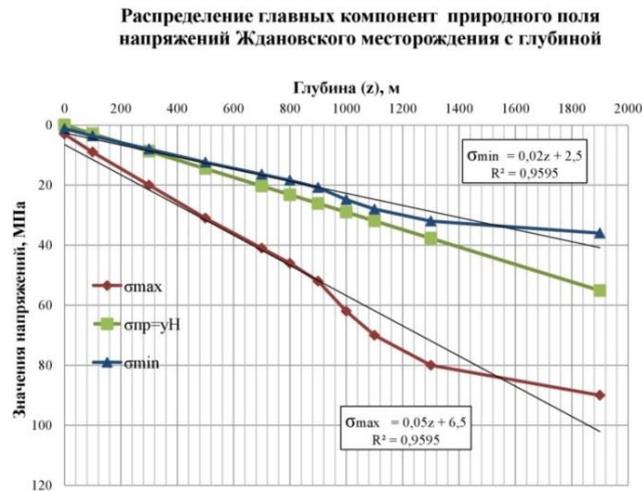


Рисунок 3.34 – Линейная аппроксимация изменения главных компонент природного поля напряжений массива пород Ждановского месторождения с глубиной

Для месторождений Фенноскандинавского блока Н. Хастом получена следующая эмпирическая зависимость (3.5) изменения значений тектонических компонент напряжений от глубины [145]:

$$\sigma_x + \sigma_y = 0,098 \cdot z + 18, \text{ МПа}, \quad (3.5)$$

где  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  – главные тектонические (субгоризонтальные) компоненты напряжений,  $z$  – глубина от дневной поверхности, м.

Для условий Ждановского месторождения сумма тектонических компонент напряжений равна (3.6):

$$\sigma_{max(x)} + \sigma_{min(y)} = 0,07 \cdot z + 9, \text{ МПа}. \quad (3.6)$$

Необходимо отметить, что линейные зависимости не учитывают гипотезу о замедлении роста тектонических напряжений с глубиной, поэтому их использование должно быть ограничено глубиной ведения горных работ 900-1000 м.

### Выводы по Главе 3

1. На основе результатов натурных исследований с использованием метода численного моделирования НДС выполнена реконструкция параметров природного поля напряжений Ждановского месторождения.

2. Определено, что максимальная и минимальная компоненты тензора природного поля напряжений ( $\sigma_{max}$  и  $\sigma_{min}$ ) направлены субгоризонтально и являются тектоническими; промежуточная компонента  $\sigma_{np}$  направлена субвертикально. Соответственно, тип природного напряженного состояния массива пород Ждановского месторождения является гравитационно-тектоническим.

3. Максимальная компонента напряжений направлена по простиранию рудных тел.

4. Определены соотношения главных компонент природного поля напряжений Ждановского месторождения:  $\sigma_{max(T_1)} : \sigma_{np(\gamma H)} : \sigma_{min(T_2)} = 1 : 0,5 : 0,4$ . Коэффициенты бокового давления ( $\lambda = \sigma_{гор} / \sigma_{верт}$ ) равны соответственно  $\lambda_1 = \sigma_{max} / \sigma_{np} = 2$ ,  $\lambda_2 = \sigma_{min} / \sigma_{np} = 0,8$ .

5. Выполнен прогноз изменения значений главных компонент природного поля напряжений массива пород Ждановского месторождения с глубиной в двух вариантах: с линейной аппроксимацией:  $\sigma_{max} = 0,05z + 6,5$ , МПа;  $\sigma_{min} = 0,02z + 2,5$ , МПа; с учетом замедления роста тектонических компонент:  $\sigma_{max} = -2 \cdot 10^{-8} z^3 + 5 \cdot 10^{-5} z^2 + 0,03z + 5$ , МПа;  $\sigma_{min} = -8 \cdot 10^{-9} z^3 + 2 \cdot 10^{-5} z^2 + 0,01z + 2$ , МПа.

В результате комплексного исследования параметров природного поля напряжений, выполненного на основе анализа данных натурных исследований и реконструкции НДС с помощью численного моделирования, сформулировано **второе научное положение: 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  $\sigma_{max}$  направлен вдоль простирания рудных тел с азимутом  $\approx 120^\circ$ . Изменение тектонических компонент природного поля напряжений с глубиной до 1000 м описывается зависимостями:  $\sigma_{max} = 0,05z + 6,5$ , МПа;  $\sigma_{min} = 0,02z + 2,5$ .**

## **ГЛАВА 4 ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В МАССИВЕ ПОРОД ЖДАНОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

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 прогнозной оценки напряженного состояния массива пород необходимо создание геомеханических моделей месторождений и рудных тел. В настоящее время для решения этих задач широко применяются методы численного моделирования. Численная геомеханическая модель Ждановского месторождения была сгенерирована в программном комплексе *Sigma GT*. Основные этапы создания модели рассмотрены в главе 3 данной работы. На границы модели в виде сил заданы нагрузки, значения и распределение которых по глубине определены с помощью реконструкции параметров природного поля напряжений Ждановского месторождения на основе натурных измерений методом полной разгрузки.

### **4.1 Исследование расчетных полей напряжений и их трансформации по мере выемки запасов месторождений для выбора рационального порядка отработки**

Для оценки трансформации НДС по мере отработки запасов рассматривали четыре варианта: 1) состояние горных работ на конец 2024 года; 2) перспективная отработка запасов до отметки -510 м; 3) перспективная отработка запасов до отметки -610 м; 4) перспективная отработка запасов до отметки -710 м. Результаты расчетов представлены в вертикальном сечении по разрезу 14 ЦРТ (рисунок 4.1) и в горизонтальных сечениях на отметках -530 м, -630 м, -730 м (рисунки 4.2-4.4). Выполнена оценка распределений максимальной и минимальной компонент тензора напряжений ( $\sigma_{max}$  и  $\sigma_{min}$ ). Выявление областей критических состояний массива пород с учетом значений  $\sigma_{max}$  выполнялось с использованием критерия удароопасности Горного института КНЦ РАН (глава 1 данной

работы), так как он дает возможность ранжирования потенциальных разрушений по интенсивности проявлений динамических форм горного давления. Зоны потенциальных разрушений, вызванные влиянием растягивающих напряжений, определялись при оценке отрицательных величин  $\sigma_{min}$  с учетом коэффициента структурного ослабления массива (глава 2 данной работы).

При анализе результатов моделирования для всех четырех вариантов последовательного развития очистной выемки можно заключить, что трансформацию поля напряжений характеризуют два процесса: пригрузка массива горных пород под очистными выемками  $\sigma_{max}$  (рисунок 4.1 а) и развитие процессов обрушения подработанной толщи пород за счет формирования зон растягивающих напряжений  $\sigma_{min}$  (рисунок 4.1 б). Поэтому, с точки зрения геомеханически обоснованного порядка развития горных работ, с одной стороны, необходима минимизация зон концентрации  $\sigma_{max}$ , а с другой стороны – планомерное обрушение налегающего массива, что в определенной степени также способствует разгрузке в областях опирания.

На разрезах видно (рисунок 4.1), как происходит рост абсолютных величин  $\sigma_{max}$  под очистным пространством до 100 МПа в зонах концентрации. Фоновые значения компонент главных напряжений при развитии горных работ с отметки гор. -460 м до гор.-730 м увеличиваются примерно на 10%, при этом заметна тенденция избыточной пригрузки в областях висячего бока рудного тела под очистной выемкой. Стоит отметить, что увеличение контрастности поля напряжений, то есть различия между максимальной и минимальной компонентой действующих напряжений, также способствуют потере устойчивости участков массива и элементов горной технологии. Фоновые величины  $\sigma_{max}$  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 проявлений динамических форм горного давления при проведении горных работ на данных глубинах с учетом оценки критерия удароопасности [126] и коэффициентов структурного ослабления массива пород. Минимальная компонента напряжений имеет отрицательные значения, что свидетельствует о наличии зон растягивающих напряжений в бортах карьерной выемки. При этом критическим значением  $\sigma_{min}$ , достаточным для инициирования разрушения при действии механизма, связанного с процессами растяжения, для массива пород Ждановского месторождения является  $\sigma_{min} \approx -4$  МПа. В массиве консольно зависших пород выделяются зоны с критическими значениями  $\sigma_{min}$ , соответственно в этих областях возможны разрушения, вызванные влиянием растягивающих напряжений и образованием трещин отрыва [117].

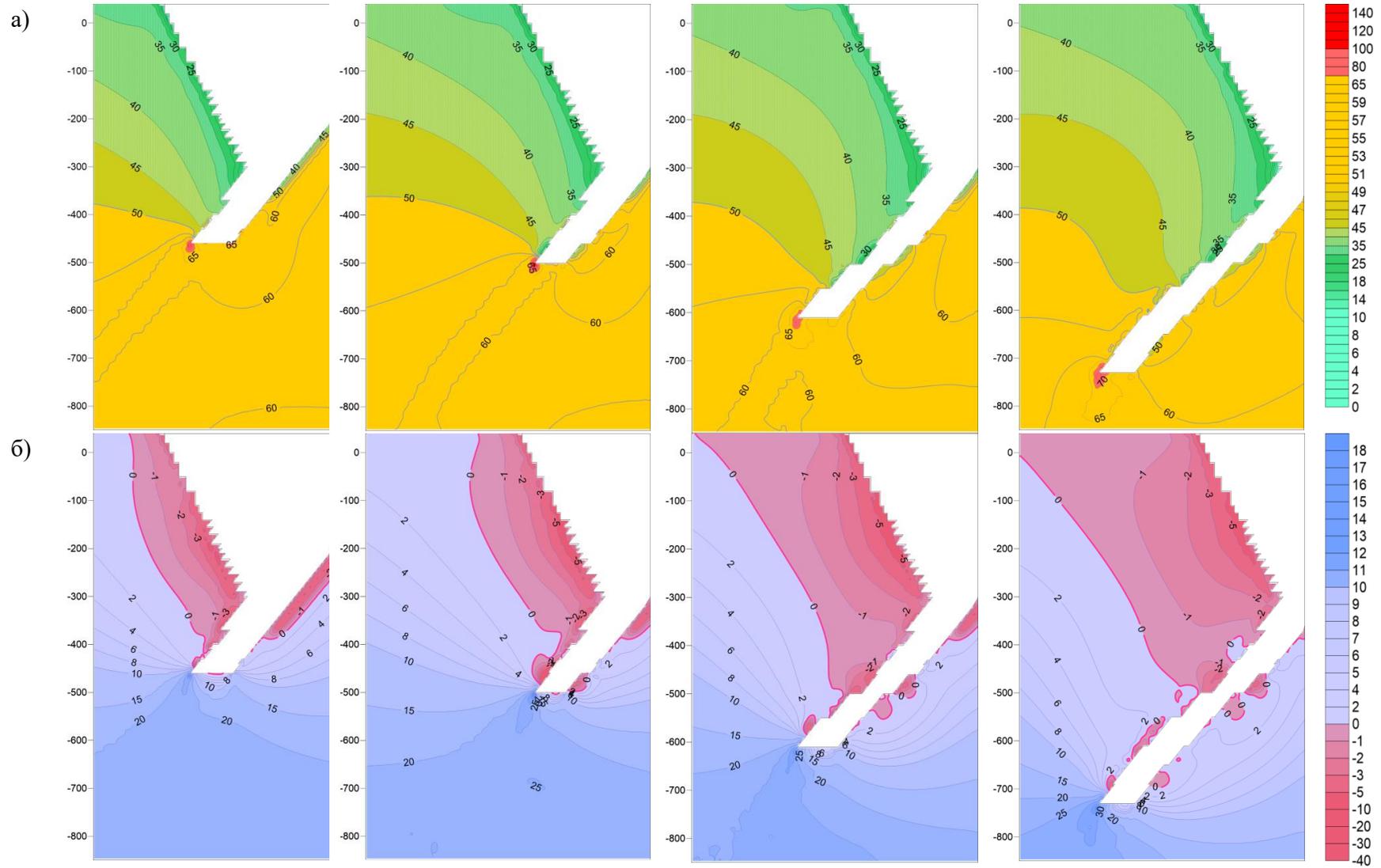


Рисунок 4.1 – Трансформация  $\sigma_{max}$  (а) и  $\sigma_{min}$  (б) по мере развития подземных горных работ в сечении по разрезу 14 ЦРТ

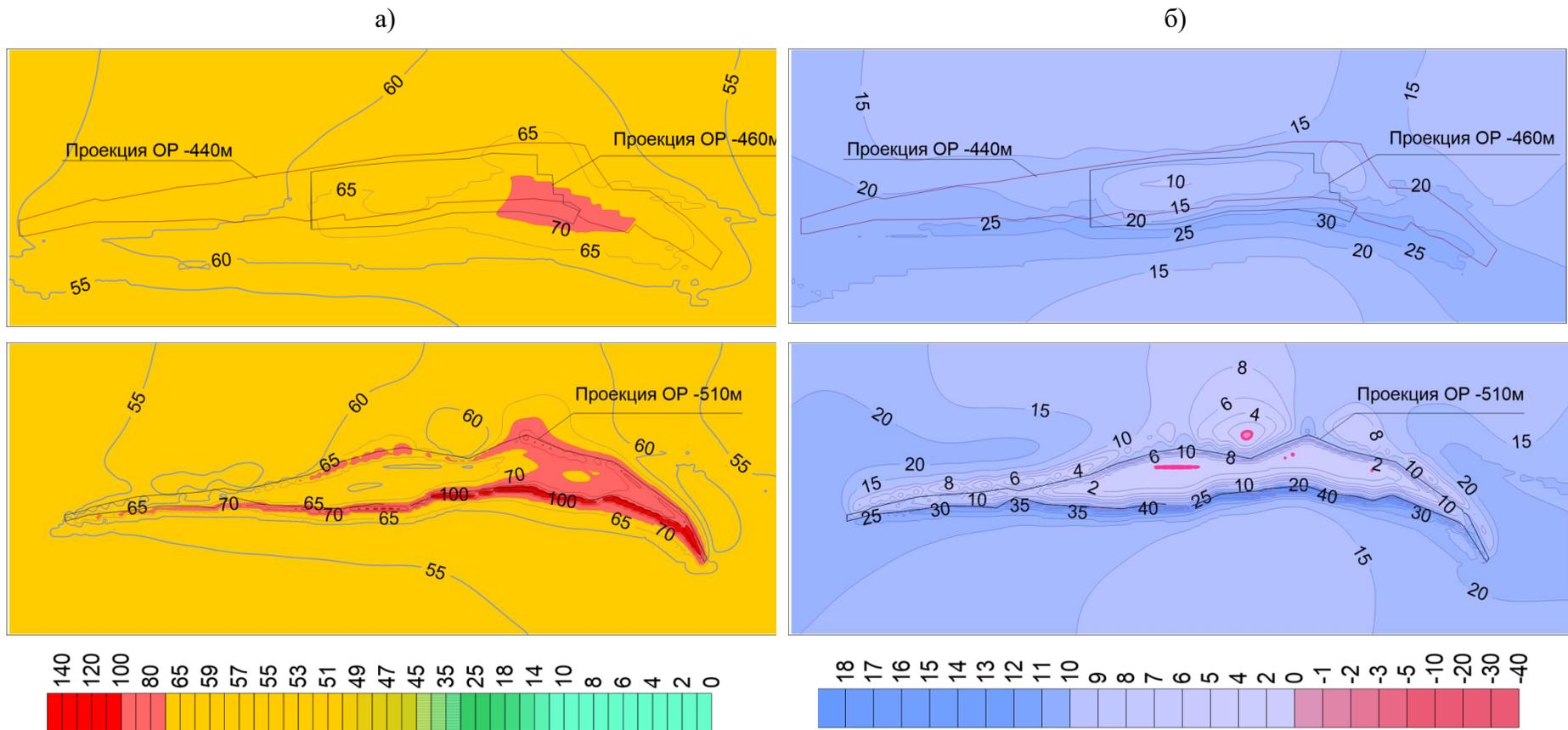


Рисунок 4.2 – Трансформация  $\sigma_{max}$  (а) и  $\sigma_{min}$  (б) по мере развития подземных горных работ в сечении гор. -530 м

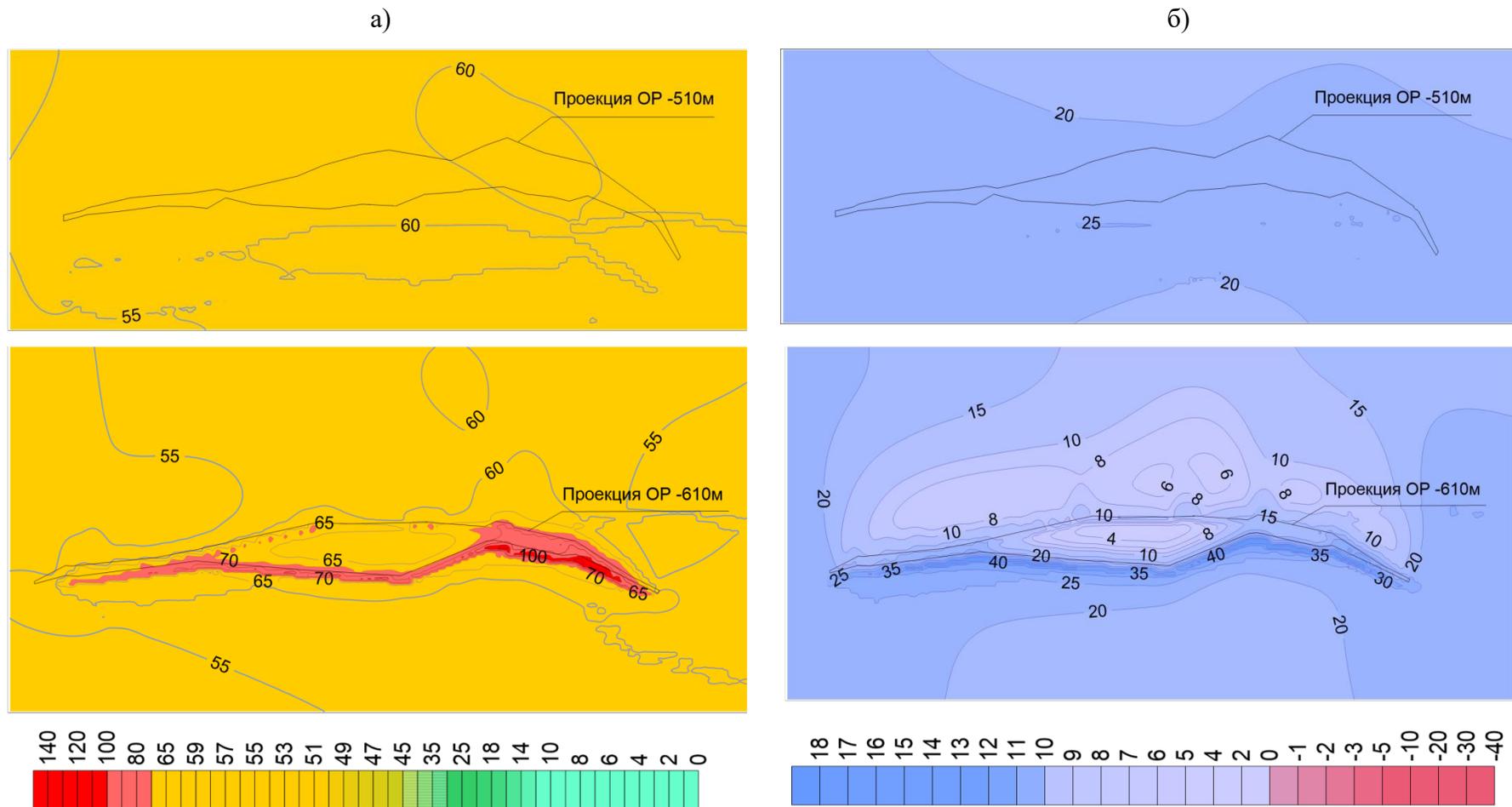


Рисунок 4.3 – Трансформация  $\sigma_{max}$  (а) и  $\sigma_{min}$  (б) по мере развития подземных горных работ в сечении гор. -630 м

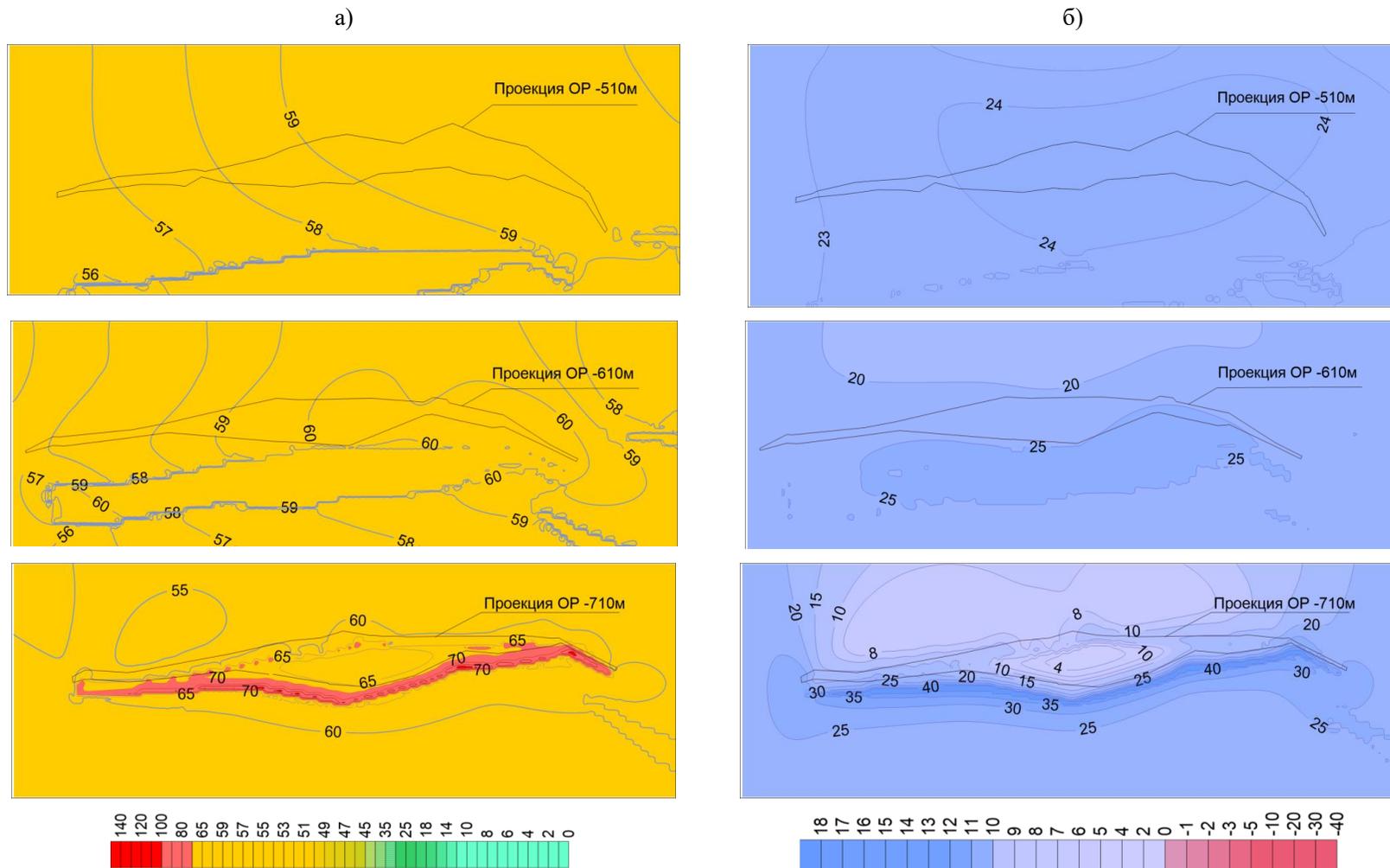


Рисунок 4.4 – Трансформация  $\sigma_{max}$  (а) и  $\sigma_{min}$  (б) по мере развития подземных горных работ в сечении гор. -730 м

#### 4.1.1 Обоснование порядка развития очистных работ в пределах подэтажей

Помимо углубления горных работ существуют факторы, осложняющие геомеханическую ситуацию: например, развитие очистных работ от нескольких разрезов с формированием целиков между сближающимися фронтами.

Рассмотрим в общем виде процесс изменения НДС при отработке запасов встречными фронтами. Участок постепенного сближения горных работ промоделирован на горизонте -460 м. Из рисунка 4.5 видно, что пригрузка массива происходит как на горизонте, где непосредственно формируется целик, так и на нижележащем подэтаже. Значения  $\sigma_{max}$  в областях концентрации составляют более половины предела прочности при одноосном сжатии в образце, соответственно, в этих зонах возможны динамические проявления горного давления. Результаты, полученные при моделировании, подтверждаются фактом разрушения целиков в пределах отработываемых запасов Ждановского месторождения, образованных при нерациональном порядке ведения горных работ.

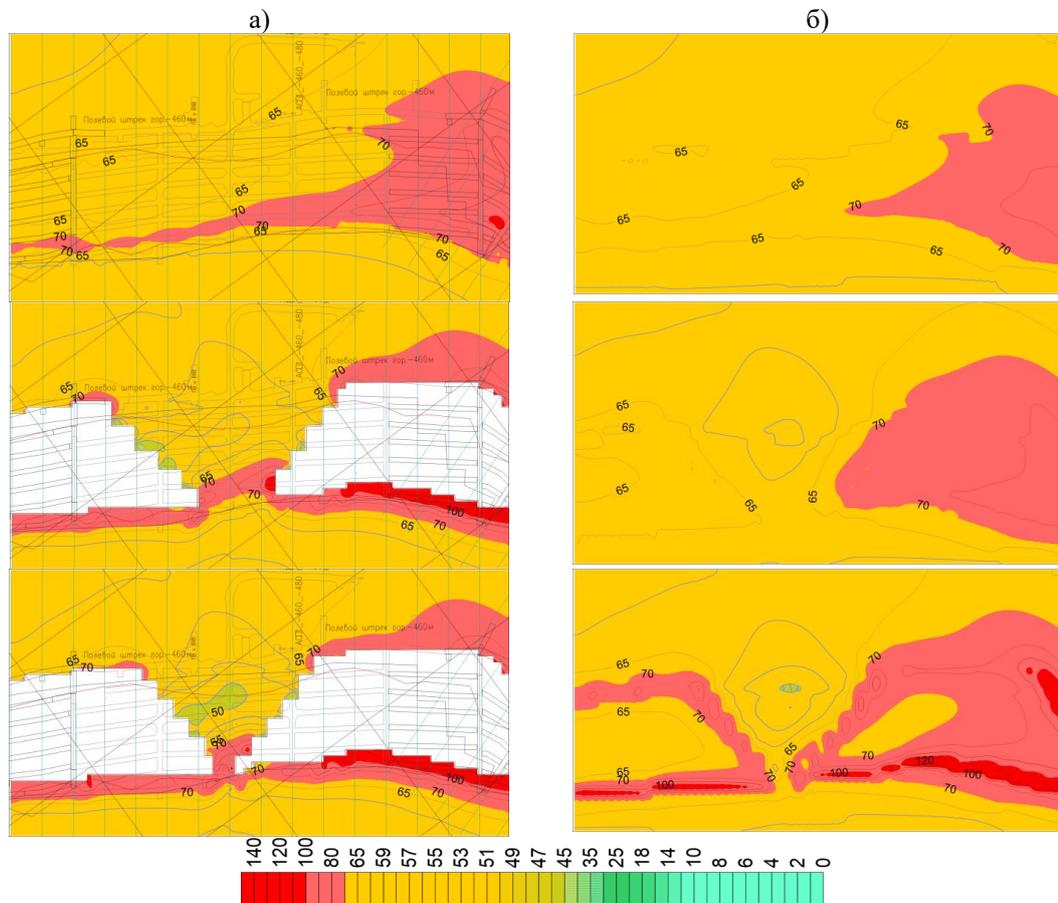


Рисунок 4.5 – Изменение  $\sigma_{max}$  в области формирования целика по мере развития горных работ встречными фронтами: а) на гор. -460 м; б) на гор. -490 м

Рассмотрим частный случай, в котором на участке Ждановского месторождения, включающем ВРТ и ЮВРТ, выемка запасов запланирована встречными фронтами от двух разрезов (рисунок 4.6). В связи с этим нужна оценка критических размеров формируемых целиков с учетом комплекса геомеханических, геологических и горнотехнических факторов.



Рисунок 4.6 – План подэтажа -365 м как пример сложной горнотехнической ситуации с формированием целиков между фронтами горных работ (в разрезах 11-14) и безрудного целика, сформированного ветвлением рудного тела (в разрезах 17-20)

Согласно методике создания численных моделей в ПО *Sigma GT*, была разработана крупномасштабная модель ВРТ и ЮВРТ на основе мелкомасштабной модели Ждановского месторождения. Сформированная модель состоит из 308 сечений, в каждом  $144 \times 160$  элементов, всего 7 096 320 элементов, имеет линейные размеры в плане 2000 м  $\times$  2000 м, по вертикали – от дневной поверхности до глубины -1400м. Общий вид сгенерированной модели юго-восточного участка представлен на рисунке 4.7.

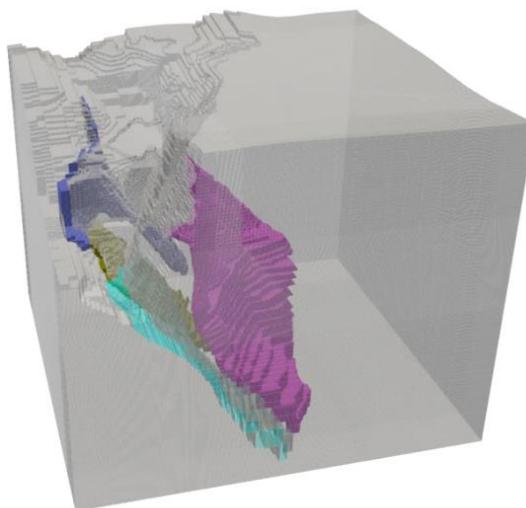


Рисунок 4.7 – Общий вид сгенерированной 3D модели ВРТ и ЮВРТ

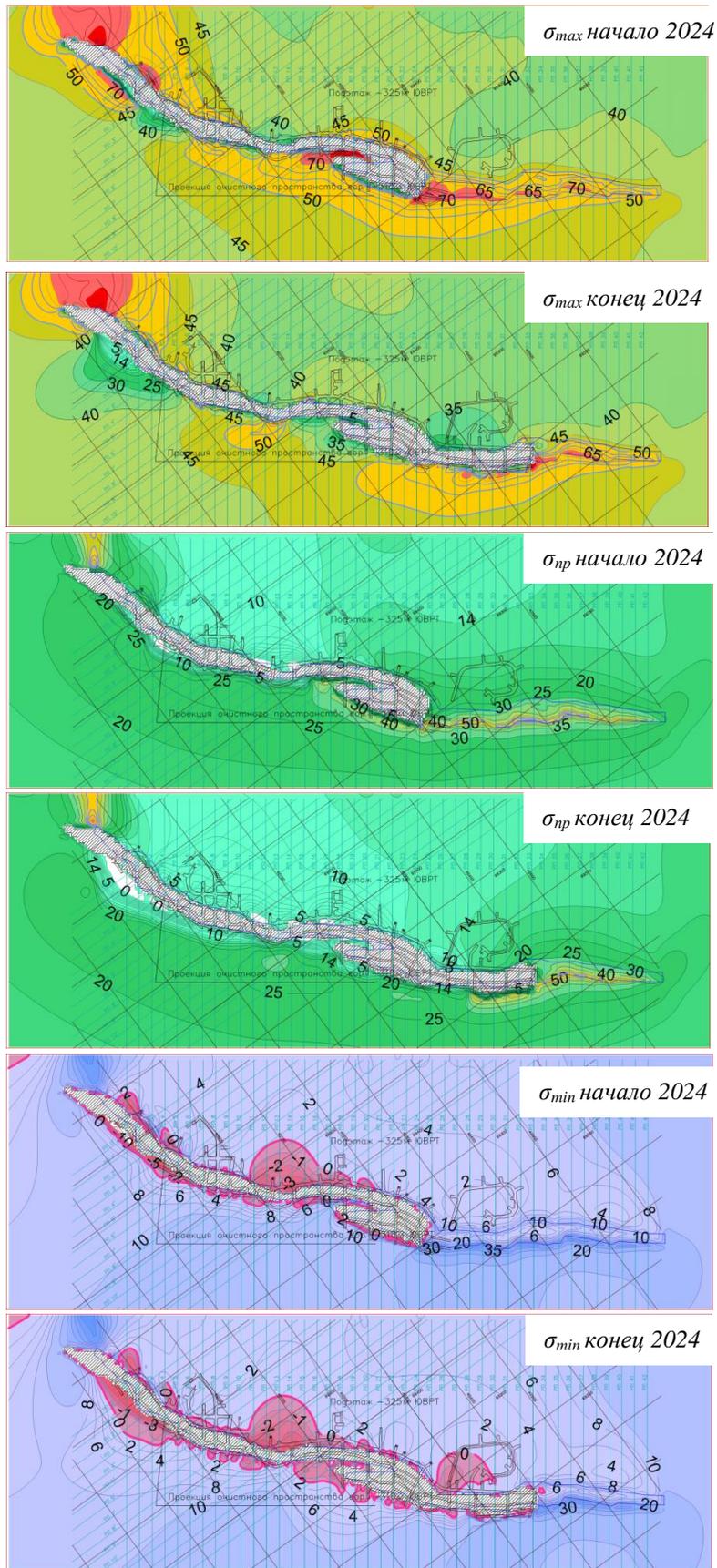
Граничные условия заданы в виде узловых перемещений, полученных путем интерполяции из региональной модели Ждановского месторождения. С использованием разработанной крупномасштабной геомеханической модели были проведены расчеты напряженно-деформированного состояния массива пород восточного фланга Ждановского месторождения (ВРТ и ЮВРТ) при отработке запасов, согласно плану горных работ на 2024 календарный год. Имитировалась запланированная очистная выемка: гор. -325м, п/э -345м, п/э -365м. Рассмотрена трансформация поля напряжений в процессе развития очистных работ в 2024 году. Результаты представлены главными компонентами тензора напряжений ( $\sigma_{max}$ ,  $\sigma_{np}$ ,  $\sigma_{min}$ ) (рисунки 4.8-4.10).

На гор. -325 м видно, как снижаются напряжения по всем трем компонентам в результате почти полной отработки запасов на данном горизонте и развития горных работ на нижележащих отметках. В частности, увеличиваются области действия растягивающих напряжений по минимальной компоненте ( $\sigma_{min}$ ). В тоже время, у продвигающегося восточного фронта горных работ наблюдается зона концентрации напряжений  $\sigma_{max}$  со значениями до 70 МПа, соответственно в выработках возможны проявления горного давления в динамической форме.

На нижележащем подэтаже -345 м уровень действующих напряжений несколько выше, наибольшая пригрузка массива фиксируется у западного фронта очистных работ, где значения  $\sigma_{max}$  достигают 100 МПа.

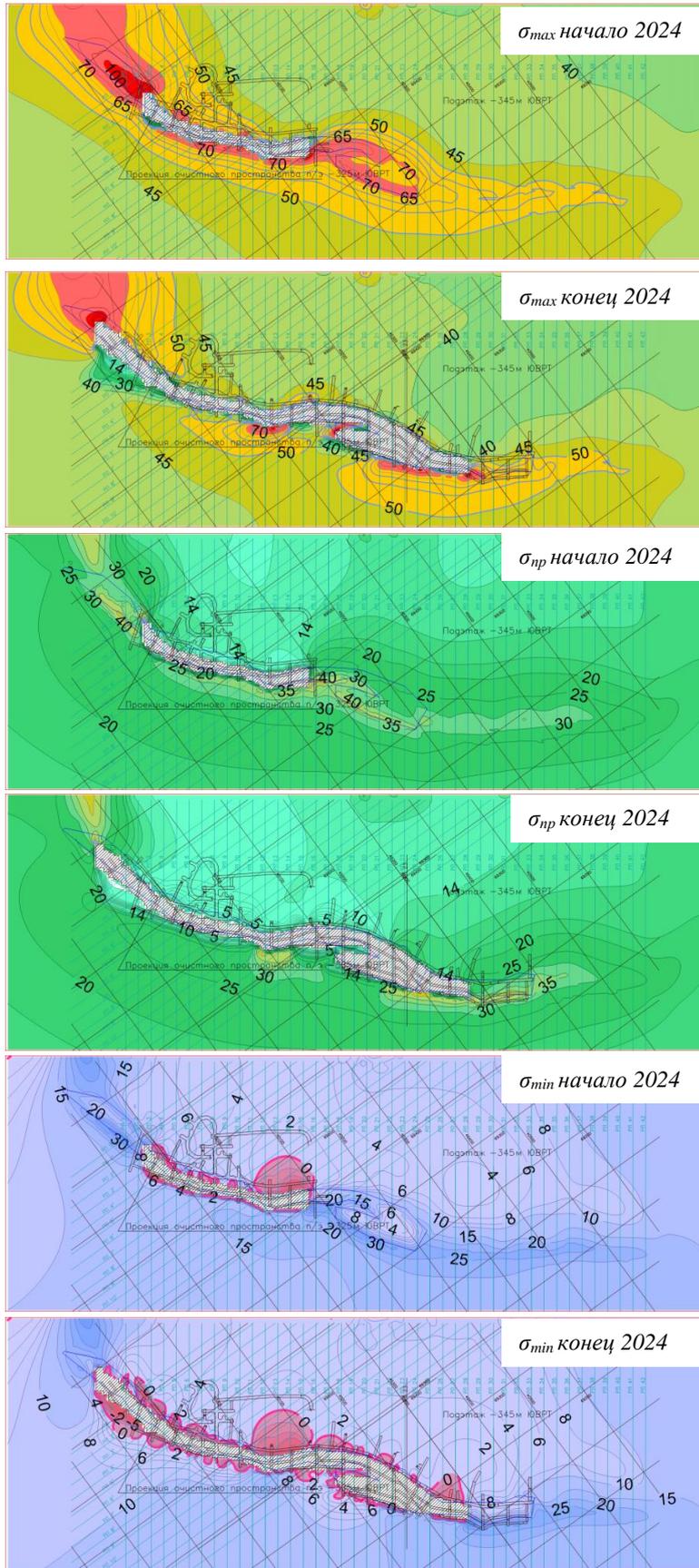
На подэтаже -365 м наиболее опасные геомеханические условия. Здесь очистные работы развиваются в зоне высоких напряжений под очистным пространством вышележащего горизонта. Кроме того, дополнительным концентратором сжимающих напряжений является формируемый между фронтами горных работ целик.

В целом результаты локального моделирования отражают закономерности распределения напряжений, полученные для Ждановского месторождения при мелкомасштабном моделировании, включающем все разрабатываемые рудные тела. Основные зоны концентрации максимальных сжимающих напряжений ( $\sigma_{max}$ ) приурочены к областям под дном очистного пространства и целикам: как безрудным, образованным по причинам избегания разубоживания (в разрезах  $\approx 17-20$ ); так и технологическим, связанным с порядком развития очистной выемки (в разрезах 11-14 п/э -365 м). На момент окончания 2024 года сжимающие напряжения в целике составляют порядка  $0,5 \cdot \sigma_{сж}$  (рисунок 4.11).



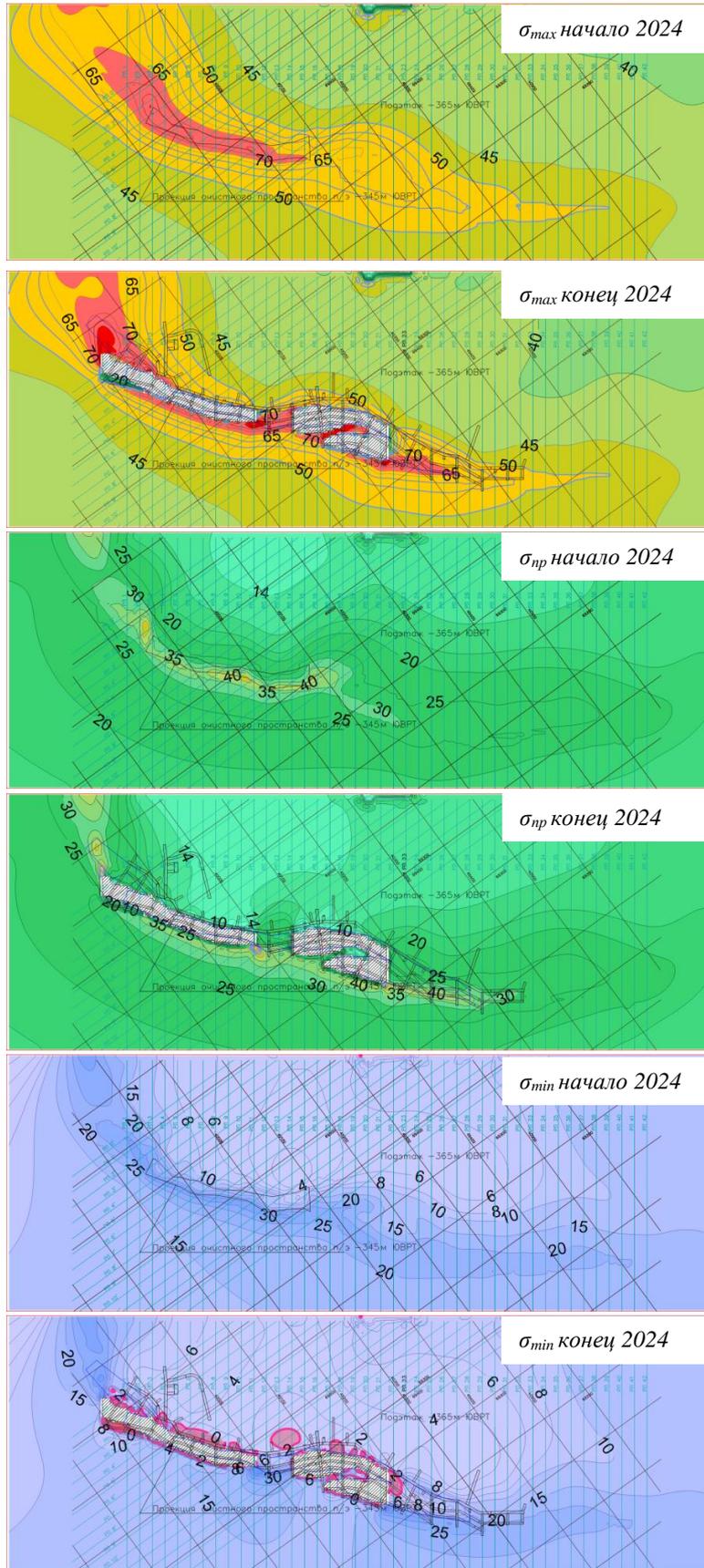
-325м

Рисунок 4.8 – Распределение главных компонент поля напряжений ( $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\text{пр}}$ ,  $\sigma_{\min}$ ) при продвижении очистных работ в течение одного календарного года (начало 2024 г. – конец 2024 г.) на гор. -325 м



-345М

Рисунок 4.9 – Распределение главных компонент поля напряжений ( $\sigma_{max}$ ,  $\sigma_{пр}$ ,  $\sigma_{min}$ ) при продвижении очистных работ в течение одного календарного года (начало 2024 г. – конец 2024 г.) на гор. -345 м



-365м

Рисунок 4.10 – Распределение главных компонент поля напряжений ( $\sigma_{max}$ ,  $\sigma_{пр}$ ,  $\sigma_{min}$ ) при продвижении очистных работ в течение одного календарного года (начало 2024 года – конец 2024 года) на гор. -365 м

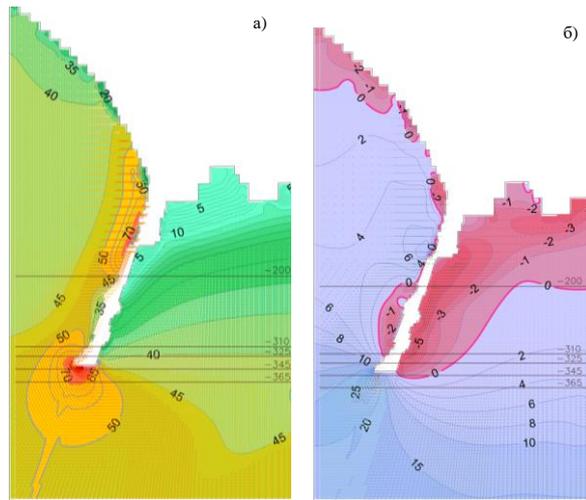


Рисунок 4.11 – Распределения  $\sigma_{max}$  (а) и  $\sigma_{min}$  (б) по разрезу 12 (вкрест целика между встречными фронтами очистных работ)

В пределах гор. -325м, п/э -345м, п/э -365м в разрезах  $\approx 17-20$  присутствует безрудный целик, в котором развиваются как высокие сжимающие ( $\sigma_{max}$ ), так и растягивающие ( $\sigma_{min}$ ) напряжения (рисунок 4.12). То есть, имеет место анизотропное поле напряжений, которое может способствовать прорастанию трещин отрыва и инициировать разрушения пород целика. В связи с этим требуется мониторинг состояния выработок, проходимых в непосредственной близости к данной зоне.

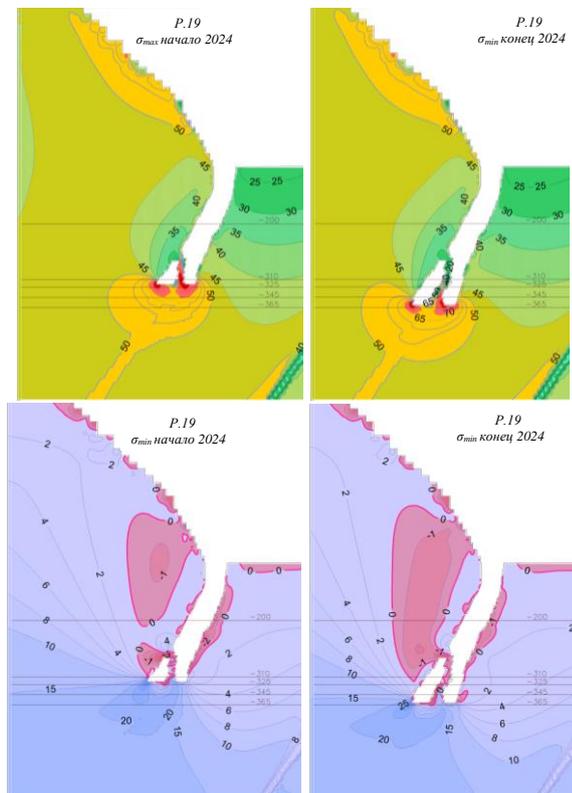


Рисунок 4.12 – Распределение  $\sigma_{max}$  и  $\sigma_{min}$  по разрезу 19 (вкрест безрудного целика)

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 состояния массива.

#### 4.1.2 Геомеханическая оценка вариантов опережений развития горных работ

Наиболее эффективным способом снижения геомеханических и геодинамических рисков при отработке запасов в высоконапряженных массивах является региональная (в пределах этажей и подэтажей) разгрузка областей активного ведения горных работ, как при определенном порядке ведения очистных работ, так и с помощью создания специальных защитных зон.

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 лежащему боку; 2) с опережением по висящему боку; 3) развитие горных работ фронтом, вытянутым вкрест простирания рудного тела без опережений. Результаты сравнены с фоновым полем напряжений до проведения отбойки (рисунок 4.13).



Рисунок 4.13 – Распределение  $\sigma_{max}$  при различных вариантах опережений  
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  $\sigma_{max}$  на 50% ниже, чем при развитии горных работ без опережений, и на 20%, чем при развитии с опережением по лежащему боку (рисунок 4.14).

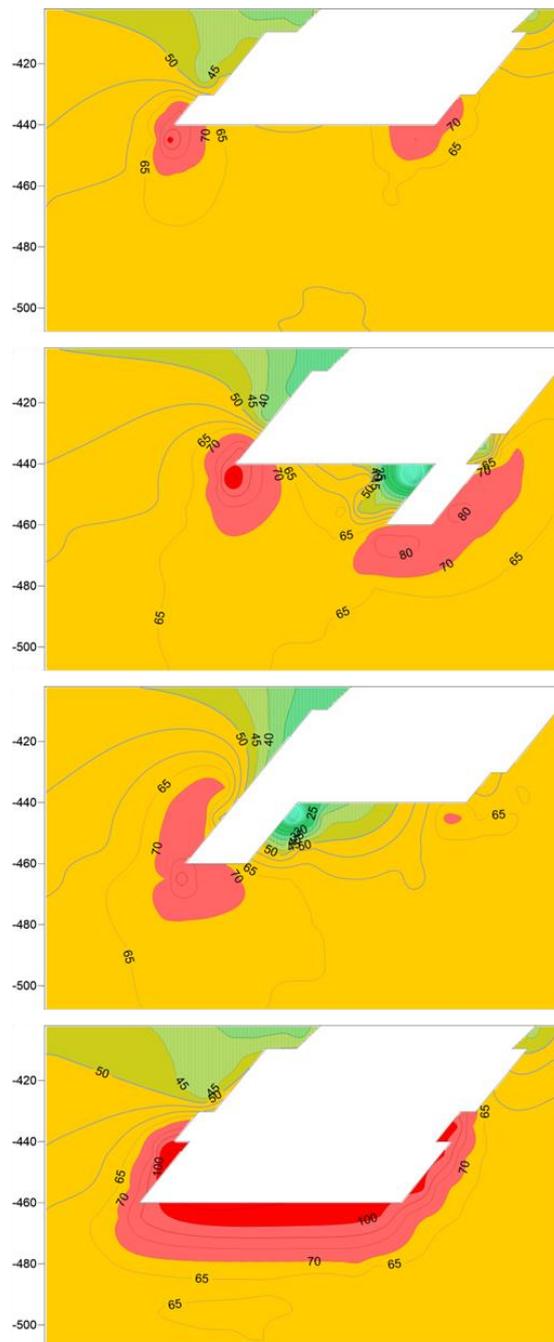


Рисунок 4.14 – Распределение  $\sigma_{max}$  при различных вариантах опережений по разрезу 15

Следует учитывать также тот факт, что при опережающем развитии по лежащему боку зона концентрации напряжений захватывает область нижнего контакта рудного тела, где располагается зона тектонического контакта, состоящая из раздробленных пород. Комбинация этих факторов повышает риск разрушения выработок лежачего бока и вероятность подвижек участков массива по данным структурам. Наиболее неблагоприятным является вариант с фронтом, вытянутым вкрест простирания рудного тела (без опережений).

#### 4.2 Оценка НДС в приконтурном массиве подземных горных выработок и верификация результатов моделирования с данными натурных исследований

Для верификации модели НДС проанализируем результаты расчетов параметров поля напряжений на горизонте -460 м ЦРТ, в пределах которого, на момент создания модели, активно велись горные работы. Необходимо отметить, что запасы вышележащего гор. -440 м отработаны. Для качественной оценки результатов моделирования рассмотрены особенности векторного поля максимальной сжимающей компоненты  $\sigma_{max}$ . Направление векторов  $\sigma_{max}$  в пределах гор. -460 м представлено на рисунке 4.15.

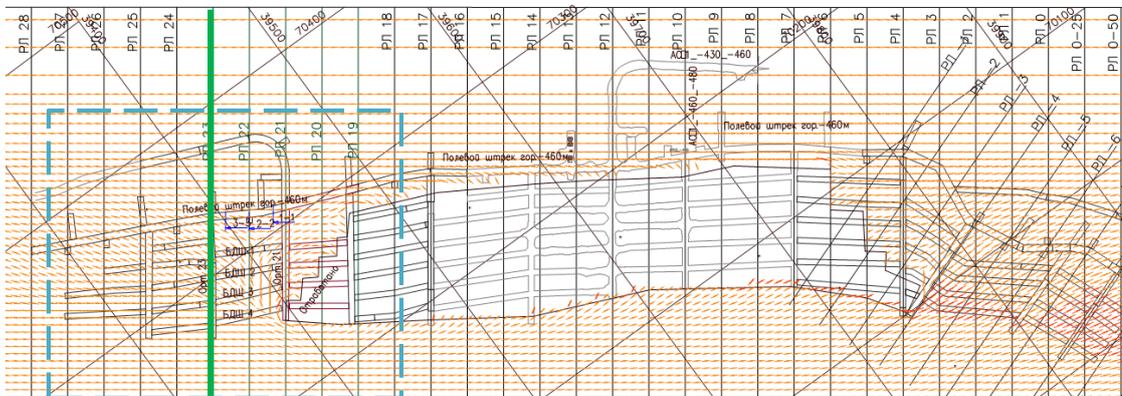


Рисунок 4.15 – Векторное распределение  $\sigma_{max}$  на горизонте -410 м

На удалении от очистной выемки вектора  $\sigma_{max}$  субгоризонтальны и направлены вдоль простирания рудного тела, то есть отражают закономерности распределения напряжений в нетронутом массиве. Для установления особенностей векторного распределения  $\sigma_{max}$  рассмотрим более подробно фрагмент поля напряжений вокруг очистного пространства в разрезах 17-27 (рисунок 4.16).

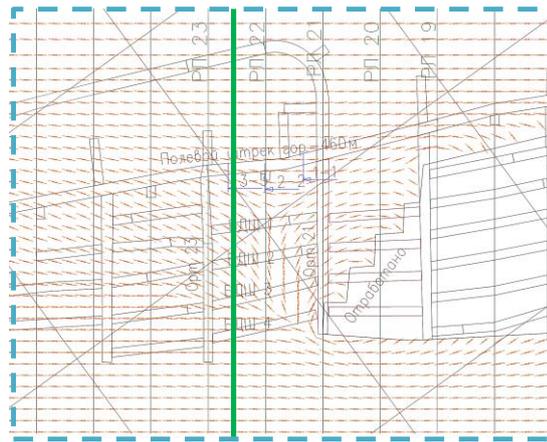


Рисунок 4.16 – Фрагмент гор. -410 м в разрезах 17-27 с векторным распределением  $\sigma_{max}$

Вблизи очистной выемки вектора  $\sigma_{max}$  переориентируются и огибают выработанное пространство, при этом в областях проведения выработок штрекового направления вектора становятся ориентированы таким образом, что максимальное сжатие действует вкрест оси выработок. Рассмотрим вертикальное сечение по разрезу 22 (рисунок 4.17). Как видно, вектора  $\sigma_{max}$  обтекают созданную выемку, причем в лежащем боку рудной залежи направление действия максимальных сжимающих напряжений субпараллельно контакту рудного тела. Полученная переориентация векторов  $\sigma_{max}$  согласуется с основными результатами визуального обследования состояния горных выработок: наибольшим разрушениям подвергаются выработки штрекового направления.

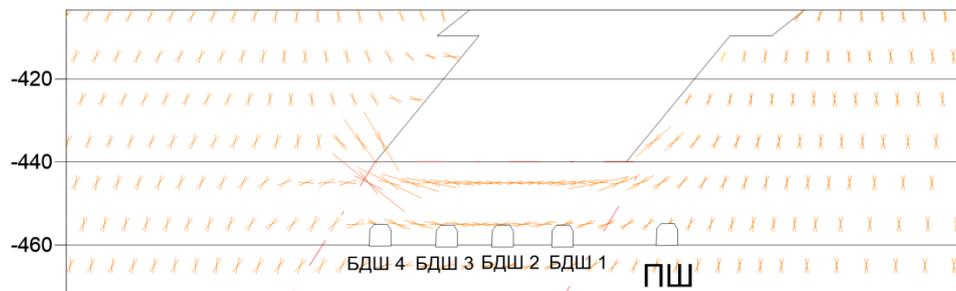


Рисунок 4.17 – Векторное распределение  $\sigma_{max}$  вблизи очистной выемки в сечении вкрест простираения рудного тела по разрезу 22

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. Программный комплекс *Sigma GT* дает возможность проведения

уточненных расчетов НДС в локальных подобластях мелкомасштабной модели с учетом поля напряжений для любого расчетного варианта. На рисунке 4.18 показан пример сетки типового поперечного сечения, принятой для полевых штреков.

Рассмотрен типовой участок массива пород перспективной отработки запасов блока, включающий подготовительные и нарезные выработки в разрезах 21-23 гор. -460 м: ПШ, БДШ № 1-4 и орт 23. На рисунке 4.19 исследуемые выработки обозначены красным цветом. Запасы гор. -460 м отработаны ступенчато с опережением от висячего бока до разреза 21, запасы вышележащего гор. -440 м отработаны полностью.

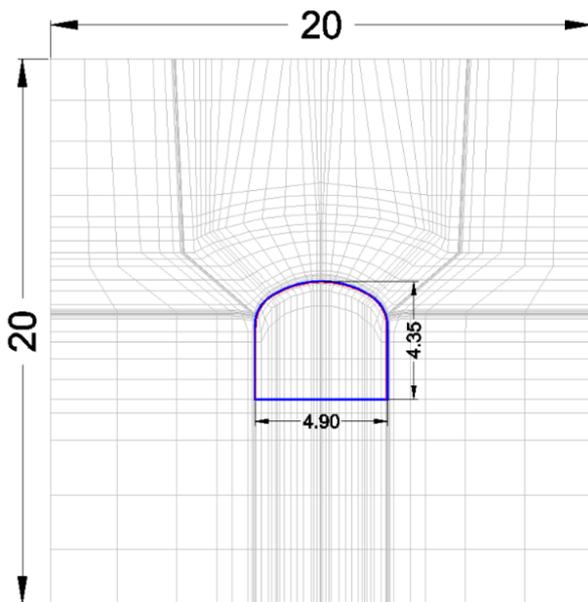


Рисунок 4.18 – Сетка конечных элементов для поперечного сечения полевых штреков

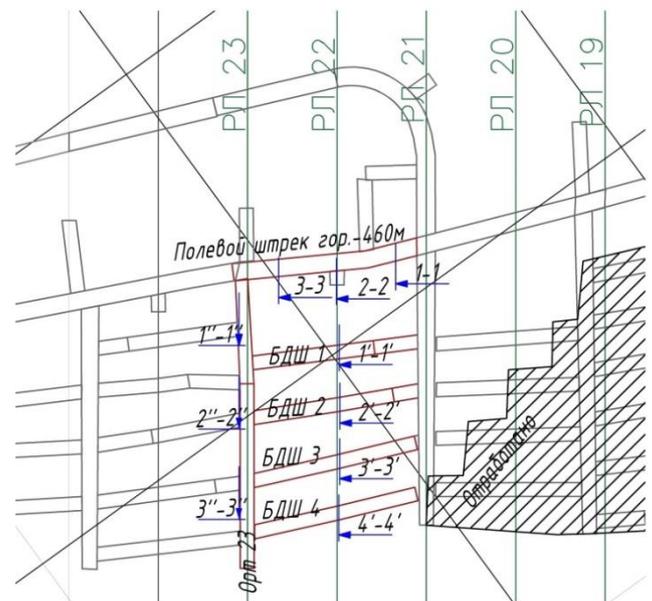


Рисунок 4.19 – Схема участка массива гор. -460 м с моделируемыми выработками

Полевой штрек в разрезах 21-23 гор. -460 м находится под влиянием пригрузки от вышележащего очистного пространства (гор. -440 м). Для оценки влияния очистной выемки на распределение  $\sigma_{max}$  рассмотрены сечения вкрест оси выработки: (1-1), (2-2) и (3-3) (рисунок 4.20).

Результаты моделирования НДС приконтурного массива ПШ в разрезах 21-23 гор. -460 м представлены на рисунке 4.20. Аналогичным образом промоделирована ситуация для приконтурного массива орта 23 (рисунок 4.21). На рисунке 4.21 распределение  $\sigma_{max}$  представлено по сечениям в последовательности от лежащего к висячему боку ЦРТ: (1''-1''), (2''-2'') и (3''-3''). Для буродоставочных штреков БДШ 1-4 в разрезах 21-23 результаты моделирования  $\sigma_{max}$  представлены на рисунке 4.22 в сечениях, соответствующих разрезу 22: (1'-1'), (2'-2'), (3'-3'), (4'-4'). Для оценки изменения  $\sigma_{max}$  поля напряжений вокруг выработок исследуемого участка рассматривали два этапа: до проведения выработки и после.

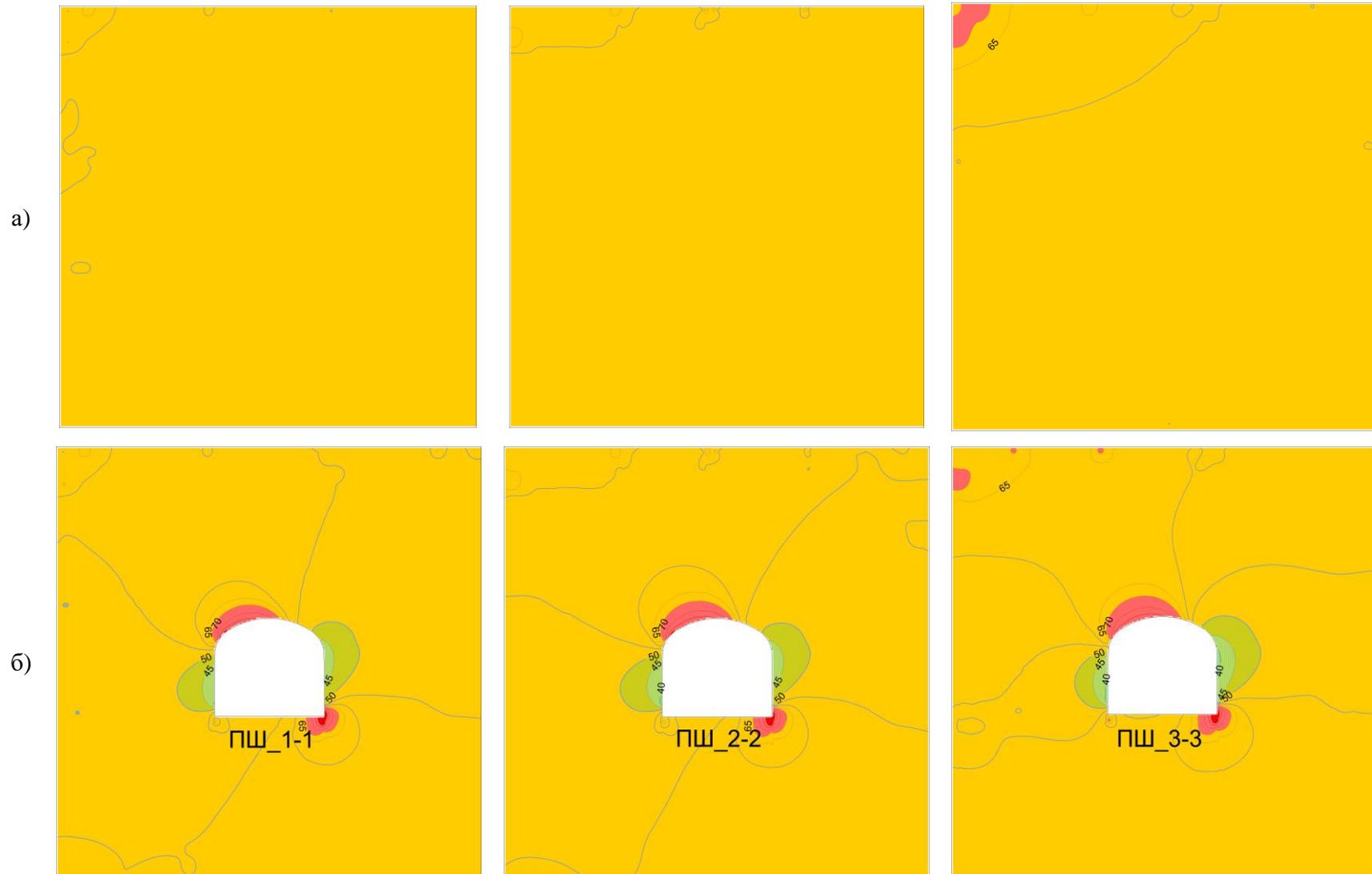


Рисунок 4.20 – Распределение  $\sigma_{max}$  в приконтурном массиве полевого штрека в разрезах 21-23 гор. -460 м:

а) до проведения выработки; б) после проведения выработки

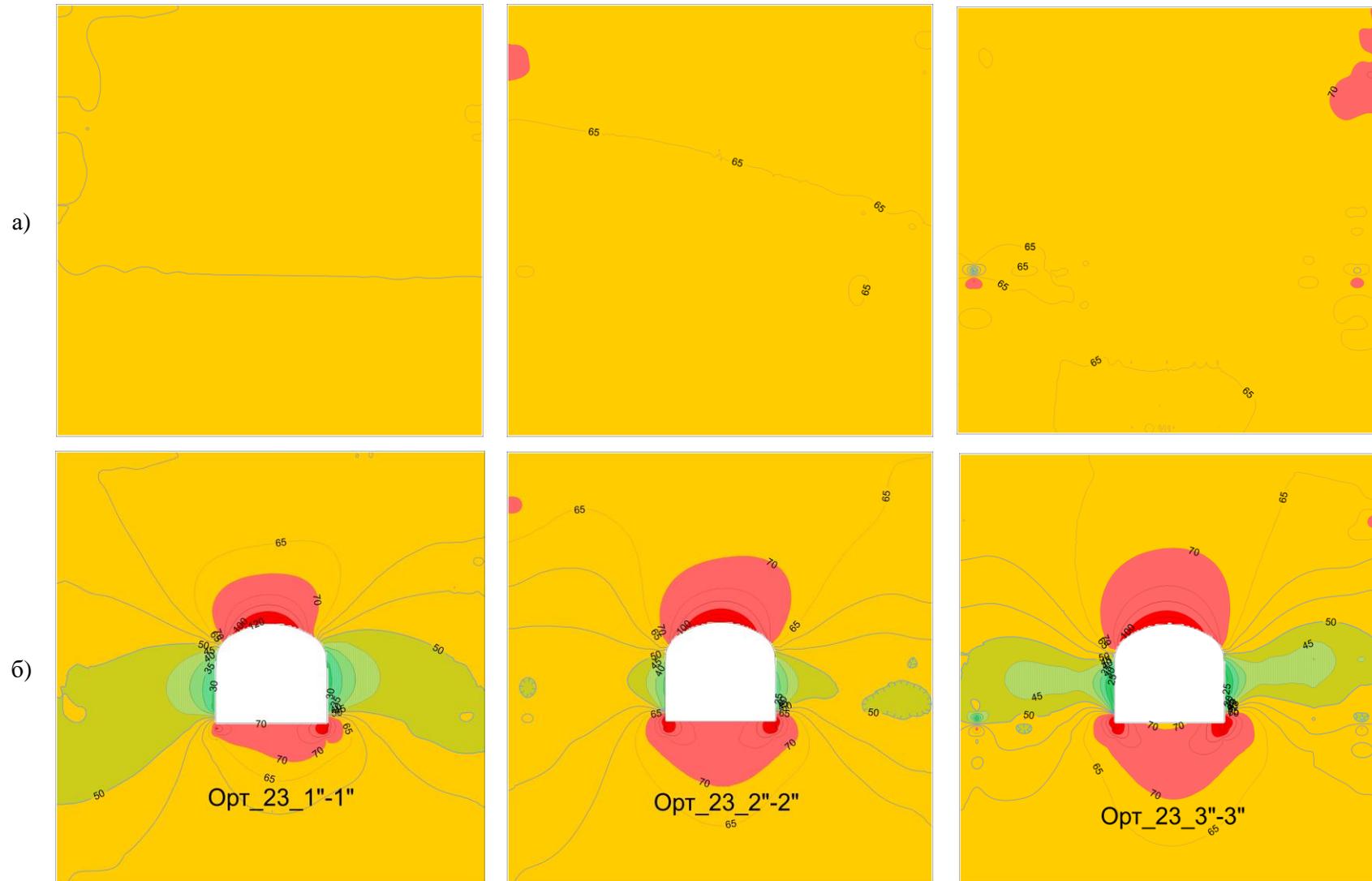


Рисунок 4.21 – Распределение  $\sigma_{max}$  в приконтурном массиве орта 23 гор. -460 м в последовательности от лежачего к висячему боку ЦРТ:

а) до проведения выработки; б) после проведения выработки

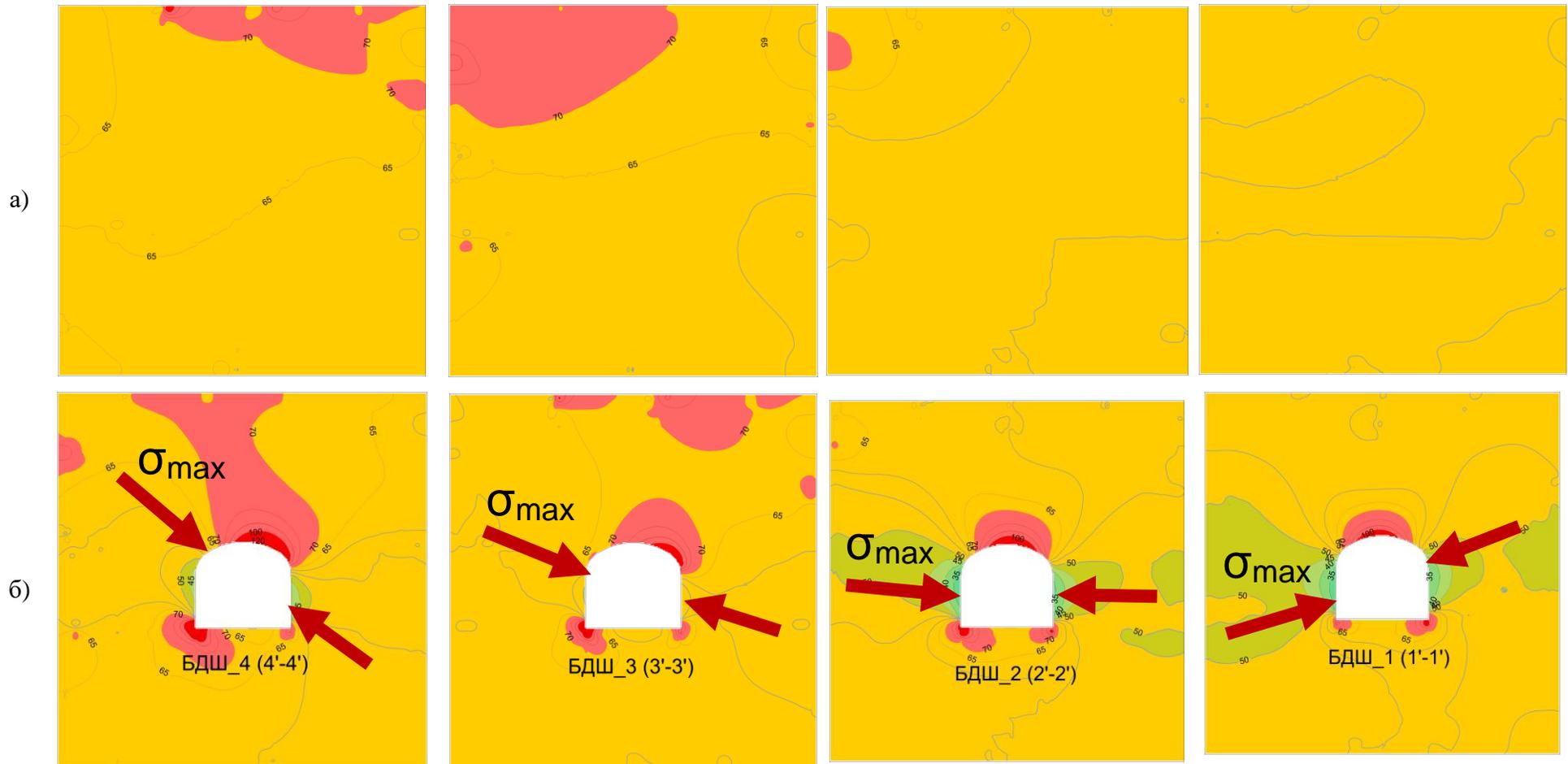


Рисунок 4.22 – Распределение и направление действия  $\sigma_{max}$  в приконтурном массиве БДШ 1-4 гор. -460 м в направлении от лежачего к висячему боку ЦРТ: а) до проведения выработки; б) после проведения выработки

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  $\sigma_{max}$  (рисунок 4.23), что подтверждает адекватность полученных результатов моделирования при сравнении с фактическим состоянием массива пород месторождения.

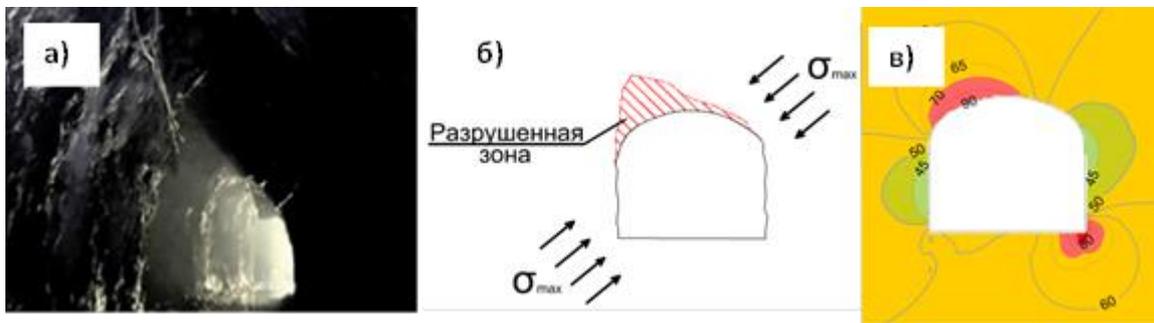


Рисунок 4.23 – Местоположение зон разрушения приконтурного массива полевого штрека ЦРТ: а) фото типичной формы разрушения ПШ ЦРТ; б) схема разрушения ПШ по результатам визуального обследования; в) распределение  $\sigma_{max}$  по результатам локального моделирования

При сравнении результатов моделирования с данными натуральных исследований приконтурной зоны ПШ методом ультразвукового каротажа (УЗК), выполненного на участке массива, схожего по условиям (подраздел 3.1.3 данной работы), можно заключить, что глубина нарушенной зоны, определенная по обоим методам, составляет до 1 м.

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 лежащего к висящему 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. В результате натуральных исследований методом УЗК определено, что глубина нарушенной зоны в выработках ортового направления составляет 1,7 м.

В массиве пород, в котором пройдены буродоставочные штреки 1-4 по разрезу 22 гор. -460 м, ориентация максимального сжатия изменяется: вектора  $\sigma_{max}$  разворачиваются, огибая вышележащее очистное пространство (рисунок 4.24). Зоны концентрации максимального сжатия приурочены к областям кровли и сопряжений кровли с боками выработок. Значения  $\sigma_{max}$  в этих

зонах близки к пределу прочности при сжатии в образцах, соответственно, возможны проявления разрушений приконтурной части выработок в динамической форме.

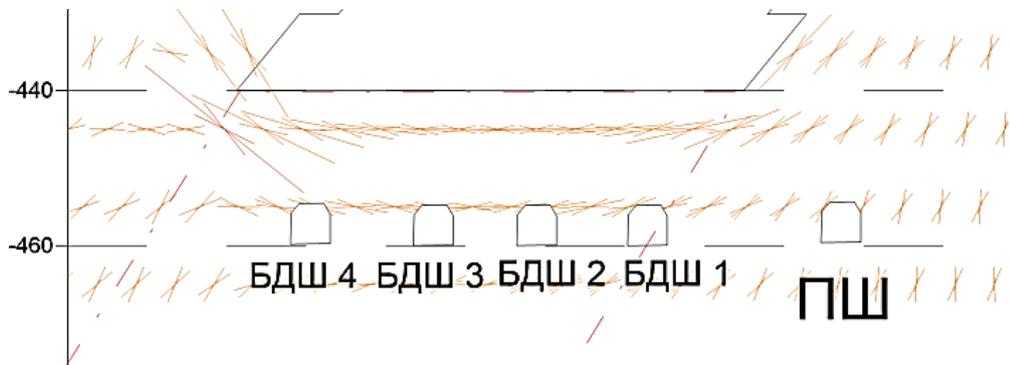


Рисунок 4.24 – Векторное распределение  $\sigma_{max}$  вокруг очистного пространства гор.-440 м по разрезу 22 (сечение вкрест простирания рудного тела)

В результате оценки закономерностей распределения напряжений в массиве пород Ждановского месторождения на основе численного геомеханического моделирования можно заключить, 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.** Для снижения геодинамических рисков необходимо соблюдение безопасной последовательности выемки запасов с исключением способа отработки из нескольких разрезов сближающимися фронтами в пределах подэтажа. Необходимо применение комплекса мероприятий, включающих разгрузку массива от избыточных напряжений с учетом создания определенной конфигурации опережений очистной выемки, кроме того, для контроля напряженно-деформированного состояния массива пород необходимо проведение мониторинга с использованием инструментальных методов.

#### Выводы по Главе 4

1. Разработан комплекс разномасштабных численных геомеханических 3D моделей НДС Ждановского месторождения: мелкомасштабная модель учитывает геологические и технологические характеристики, а также параметры НДС в масштабе Ждановского месторождения; крупномасштабные модели отражают уточненные литологические особенности и параметры НДС в пределах отдельных участков месторождения. Локальные модели отражают характеристики НДС в приконтурном массиве пород подземных выработок.

2. Обоснованы наиболее безопасный и рациональный порядок отработки запасов рудных тел в пределах подэтажа, а также конфигурация опережений очистной выемки в масштабах блока (блоков).

3. Установлены особенности распределения НДС в приконтурных массивах подземных выработок.

4. Результаты моделирования согласуются с данными натурных измерений и результатами визуального обследования горных 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.

На основании анализа результатов численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива, сформулировано **третье научное положение: 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.**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород Ждановского месторождения в процессе ведения горных работ. На основании комплексных данных, полученных по результатам лабораторных испытаний основных породных разностей Ждановского месторождения и натурных исследований параметров напряженного состояния массива пород, была создана численная геомеханическая конечно-элементная модель в программном комплексе Sigma GT. Параметры природного поля напряжений определены при реконструкции НДС массива пород с использованием численного моделирования.

В результате анализа результатов исследования физико-механических свойств руд и вмещающих пород Ждановского месторождения определено, что они все относятся к прочным скальным горным породам, способны к накоплению упругой энергии и разрушению в динамической форме, то есть являются потенциально склонными к горным ударам. В натурных условиях для оценки качества геологической среды было выполнено геомеханическое картирование поверхностей подземных горных выработок, а также проанализированы результаты геотехнического описания керна скважин. Определены рейтинговые показатели качества массива и рассчитаны коэффициенты структурного ослабления для основных породных разностей Ждановского месторождения, которые изменяются от 0,3 до 0,4.

Исследования НДС массива горных пород Ждановского месторождения натурными методами, включающими визуальное обследование состояния выработок, ультразвуковое исследование, а также измерения с применением метода полной разгрузки показали, что тип напряженного состояния является гравитационно-тектоническим с преобладанием тектонической составляющей, при этом полученные параметры описывали техногенно измененное поле напряжений со следующими соотношениями главных компонент тензора напряжений  $\sigma_{max} : \sigma_{np} : \sigma_{min} = 1 : 0,3 : 0,1$ . Для определения параметров природного поля напряжений выполнена реконструкция напряженного состояния массива пород Ждановского месторождения с использованием метода численного моделирования. Определены соотношения главных компонент тензора напряжений, действующих в нетронутым массиве пород:  $\sigma_{max(T_1)} : \sigma_{np(\gamma H)} : \sigma_{min(T_2)} = 1 : 0,5 : 0,4$ .

Для прогнозной оценки изменения значений главных компонент природного поля напряжений массива пород Ждановского месторождения с глубиной получены зависимости в двух вариантах:

1) с линейной аппроксимацией на глубину:  $\sigma_{max} = 0,05z + 6,5$  , МПа;  
 $\sigma_{min} = 0,02z + 2,5$  , МПа;

2) нелинейной аппроксимацией с учетом замедления роста тектонических компонент напряжений:

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

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

На основании анализа результатов численного моделирования напряженного состояния массива пород Ждановского месторождения в процессе ведения горных работ определено, что значения максимальной компоненты напряжений в некоторых областях достигают уровня критических для реализации динамического разрушения. При этом, при натурных исследованиях определено, что разрушения участков массива пород месторождения в динамической форме на глубинах от 500 м может происходить в формируемых между фронтами работ целиках и в зонах опирания толщи пород. Углубление фронта очистных работ происходит быстрыми темпами, что осложняет геомеханическую ситуацию и увеличивает вероятность возникновения разрушения. С глубины 700 м динамические разрушения возможны в окрестности очистных пространств без какой-либо локализации. Таким образом, с учетом склонности пород и руд Ждановского месторождения к динамическому разрушению, при достижении критических значений напряжений на глубинах ниже 700 м возможно создание условий для реализации потенциальной удароопасности.

Для снижения потенциальных геодинамических рисков обоснованы наиболее безопасный и рациональный порядок отработки запасов рудных тел в пределах подэтажа, а также способ разгрузки массива пород, основанный на анализе закономерностей распределения напряжений при различной конфигурации опережений очистной выемки в масштабах добычного блока.

Полученные в работе результаты исследования параметров напряженно-деформированного состояния массива пород Ждановского месторождения могут быть использованы при прогнозе развития зон критических состояний массива и разработке мероприятий по минимизации потенциальных разрушений в динамической форме на глубинах свыше 700 м от дневной поверхности (Приложения А, Б, Г, Д, Е). Выявленные закономерности распределений напряжений с глубиной могут быть учтены как при эксплуатации исследуемого месторождения, так и для месторождений, схожих по геологическим и горнотехническим условиям.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

- 1 Александров, А.В. Основы теории упругости и пластичности / А.В. Александров, В.Д. Потапов. - М.: Высш. шк., 1990. - 398 с.
- 2 Амусин, Б.З. Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики / Б.З. Амусин, А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1975. – 144 с.
- 3 АО «Кольская ГМК». Рудник «Северный-Глубокий». Вскрытие и отработка запасов руды до горизонта -440 м. Увеличение производительности по добыче руды до 6 млн т в год. Восполнение выбывающих мощностей. ООО «Институт Гипроникель». – 2016. – Т. 5.7.1.1. – 99 с.
- 4 Баклашов, И.В. Геомеханика: учебник для вузов. В 2 т. / И.В. Баклашов // Том 1. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2004. – 208 с.
- 5 Баклашов, И.В. Геомеханика: учебник для вузов. В 2 т. / И.В. Баклашов // Том 2. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2004. – 249 с.
- 6 Баклашов, И.В. Деформирование и разрушение породных массивов / И.В. Баклашов. – Москва: Недра, 1988. – 270 с.
- 7 Баклашов, И.В. Механика горных пород / И.В. Баклашов, Б.А. Картозия. – М.: Недра, 1975. – 272 с.
- 8 Бениявски, З. Управление горным давлением / З. Бениявски. – М.: Мир, 1990. 254 с.
- 9 Бирючев, И.В. Геомеханическая модель рудника. Часть 2. Использование / И.В. Бирючев, А.Б. Макаров, А.А. Усов // Горный журнал. – 2020. – № 2. – С. 35-44.
- 10 Борщевский, С.В. Моделирование физических процессов в горном производстве: Учебное пособие. / С.В. Борщевский, С.А. Калякин, К.Н. Лабинский и др.; ГОУ ВПО «ДонНТУ». - Донецк: ГОУ ВПО «ДонНТУ», 2016.
- 11 Борщ-Компониец, В.И. Практическая механика горных пород: Практическое пособие / Борщ-Компониец В.И. - Москва: Горная книга, 2013. - 322 с.
- 12 Булычев, Н.С. Механика подземных сооружений / Н.С. Булычев. – М.: Недра, 1994. 382 с.
- 13 Виноградов, А.Н. Формирование системы сейсмологического и инфразвукового мониторинга в западной Арктике в XX веке и перспективы ее дальнейшего развития / Ю.А. Виноградов, Е.О. Кременецкая, С.И. Петров // Вестник КНИЦ РАН. -2012. -№ 4.
- 14 Волков, В.Н. История и перспективы развития минерально-сырьевого комплекса ОАО «Кольская ГМК» / В.Н. Волков, В.И. Макеев // Цветная металлургия. 2013. – №10(850). – С. 27-32.

15 Выявление склонности пород рудника «Северный» (месторождения Ждановское и Заполярное) АО «Кольская ГМК» к горным ударам и геодинамическим проявлениям. Заключительный отчет. – ФГБУН ГоИ КНЦ РАН, 2016 г.

16 Гапеева, В.Д. Отсевание грубых погрешностей результатов измерений с помощью различных критериев в среде Excel / В.Д. Гапеева, В.А. Цыбенко // Молодой ученый. — 2021. — № 49 (391). — С. 20-27.

17 Горбацевич, Ф.Ф. Структура, свойства, состояние пород и геодинамика в геопространстве Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3) / Ф.Ф. Горбацевич, В.Р. Ветрин, Ю.П. Смирнов, и др. под ред. Ф.Ф. Горбацевич. - Геологический ин-т Кольского научного центра РАН. - Санкт-Петербург: Наука, 2015. – 365 с.

18 Горбунов, Г.И. Медно-никелевые месторождения Балтийского щита / Г.И. Горбунов, В.Г. Загородный, В.И. Робонен и др. – Л.: Наука, 1985. – 329 с.

19 Горбунов, Г.И. Структуры медно-никелевых рудных полей и месторождений Кольского полуострова. / Ю.А. Астафьев, И.С. Бартенев, Ю.В. Гончаров, Ю.Н. Яковлев. — Л.: Наука, 1978. — 160 с.

20 Горбунов, Г.И. Медно-никелевые месторождения Печенги / Г.И. Горбунов, Ю.А. Астафьев, Ю.В. Гончаров и др. — М.: ГЕОС, 1999. — 236 с.

21 ГОСТ 21153.2-84 Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии.

22 ГОСТ 21153.3-85 Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении.

23 ГОСТ 21153.8-88 Породы горные. Метод определения предела прочности при объемном сжатии.

24 ГОСТ 28985-91 Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии.

25 Гржибовский, А.М. Сравнение количественных данных двух независимых выборок с использованием программного обеспечения Statistica и SPSS: параметрические и непараметрические критерии / А.М. Гржибовский, С.В. Иванов, М.А. Горбатова // Наука и Здравоохранение. - 2016. -№2. - С. 5-28.

26 Еременко, В.А. Оценка состояния массива горных пород на рудниках ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель» / В.А. Еременко, И.И. Айнбиндер, П.Г. Пацкевич, Е.А. Бабкин // ГИАБ. - 2017. - № 1. - С. 5–17.

27 Еременко, В.А. Геомеханическая оценка состояния массива при ведении горных работ на Ждановском месторождении подземным способом / В.А. Еременко, А.А. Еременко, Е.В. Потапов, Д.А. Павлов, В.В. Атанов, С.В. Временков // ГИАБ. - 2010. – № 11. – С. 271–282.

28 Еременко, В.А. Исследование физико-механических свойств и динамических характеристик горных пород на Ждановском месторождении / В.А. Еременко, В.М. Жигалкин, Е.В. Потапов, В.В. Атанов // ГИАБ. - 2011. – № 4. – С. 133–140.

29 Жабко, А.В. Критерии прочности горных пород / А.В. Жабко // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 11-1. — С. 27—45.

30 Земцовский, А.В. Исследование физических свойств и характера разрушения горных пород Ждановского месторождения (АО «Кольская ГМК») в условиях одноосного и трехосного сжатия / А.В. Земцовский, Н.Н. Кузнецов, А.К. Пак // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2019. – Т. 6. – № 1. – С. 117–122.

31 Зенько, Д.К. Основные факторы, влияющие на устойчивость массивов в критериях Бенявского (RMR) и Бартонна (Q) / Д.К. Зенько, А.Р. Узбекова // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2004. - № 6. - С. 273–275.

32 Зубков, А.В. Геомеханика и геотехнология / А.В. Зубков. - Рос. акад. наук, Урал. отделение, Ин-т горного дела. - Екатеринбург: ИГД, 2001. – 333 с.

33 Инструкция по работе с приложением «SigmaGT». – ФГБУН ГИИ КНЦ РАН, 2018 г.

34 Исследование напряженно-деформированного состояния массива пород месторождений, разрабатываемых рудником «Северный» (Месторождение Ждановское и Заполярное) АО «Кольская ГМК». Отчет о научно-исследовательской работе. – ФГБУН ГИИ КНЦ РАН, 2018 г.

35 Исследование физико-механических свойств пород и руд Ждановского месторождения в интервале вскрытия -430/-730м. Отчет об оказании услуг. – ФГБУН ГИИ КНЦ РАН, 2021 г.

36 Исследования напряженно-деформированного состояния массива горных пород и геомеханическое сопровождение горных работ на руднике «Северный» АО «Кольская ГМК». Отчет о научно-исследовательской работе. – ФГБУН ГИИ КНЦ РАН, 2020 г.

37 Казанский, В.И. Глубинное строение и геодинамика Печенгского рудного района: опыт исследования Кольской сверхглубокой скважины / В.И. Казанский, О.Л. Кузнецов, А.В. Кузнецов и др. Геология руд. месторождений. — 1994. — Т. 36. - № 6. — С. 500—519.

38 Каспарьян, Э.В. Геомеханика: учебное пособие: в 2 частях / Э.В. Каспарьян, А.А. Козырев, М.А. Иофис [и др.]. — Мурманск: МГТУ. - 2016 — Часть 1: Геомеханика — 2016. — 172 с.

39 Каспарьян, Э.В. Геомеханика: учебное пособие: в 2 частях / Э.В. Каспарьян, А.А. Козырев, М.А. Иофис [и др.]. — Мурманск: МГТУ. - 2016 — Часть 2: Геомеханика — 2016. — 320 с.

40 Козловский, Е.А. Кольская сверхглубокая. Исследование глубинного строения континентальной коры с помощью бурения сверхглубокой скважины / Под ред. Е.А. Козловского. — М.: Недра, 1984. — 490 с.

41 Козырев, А.А. Геомеханическое обоснование ведения горных работ на удароопасных рудных месторождениях / А.А. Козырев // Горная промышленность. - 2023; №5. С. 4–13.

42 Козырев, А.А. О критериях удароопасности горных пород / А.А. Козырев, Н.Н. Кузнецов, А.Б. Макаров // Горная промышленность. – 2023; №51. С. 61–68.

43 Козырев, А.А. Оценка удароопасности скальных горных пород Ждановского месторождения (Кольский полуостров) / А.А. Козырев, Н.Н. Кузнецов, А.Н. Шоков // Горная промышленность. – 2022; №6. С. 75–82.

44 Козырев, А.А. Геомеханическое и горнотехнологическое моделирование как средство повышения безопасности отработки месторождений твердых полезных ископаемых / А.А. Козырев, С.В. Лукичев, О.В. Наговицын, И.Э. Семенова // ГИАБ. - 2015. - № 4. - С. 73-83.

45 Козырев, А.А. Геомеханические исследования и обоснования при ведении горных работ на Кольском полуострове / А.А. Козырев, В.И. Панин, С.Н. Савченко. - Формирование основ современной стратегии природопользования в Евро-Арктическом регионе: сб. науч. тр. — Апатиты: КНЦ РАН, 2005 — С. 122—131.

46 Козырев, А.А. Управление геодинамическими рисками на Хибинских апатитовых рудниках / А.А. Козырев, В.И. Панин, И.Э. Семенова // ГИАБ. - 2010. - № 12. - С. 347-359.

47 Козырев, А.А. Закономерности распределения тектонических напряжений в верхней части земной коры / А.А. Козырев, Савченко С.Н. // Физика земли. – 2009. – № 11. – С. 34–43.

48 Козырев, А.А. Геомеханические процессы в геологической среде горнотехнических систем и управление геодинамическими рисками / А.А. Козырев, С.Н. Савченко, В.И. Панин, И.Э. Семенова, В.В. Рыбин, Ю.В. Федотова, С.А. Козырев – Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН. – 2019. - 470 с.

49 Козырев, А.А. Управление горным давлением в тектонически напряженных массивах: в 2 ч. / А.А. Козырев и др. – Апатиты. - 1996. - Ч. 1. - 159 с.; Ч. 2. - 162 с.

50 Козырев, А.А. Геомеханические исследования и обоснования при ведении горных работ на Кольском полуострове / А.А. Козырев, В.И. Панин, С.Н. Савченко. - Формирование основ современной стратегии природопользования в Евро-Арктическом регионе: сб. науч. тр. — Апатиты: КНЦ РАН, 2005. – С. 122–131.

51 Козырев, А.А. Геомеханическое обеспечение горных работ при отработке удароопасных месторождений в тектонически напряженных массивах / А.А. Козырев. -

Геомеханика при ведении горных работ в высоконапряженных массивах: сб. науч. тр. – Апатиты, 1998. – С. 11–25.

52 Козырев, А.А. Геомеханическое обеспечение технических решений при ведении горных работ в высоконапряженных массивах / А.А. Козырев, В.И. Панин, И.Э. Семенова, Ю.В. Федотова, В.В. Рыбин // ФТПРПИ. – 2012. – №2. – С. 46–55.

53 Козырев, А.А. Определение степени удароопасности скальных горных пород по результатам испытаний при одноосном сжатии / А.А. Козырев, Н.Н. Кузнецов, Ю.В. Федотова, А.Н. Шоков // Известия вузов. Горный журнал. – 2019. – № 6. – С. 41–50.

54 Козырев, А.А. Оценка степени удароопасности скальных горных пород на основе результатов лабораторных испытаний / А.А. Козырев, Э.В. Каспарьян, Ю.В. Федотова, Н.Н. Кузнецов // Вестник МГТУ. – 2019. – Т. 22. – № 1. – С. 138–148.

55 Козырев, А.А. Прогноз горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений на Хибинских апатитовых рудниках / А.А. Козырев, В.И. Панин, В.А. Мальцев, М.В. Аккуратов // Геомеханика при ведении горных работ в высоконапряженных массивах. – Апатиты, 1998. – С. 73–82.

56 Козырев, А.А. Разработка методических принципов диагностики тектонических напряжений в верхней части земной коры с целью управления динамическими проявлениями горного давления / А.А. Козырев, С.Н. Савченко, В.А. Мальцев. – Апатиты, 1994. – 66 с.

57 Козырев, А.А. Региональная разгрузка горизонта для предотвращения горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений / А.А. Козырев, Ю.В. Демидов, А.Н. Енютин, В.А. Мальцев, И.Э. Семенова, В.С. Свинин. - Техногенная сейсмичность при горных работах: модели очагов, прогноз, профилактика. Часть 2. – Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2004. – С. 149–155.

58 Козырев, А.А. Современные результаты экспериментального изучения природных напряжений в верхней части земной коры и проблемы горного давления / А.А. Козырев. - Геомеханика в горном деле: Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием посвященной памяти профессора, доктора технических наук Николая Петровича Влоха, Екатеринбург, 04–05 июня 2014 года. – Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2014. – С. 39-53.

59 Козырев, А.А., Развитие инструментального и методического обеспечения контроля наведенной сейсмичности на Хибинских апатит-нефелиновых месторождениях / А.А. Козырев, В.С. Онуприенко, С.А. Жукова, О.Г. Журавлева // Горный журнал. – 2020. – № 9. – С. 19-26.

60 Козырев, А.А. Гипотеза происхождения сильного сейсмического события на Расвумчоррском руднике 09.01.2018г. / А.А. Козырев, И.Э. Семенова, О.Г. Журавлева, А.В. Пантелеев // ГИАБ. - 2018. - № 12. - С. 74–83.

61 Козырев, А.А. Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (Хибинские апатит-нефелиновые месторождения) / А.А. Козырев, И.Э. Семенова, В.В. Рыбин, В.И. Панин и др. — Апатиты: ГоИ КНЦ РАН, АО «Апатит», 2016. — 112 с.

62 Козырев, А.А. Трехмерное моделирование геомеханического состояния массива горных пород как основа прогноза удароопасности на рудниках ОАО «Апатит» / А.А. Козырев, И.Э. Семенова, А.А. Шестов. - Геодинамика и напряжённое состояние недр Земли: сб. научн. тр. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2008. – С. 272-278.

63 Козырев, А.А. Опыт применения САЕ Fidesys при разработке численных геомеханических моделей Ждановского месторождения / А.А. Козырев, А.В. Земцовский, **М.С. Кулькова**, М.А. Соннов // Горная промышленность. – 2021. - (6):94–98. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-6-94-98.

64 Козырев, А.А. Сильнейшее техногенное землетрясение на руднике «Умбозеро»: горнотехнические аспекты / А.А. Козырев, А.В. Ловчиков, С.И. Пернацкий, В.А. Шершеневич // Горный журнал – 2022. - № 1. - С. 43-49.

65 Козырев, А.А. Об оценке удароопасности массива горных пород Ждановского месторождения / А.А. Козырев, И.Э. Семенова, А.В. Земцовский А.В. - Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН, 2017. - № 14. - С. 300-303.

66 Коптев, А.И. Напряженное состояние литосферы Земли: результаты статистической обработки данных мировой карты напряжений / А.И. Коптев // Вестник Московского университета. Сер. 4, Геология. - 2013. - № 1. - С. 19- 27.

67 Кузенков, М.В. Анализ применяемых систем разработки при отработке месторождений Ждановское и Заполярное / М.В. Кузенков. - Сборник научных трудов конференции «Геодинамика и современные технологии отработки удароопасных месторождений», 2012. - С. 120-124.

68 Кузнецов, Н.Н. К вопросу об определении количества опытов, надежности и точности результатов при изучении физико-механических свойств горных пород / Н.Н. Кузнецов // Вестник Мурманского государственного технического университета. - 2015. - Т. 18. - № 2. - С. 183-191.

69 **Кулькова, М.С.** Применение аналитического и численного методов исследования для определения оптимальных параметров камер и целиков при отработке Ждановского месторождения / М.С. Кулькова // Вестник Кольского научного центра РАН, 1/2019 (11). - С. 42-49. DOI: 10.25702/ksc.2307-5228.2019.11.1.42-49.

70 **Кулькова, М.С.**, Оценка устойчивости массива при стадийной отработке запасов линзы Ждановского месторождения по результатам моделирования его напряженно-

деформированного состояния / М.С. Кулькова, А.В. Земцовский // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 5—2. — С. 103—110. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_52\_0\_103.

71 Курленя, М.В. Развитие метода гидроразрыва для исследования напряженного состояния массива горных пород / М.В. Курленя, А.В. Леонтьев, С.Н. Попов // ФТПРПИ. – 1994. – № 1. – С. 3-20.

72 Лемешко, Б.Ю. Расширение области применения критериев типа Граббса, используемых при отбраковке аномальных измерений / Б.Ю. Лемешко // Измерительная техника. – 2005. – № 6. - С. 13–19.

73 Леонтьев, А.В. Анализ естественных напряжений по результатам измерений в рудниках на территории Северной Евразии / А.В. Леонтьев // ФТПРПИ. - 2001. - № 1. - С. 31-40.

74 Леонтьев, А.В. Об особенностях метода измерительного гидроразрыва при контроле напряжений в шахтных условиях / А.В. Леонтьев // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2015. — Т. 2. — № 3. — С. 127 – 132.

75 Леонтьев, А.В. Об использовании метода гидроразрыва при контроле действующих напряжений в соляном массиве / А.В. Леонтьев, Скулкин А.А. // Вестник КРСУ. — 2017. — Том 17. - № 1. - С. 188-190.

76 Литвинский, Г.Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов: Монография / Г.Г. Литвинский. - ДонГТУ. – Донецк: Норд-Пресс, 2008. – 207 с.

77 Ловчиков, А.В. Сильнейшие горно-тектонические удары и техногенные землетрясения на рудниках России / А.В. Ловчиков // ФТПРПИ. - 2013. - № 4.

78 Ловчиков, А.В. Горно-тектонические удары на Ловозерском редкометальном месторождении / А.В. Ловчиков // Вестник МГТУ. - 2008. - Т.11 - № 3. - С. 385-392.

79 Лукичев, С.В. Цифровое прошлое, настоящее и будущее горнодобывающих предприятий / С.В. Лукичев // Горная промышленность. – 2021(4). – С. 73–79.

80 Лушев, В.А. Ориентация горизонтальных напряжений верхней части земной коры в РФ по данным инструментальных измерений в скважинах / В.А. Лушев, В.А. Павлов, Е.П. Корельский, А.В. Патутин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 3. – С. 337-349.

81 Ляшенко, В.И. Развитие научно-технических основ мониторинга состояния горного массива сложноструктурных месторождений / В.И. Ляшенко // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2017. - №3. - С. 109-135.

82 Макаров, А.Б. Практическая геомеханика: Пособие для горных инженеров / А.Б. Макаров. - Москва: Горная книга, 2006. - 391 с.

83 Марков, Г.А. О модели формирования избыточных горизонтальных напряжений в горных породах под влиянием восходящих движений земной коры / Г.А. Марков. - В кн.: Природа и методология определения тектонических напряжений в верхней части земной коры. Апатиты, Изд. КФАН СССР, 1981. - С. 59-81.

84 Марысюк, В.П., Геомеханический мониторинг и оценка напряженно-деформированного состояния системы «крепь-массив» при проходке сверхглубокого ствола СКС-1 рудника «Скалистый» / В.П. Марысюк, Т.С. Муштекенов, А.Н. Панкратенко, О.С. Каледин // Горный журнал. – 2020. – № 6. – С. 23-27.

85 Мельников, Д.Н. Измерение напряжений в массиве пород Ждановского месторождения методом разгрузки (торцевой вариант) / Д.Н. Мельников // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 1 (11). — С. 57–61.

86 Методические рекомендации по оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам // Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23 мая 2013 года № 216.

87 Методические указания по изучению массива горных пород для обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов. – М.: ИПКОН РАН, 2022. – 102 с.

88 Методические указания по определению параметров бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов. – М.: ИПКОН РАН, 2022. – 80 с.

89 Методические указания по установлению размеров камер и целиков при камерных системах разработки руд цветных металлов. Л.: ВНИМИ, 1972.

90 Методическое руководство по выбору составов закладочных материалов на рудниках ГМК «Печенганикель» / АН СССР, Кол. фил. им. С. М. Кирова, Горн. ин-т; [Сост. А. А. Леонтьев и др.]. - Апатиты: КФАН СССР, 1987. - 53 с.

91 Мозер, С.П. Горная геомеханика: физические основы и закономерности проявлений геомеханических процессов при подземной разработке месторождений / С.П. Мозер, Е.Б. Куртуков. - СПб.: Недра, 2009. - 136 с.

92 Мороз, Л.И. Решение дифференциальных задач методом конечных элементов. Учебное пособие / Л.И. Мороз, А.Г. Масловская. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2019.

93 Неверов, С.А. Напряженное состояние массива горных пород с ростом глубины залегания месторождений / С.А. Неверов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. - 2012. - № 2(90). - С. 3–7.

94 Нестеров, К.В. Развитие ресурсной базы АО «Кольская ГМК» / К.В. Нестеров, М.В. Кузенков // «Цветные металлы». - 2019. - № 11. – С. 16-22.

95 Нестеров, К.В. Развитие цифровых технологий на руднике «Северный» / К.В. Нестеров, М.В. Кузенков, В.А. Матвеев // «Цветные металлы». - 2019. - № 11. – С. 22-27.

96 Оказание услуг по геодинамическому и геомеханическому районированию месторождений Заполярное и Ждановское. Отчет. Научно-исследовательский экологический центр «Техногем». г. Санкт-Петербург, 2011 г.

97 Орсов, Д.А. Медно-никелевые месторождения Кольской никеленосной провинции (Кольский полуостров, Россия) / Д.А Орсов // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. - 2011. - №1 (38). - С. 47-56

98 Осецкий, В.М. Прикладная механика: учебное пособие для студентов немашиностроительных специальностей вузов / В. М. Осецкий и др. под ред. В.М. Осецкого. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Машиностроение, 1977. – 487 с.

99 Оценка и прогноз развития горного давления и сдвижения горных пород, текущий геомеханический контроль за состоянием горных выработок на подземных рудниках ОАО «Кольская ГМК», разработка рекомендаций по безопасной отработке месторождений. Отчет. АО «Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, 2011 г.

100 Оценка и прогноз развития горного давления и сдвижения горных пород, текущий геомеханический контроль за состоянием горных выработок на подземных рудниках ОАО «Кольская ГМК», разработка рекомендаций по безопасной отработке месторождений. Отчет. АО «Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, 2015 г.

101 Пантелеев, А.В. Методика визуальных наблюдений в подземных горных выработках на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам / А.В. Пантелеев, Э.В. Каспарьян, И.Э. Семенова; под ред. А.А. Козырева. — Апатиты: Издательство ФИЦ КНЦ РАН, 2020. — 68 с.

102 Работнов, Ю.Н. Сопrotивление материалов / Ю.Н. Работнов. – М.: Физматгиз, 1962. – 456 с.

103 Регламент по оценке нарушенности массива горных пород на рудниках ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель». ПАО «Горно-металлургическая компания «Норильский никель» Заполярный филиал, 2018 г.

104 Рудные месторождения СССР. В 3-х т. Под. ред. акад. В. И. Смирнова Изд. 2-е, перераб. и доп. Т.2. М, «Недра», 1978. – 399 с.

105 Руководство по геомеханическому документированию керна // SRK Consulting (Russia) Ltd. 2020 - 49 с.

106 Савич, И.Н. Оптимизация конструктивных и технологических решений при подземной разработке медно-никелевых руд Ждановского месторождения / И.Н. Савич, В.Н. Волков, В.В. Атанов, А.Е. Удалов, А.А. Павлов А.А. // Горный журнал. - 2011. – № 11. – С. 33-35.

107 Савченко, С.Н. Исследование напряженного состояния массива горных пород вблизи Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3). / С.Н. Савченко, А.А. Козырев // Геоэкология. - № 2. -2002. – С. 163-174.

108 Савченко, С.Н. Современные напряжения в северной части Балтийского щита по данным исследований Печенгского геоблока и разреза Кольской сверхглубокой скважины / С.Н. Савченко, Ф.Ф. Горбачевич, О.С. Головатая // Геофизический журнал. –2009. – Т. 31, №. 6. – С. 42-54.

109 Самсонов, А.А. Оценка состояния массива горных пород удароопасного месторождения «Олений ручей» по результатам измерений напряжений / А.А. Самсонов // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 1 (11). — С. 62–67.

110 Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов: Пер. с англ. - М.: Мир, 1979. – 392 с.

111 Сейсмичность при горных работах / Под. ред. Н.Н. Мельникова. — Апатиты: КНЦ РАН, 2002. — 325 с.

112 Семенова, И.Э. Прогноз удароопасности перспективных участков отработки Хибинской апатитовой дуги / И.Э. Семенова, И.М. Аветисян // Горная промышленность. - 2023. - № 1. - С. 43-47.

113 Семенова, И.Э. Развитие концепции геомеханического обоснования горных работ в удароопасных условиях / И.Э. Семенова, И.М. Аветисян // Горный журнал. - 2022. - № 1. - С. 28-33.

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

115 Семенова, И.Э. Исследование трансформации напряженно-деформированного состояния Хибинской апатитовой дуги в процессе крупномасштабной выемки полезных ископаемых / И.Э. Семенова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. - № 4. - С. 300-313.

116 Семенова, И. Э. Сейсмичность как отражение изменений напряженно-деформированного состояния массива горных пород в процессе ведения горных

работ / И.Э. Семенова, О.Г. Журавлева, С.А. Жукова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 6. – С. 46–58.

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

118 Сентябов, С.В. Методы определения первоначальных напряжений массива горных пород натурными измерениями / С.В. Сентябов, Д.В. Карамнов // Проблемы недропользования. – 2023. – № 1(36). – С. 54-63.

119 Смолич, С.В. Основы геомеханики: учеб. пособие / С.В. Смолич, В.А. Бабелло; Забайкал. гос. ун-т. – Чита: ЗабГУ, 2017. – 143 с.

120 Соннов, М.А. Применение САЕ Fidesys в решении геомеханических задач / М.А. Соннов, Д.А. Котиков, А.Д. Куранов // Горная промышленность. - 2018. - № 5. - С. 90–92.

121 Соннов, М.А. Выбор места возведения рудоспуска на основе применения конечно-элементарного моделирования с использованием программного комплекса САЕ Fidesys / М.А. Соннов, А.Е. Румянцев, А.В. Трофимов, В.Б. Вильчинский, А.П. Киркин, А.В. Баженова // Горная промышленность. 2019. - № 1(143). - С. 56–59.

122 Соннов, М.А. Численное моделирование изменения напряженно-деформированного в процессе отработки месторождения в программном комплексе САЕ Fidesys с использованием функции пошагового расчета / М.А. Соннов, А.Е. Румянцев, А.В. Трофимов, В.Б. Вильчинский // Горная промышленность. – 2020 - (2) – С. 110-114.

123 СП 91.13330.2012. Свод правил. Подземные горные выработки. Актуализированная редакция СНиП II-94-80» (утв. Приказом Минрегиона России от 30.06.2012 N 283).

124 Спишиак, Й. Геохимическая и минералогическая характеристика протерозойских метапикритов Кольской сверхглубокой скважины (СГ–3) / Й. Спишиак, Й. Досталь, Д. Говорка, Ш. Мерес, Ю.П. Смирнов. Вестник МГТУ. - 2007. - Т. 10, - № 2. - С. 198-210.

125 Токарев, О.В. Технологии подземной выемки запасов медно-никелевых руд Ждановского месторождения в период перехода с открытого способа разработки на подземный / О.В. Токарев, М.В. Кузенков, А.Е. Удалов // Горный журнал. - 2015. - № 6. - С. 60-63.

126 Турчанинов, И.А. Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок / И.А. Турчанинов, Г.А. Марков, В.И. Иванов, А.А. Козырев. — Л.: Наука, 1978. — 256 с.

127 Турчанинов, И.А. Руководство по измерению напряжений в массиве скальных пород методом разгрузки / И.А. Турчанинов, В.И. Иванов, Г.А. Марков. - Апатиты: КФ АН СССР, 1970. - 48 с.

128 Турчанинов, И.А. Основы механики горных пород / И.А. Турчанинов, М.А. Иофис, Э.В. Каспарьян. – Ленинград: Недра, 1989. –488 с.

129 Турченко, С.И. Металлогенические особенности Печенгской рифтогенной структуры (Кольский геоблок Балтийского щита) / С.И. Турченко // Труды Карельского научного центра РАН. - № 2. - 2016. - С. 40-51.

130 Фадеев, А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1987. – 221 с.

131 Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых». Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 8 декабря 2020 г. № 505.

132 Филин, А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела / А.П. Филин. -ч.1. – М.: Наука, 1975. – 832 с.

133 Хажыылай, Ч.В. Расчет паспорта прочности горных пород, находящихся в естественных условиях массива, с использованием критерия Хука-Брауна и программы Rocdata / Ч.В. Хажыылай, В.А. Еременко, М.А. Косырева, А.М. Янбеков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Общество с ограниченной ответственностью «Горная книга». - 2018. - С. 92-101

134 Харисов, Т.Ф. Геофизические исследования массива горных пород в условиях подземного рудника / Т.Ф. Харисов, В.В. Мельник, О.Д. Харисова, А.Л. Замятин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. - № 3–1. - С. 255 – 263.

135 Хмелинин, А.А. Разработка комплексного геофизического метода для выбора места заложения скважин геомеханических измерений и контроля процесса их бурения: диссертация кандидата технических наук: 25.00.16 / Хмелинин Алексей Павлович. – Новосибирск, 2014. - 165 с.

136 Чирков, С.Е. Сопоставление экспериментальных данных о прочности горных пород с теоретическими, вычисленными по различным критериям прочности / С.Е. Чирков, И.А. Соломина // Науч. сообщ. ИГД им. А.А. Скочинского, 1974. – С. 7-15.

137 Шашенко, О.М. Геомеханика. Учебник для студентов высших учебных заведений / О.М. Шашенко, В.П. Пустовойтенко, Е.А. Сдвижкова. – К.: 2015. – 563 с.

- 138 Шашенко, О.М., Деформируемость и прочность массивов горных пород: монография / О.М. Шашенко, О.О. Сдвижкова, С.М. Гапеев – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2008. – 224 с.
- 139 Barton, N.R. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support / N.R. Barton, R. Lien, J. Lunde // *Rock Mech.* 1974. - 6(4). - Pp. 189-239.
- 140 Bieniawski, Z.T. Engineering rock mass classification / Z.T. Bieniawski // 1989. New York: Wiley Interscience.
- 141 Bieniawski, Z.T. Estimating the Strength of Rock Materials / Z.T. Bieniawski. – *J. S. Afr. Min. Metall.*, Vol. 74. – 1974. - pp. 312-320.
- 142 Cai, M. Rockburst Support: Reference Book / M. Cai, P.K. Kaiser P – Sudbury: Laurentian University, 2018. Vol. 1. Rockburst Phenomenon and Support Characteristics. – 284 p.
- 143 Cunha, A.P. Scale effect in rock mechanics / A.P. Cunha // *Proc. Of First Int. Workshop on Scale effect in Rock Masses.* Rotterdam. Balkema. 1990.
- 144 Deere, D.U. Technical description of rock cores for engineering purposes. *Felsmechanik und Ingenieurgeologie* / D.U. Deere // *Rock Mechanics and Engineering Geology.* - 1963. - 1 (1). - Pp. 16-22.
- 145 Hast, N. The state of stress in the upper part of the Earth's crust determined by measurements of absolute rock stress / Hast, N. // *Naturwissenschaften.* - 1974. - N 11. – P. 463–475.
- 146 Heidbach, O. The World Stress Map database release 2016: Crustal stress pattern across scales / O.M. Heidbach, X. Rajabi, K. Cui, B. Fuchs, J. Müller, K. Reinecker, M. Reiter, F. Tingay, F. Wenzel, M.O. Xie, M. Ziegler, Zoback, and M.D. Zoback // *Tectonophysics*/ - 744. - P. 484-498.
- 147 Hoek, E. Strength of rock and rock masses / E. Hoek // *ISRM News Journal.* – 1994. - 2. PP. 4–16.
- 148 Hoek, E. The Hoek-Brown failure criterion and GSI (2018 Edition) / E. Hoek, E.T. Brown // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.* - 2019. - Vol. 11. - № 3. - P. 445–463.
- 149 Hoek, E., Carranza-Torres C., Corkum B. Hoek-Brown failure criterion // *Proc. NARMS-TAC Conference, Toronto.* - 2002. - 1. - Pp. 267-273.
- 150 Hoek, E., Quantification of the Geological Strength Index Chart / E. Hoek, T.G. Carter, M.S. Diederichs // *American Rock Mechanics Association*, June 2013.
- 151 Hoek, E. Big Tunnels in Bad Rock / E. Hoek // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.* - 2001. - Vol. 127(9). - P. 726–740.
- 152 Kozyrev, A.A. The estimation of the rock mass stress state of the Zhdanovskoe deposit, Kola MMC / A.A. Kozyrev, A.V. Zemtsovskii, **M.S. Kulkova**/ - *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019*, - Volume 1: Proceedings of the XV International Forum-Contest of Students

and Young Researchers under the auspices of UNESCO (St. Petersburg Mining University, Russia, 13-17 May 2019). CRC Press. - P. 189-197.

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

154 Leeman, E. R. The 'Doorstopper' and triaxial rock stress measuring instruments developed by the C.S.I.R. / E.R. Leeman // J. South African Institute of Mining and Metallurgy. 1969 - February. - P. 305–339.

155 Leeman, E. R. The measurement of stress in rock: a review of recent developments (and a bibliography) / E.R. Leeman // Proc. Int. Symp. on the Determination of Stresses in Rock Masses, Lab. Nac. de Eng. Civil. Lisbon. 1971. - P. 200–229.

156 Leeman, E. R. A technique for determining the complete state of stress in rock using a single borehole / E.R. Leeman, D.J. Hayes // Proc. 1st Congo Int. Soc. Rock Mech. (ISRM). Lisbon, Lab. Nac. de Eng. Civil. Lisbon. - 1966. - Vol. II. - P. 17–24.

157 Marinos, V. The geological strength index: applications and limitations / V. Marinos, P. Marinos, E. Hoek // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. - 2005. - Vol. 64. - P. 55-65.

158 McGarr, A. State of stress in the Earth's crust / A. McGarr, N.C. Gay // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. - 1978. - vol. №6 (1). - Pp. 405-436.

159 N. Barton. Rock mass classification and tunnel reinforcement using the Q-system. Conference: ASTM STP 984, 1988.

160 Priest, S.D. Discontinuity Spacings in Rock / S.D. Priest, J.A. Hudson // Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. - 2018 - vol. 13. - pp. 135-148, Pergamon Press, Great Britain.

161 Semenova, I. E. Undermined rock failure in apatite mines in Khibiny: topical problems / I.E. Semenova, I.M. Avetisyan, O.G. Zhuravleva, O.V. Belogorodtsev // Journal of Mining Science. 2022. - Vol. 58. - No. 6. - P. 1010–1015.

162 Semenova, I.E. The creation of a numerical geomechanical model for the Zhdanovskoe ore deposit / I.E. Semenova, **M.S. Kulkova**. - Proceedings of the ISRM International Symposium Eurock 2020 – Hard Rock Engineering Trondheim, Norway, 14-19 June.

163 Semenova, I.E. The stress distribution around the mining excavations under different tectonic loads / I.E. Semenova, **M.S. Kulkova**. - IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 833 (2021) 012127/IOP Publishing. DOI:10.1088/1755-1315/833/1/012127.

164 Tingay, M. The World Stress Map. Tingay / M. Heidbach, O. Fuchs, K. Müller, B. Wenzel, F. Reinecker, J. Sperner, // Episodes. – 2007. - 30. - P. 197-199.

165 Ulusay, R. The ISRM Suggested Methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007-2014. Cham, Switzerland: Springer. - 293 p.

**ПРИЛОЖЕНИЯ**

## Акт о внедрении результатов кандидатской диссертации



### УТВЕРЖДАЮ:

И.о. начальника горного управления  
АО «Кольская ГМК»

 А.И. Абаев

« 25 » 09 2024 г.

### АКТ

о внедрении  
результатов кандидатской диссертации  
Кульковой Марии Сергеевны  
по теме: «Исследование геомеханических характеристик массива пород Ждановского  
месторождения для обоснования безопасного ведения горных работ»

Настоящий акт подтверждает, что результаты указанного диссертационного исследования, представленного на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.6 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная азрогазодинамика и горная теплофизика», используются для оценки и прогноза геомеханической ситуации в процессе отработки запасов месторождений рудника «Северный» АО «Кольская ГМК».

Сотрудниками отдела Геомеханики, в том числе М.С. Кульковой, разработан комплекс конечно-элементных моделей Ждановского месторождения. Все работы по адаптации ПО Sigma GT и разработке комплекса математических моделей выполнены в рамках договоров №2661 от 20 июня 2022 г. и №26151 от 01 июня 2023 г «Исследования напряженно-деформированного состояния массива горных пород и геомеханическое сопровождение горных работ на руднике "Северный" АО "Кольская ГМК". Результаты геомеханических расчетов учитываются при формировании планов горных работ, что позволяет повысить безопасность горных работ.

М.С. Кулькова является одним из авторов «Методических рекомендаций по управлению горным давлением при подземной разработке месторождений» (рудник «Северный»). «Методические рекомендации...» внедрены в работу рудника «Северный» АО «Кольская ГМК» как один из инструктивных документов и разработаны в рамках договора №26151 от 01 июня 2023 г «Исследования напряженно-деформированного состояния массива горных пород и геомеханическое сопровождение горных работ на

руднике "Северный" АО "Кольская ГМК". «Методические рекомендации...» содержат принципы безопасного ведения горных работ на руднике «Северный» и способы минимизации проявлений горного давления; в них предложены методы прогноза удароопасности, способы профилактики горных ударов и приведения выработок в неудароопасное состояние.

Главный маркшейдер

 С.В. Временков

Главный геофизик группы  
геомеханического мониторинга

 Г.Д. Степанов

## Акт о внедрении рекомендаций по управлению горным давлением при подземной разработке месторождений (рудник «Северный»)

**НОРНИКЕЛЬ**

КОЛЬСКАЯ ГМК

**УТВЕРЖДАЮ:**И.о. начальника горного управления  
АО «Кольская ГМК»

А.И. Абаев

« 25 » 07 2024 г.

**АКТ**

о внедрении

Методических рекомендаций по управлению горным давлением при подземной  
разработке месторождений (рудник «Северный»)

Настоящий акт подтверждает, что «Методические рекомендации по управлению горным давлением при подземной разработке месторождений» (рудник «Северный») (далее Методические рекомендации) внедрены как один из инструктивных документов в работу рудника «Северный» АО «Кольская ГМК». В Методических рекомендациях на основе проведенного Горным институтом Кольского научного центра РАН в течение 2017 – 2023гг комплекса геомеханических исследований приведены принципы безопасного ведения горных работ на руднике «Северный» и минимизации проявлений горного давления; предложены методы прогноза удароопасности, способы профилактики горных ударов и приведения выработок в неудароопасное состояние. Для реализации контроля геомеханического состояния массива горных пород и разработки мероприятий по снижению геомеханических рисков в соответствии с Методическими рекомендациями на руднике создана группа геомеханического мониторинга.

Методические рекомендации разработаны в рамках договора №26151 от 01 июня 2023 г «Исследования напряженно-деформированного состояния массива горных пород и геомеханическое сопровождение горных работ на руднике "Северный" АО "Кольская ГМК". Авторы от ГИИ КНЦ РАН: руководитель отдела Геомеханики, к.т.н. Семенова Инна Эриковна, научный сотрудник Кулькова Мария Сергеевна, ведущий инженер Пантелеев Алексей Владимирович; от АО «Кольская ГМК» главный геофизик Степанов Георгий Дмитриевич.

Главный маркшейдер

С.В. Временков

Главный геофизик группы  
геомеханического мониторинга

Г.Д. Степанов

## Акт о внедрении ПО Sigma GT с комплексом разномасштабных моделей Ждановского месторождения

**НОРНИКЕЛЬ**

КОЛЬСКАЯ ГМК

**УТВЕРЖДАЮ:**И.о. начальника горного управления  
АО «Кольская ГМК»  
А.И. Абаев

&lt; 25 &gt; 01 2024 г.

**АКТ**

о внедрении

ПО Sigma GT с комплексом разномасштабных моделей Ждановского месторождения

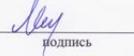
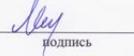
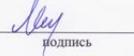
Настоящий акт подтверждает, что приложение Sigma GT, реализующее многовариантные расчеты напряженно-деформированного состояния (НДС) с учетом геологических, геомеханических и горнотехнических факторов, разработанное в Горном институте Кольского научного центра РАН (свидетельство №2022668233), адаптировано для условий рудника «Северный» и используется ИТР при геомеханическом обосновании горных работ и прогнозной оценке состояния горных выработок. Разработан комплекс конечно-элементных моделей Ждановского месторождения: мелкомасштабная модель, включающая все рудные тела месторождения; уточненные модели Центрального и Юго-Восточного рудных тел; крупномасштабные модели элементов горной технологии. Расчеты НДС на руднике проводятся в соответствии с разработанной в ГоИ КНЦ РАН методикой моделирования. Результаты геомеханических расчетов учитываются при формировании планов горных работ, что позволяет повысить безопасность горных работ.

Все работы по адаптации ПО Sigma GT и разработке комплекса математических моделей выполнили в рамках договоров №2661 от 20 июня 2022 г. и №26151 от 01 июня 2023 г «Исследования напряженно-деформированного состояния массива горных пород и геомеханическое сопровождение горных работ на руднике "Северный" АО "Кольская ГМК" сотрудники ГоИ КНЦ РАН: руководитель отдела Геомеханики, к.т.н. Семенова Инна Эриковна, научный сотрудник Дмитриев Сергей Владимирович, научный сотрудник Кулькова Мария Сергеевна.

Главный маркшейдер

  
С.В. ВременковГлавный геофизик группы  
геомеханического мониторинга  
Г.Д. Степанов

Отчет «Исследования напряженно-деформированного состояния массива горных пород и геомеханическое сопровождение горных работ на руднике «Северный» АО «Кольская ГМК», 2022 год

<p>Министерство науки и высшего образования Российской Федерации</p> <p>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК» (ФИЦ КНЦ РАН)</p> <p>ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ КНЦ РАН (Гои КНЦ РАН)</p> <p style="text-align: center;"><b>УТВЕРЖДАЮ</b> Директор Гои КНЦ РАН, д.т.н.</p> <p style="text-align: center;"> С.В. Лукичёв " 15 " ноября 2022г</p> <p style="text-align: center;">ОТЧЕТ по договору № 2661 от 20 июня 2022г.</p> <p style="text-align: center;"><b>ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД И ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ГОРНЫХ РАБОТ НА РУДНИКЕ «СЕВЕРНЫЙ» АО «КОЛЬСКАЯ ГМК», В СООТВЕТСТВИИ С ТЕХНИЧЕСКИМ ЗАДАНИЕМ № 3-22ГУ</b></p> <p>Научный руководитель работы Зав. отделом Геомеханики, д.т.н., проф.  А.А. Козырев</p> <p>Ответственный исполнитель работы, Заведующий лабораторией прогноза удароопасности рудных месторождений, к.т.н.  И.Э. Семенова</p> <p style="text-align: center;">Апатиты 2022</p>	<p style="text-align: right;">Горный институт КНЦ РАН</p> <p style="text-align: right;">Договор № 2661</p> <p style="text-align: center;"><b>СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ</b></p> <table border="0"> <tr> <td>Научный руководитель работы Зав. отделом Геомеханики, д.т.н., проф.</td> <td> подпись</td> <td>А.А. Козырев</td> </tr> <tr> <td>Ведущий научный сотрудник, к.т.н.</td> <td> подпись</td> <td>И.Э. Семенова</td> </tr> <tr> <td>Ведущий инженер</td> <td> подпись</td> <td>А.В. Пантелеев</td> </tr> <tr> <td>Научный сотрудник</td> <td> подпись</td> <td>И.Ю. Розанов</td> </tr> <tr> <td>Научный сотрудник</td> <td> подпись</td> <td>М.С. Кулькова</td> </tr> <tr> <td>Научный сотрудник</td> <td> подпись</td> <td>С.В. Дмитриев</td> </tr> <tr> <td>Ведущий инженер</td> <td> подпись</td> <td>М.А. Кузнецов</td> </tr> <tr> <td>Ведущий инженер</td> <td> подпись</td> <td>А.О. Орлов</td> </tr> <tr> <td>Ведущий инженер</td> <td> подпись</td> <td>С.А. Власов</td> </tr> </table> <p style="text-align: center;">2</p>	Научный руководитель работы Зав. отделом Геомеханики, д.т.н., проф.	 подпись	А.А. Козырев	Ведущий научный сотрудник, к.т.н.	 подпись	И.Э. Семенова	Ведущий инженер	 подпись	А.В. Пантелеев	Научный сотрудник	 подпись	И.Ю. Розанов	Научный сотрудник	 подпись	М.С. Кулькова	Научный сотрудник	 подпись	С.В. Дмитриев	Ведущий инженер	 подпись	М.А. Кузнецов	Ведущий инженер	 подпись	А.О. Орлов	Ведущий инженер	 подпись	С.А. Власов
Научный руководитель работы Зав. отделом Геомеханики, д.т.н., проф.	 подпись	А.А. Козырев																										
Ведущий научный сотрудник, к.т.н.	 подпись	И.Э. Семенова																										
Ведущий инженер	 подпись	А.В. Пантелеев																										
Научный сотрудник	 подпись	И.Ю. Розанов																										
Научный сотрудник	 подпись	М.С. Кулькова																										
Научный сотрудник	 подпись	С.В. Дмитриев																										
Ведущий инженер	 подпись	М.А. Кузнецов																										
Ведущий инженер	 подпись	А.О. Орлов																										
Ведущий инженер	 подпись	С.А. Власов																										

Отчет «Исследования напряженно-деформированного состояния массива горных пород и геомеханическое сопровождение горных работ на руднике «Северный» АО «Кольская ГМК», 2023 год

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»  
(ФИЦ КНЦ РАН)

ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ КНЦ РАН  
(Гои КНЦ РАН)

УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора Гои КНЦ РАН,



О.В. Наговицын

" 15 " ноября 2023г.

ОТЧЕТ  
по договору № 26153 от 01 июня 2023г.

ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД И ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ  
ГОРНЫХ РАБОТ НА РУДНИКЕ «СЕВЕРНЫЙ» АО «КОЛЬСКАЯ ГМК»,  
в соответствии с техническим заданием № 5/23ГУ

Руководитель работы,  
Заведующий отделом Геомеханики, к.т.н.

И.Э. Семенова

Апатиты  
2023

Горный институт КНЦ РАН

Договор № 26153 от 01.06.2023

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Зав. отделом Геомеханики, к.т.н	 подпись	И.Э. Семенова
Ведущий инженер	 подпись	А.В. Пантелеев
Научный сотрудник	 подпись	М.С. Кулькова
Научный сотрудник	 подпись	С.В. Дмитриев
Ведущий инженер	 подпись	С.А. Власов
Ведущий инженер	 подпись	В.Н. Некрасов
Ведущий инженер	 подпись	П.Ю. Меньшиков
Ведущий инженер	 подпись	А.О. Орлов

В работе также принимали участие: вед. инженер Данилов И.В., вед. инженер Потокин М.И., технолог Икат. Потемковский С.В., вед. инженер Целовальникова О.Н., технолог Икат. Веремеев А.Ю.

Заключение по обеспечению геомеханической безопасности ведения горных работ для месторождений  
Ждановское, Тундровое и Заполярное по плану развития на 2024 год



ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ - ОБСОБЛЕННОЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА  
"КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК"



ул. Ферсмана, 24, Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209  
Факс: (815 55) 74625, тел.: (815 55) 74342, 79520, e-mail: goi@ksc.ru

УТВЕРЖДАЮ  
Директор Горного института  
КНЦ РАН  
д.т.н, проф.



С.В. Лукичев  
20 ноября 2023 г.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

по обеспечению геомеханической безопасности ведения горных работ для  
месторождений, Ждановское, Тундровое и Заполярное по плану развития на 2024 год

Руководитель отдела Геомеханики,  
к.т.н.

И.Э. Семенова

Апатиты  
2023

Геодинамическая характеристика массива горных пород Ждановского месторождения по результатам комплексных исследований и визуального обследования выработок.

Разработка запасов на руднике «Северный» ведется в сложных геологических, геомеханических и геодинамических условиях. Фактором повышения геомеханических рисков является действие в массиве пород Ждановского месторождения тектонических напряжений. Данная гипотеза подтверждена серией натурных измерений параметров поля напряжений на 8 замерных станциях, расположенных на различной глубине - до 1 км от дневной поверхности и на различных участках месторождения. По результатам всех измерений, выполненных на руднике, однозначно определен тип напряженно-деформированного состояния массива – гравитационно-тектонический. Максимальные горизонтальные напряжения имеют тектоническую природу и в 2 ÷ 3 раза превышают вертикальные, связанные с гравитацией и собственным весом налегающих пород (рис. 1). Полученные натурные данные о соотношении компонент тензора напряжений позволяют осуществлять прогноз геомеханической и геодинамической ситуации по мере развития горных работ. В 2024 году планируется продолжить исследование напряженно-деформированного состояния комплексом натурных и численных методов, что повышает геомеханическую обоснованность принимаемых технологических решений по выемке запасов на больших глубинах в условиях растущих геодинамических рисков.

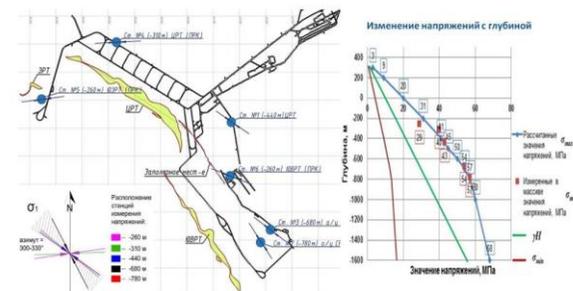


Рисунок 1 – Расположение замерных станций, направления и значения действующих напряжений.

По результатам испытаний образцов на прессах в соответствии с «Методическими рекомендациями по оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам» установлено, что все исследуемые породные разности - диабаз, рудный перидотит и туфогенно-осадочные породы, относятся к удароопасным.

Наличие в массиве пород Ждановского месторождения двух факторов – действия высоких тектонических напряжений и склонности к удароопасности большинства пород, слагающих массив, а также особенности геологического строения обуславливают высокий уровень геомеханических и геодинамических рисков при разработке запасов Ждановского месторождения.

В 2023 году выполнено визуальное обследование действующих подземных выработок рудника «Северный» с фотосъемкой участков с наиболее характерными нарушениями приконтурной части выработок. В результате выявлены участки с внешними признаками удароопасности, проведена оценка текущего геодинамического состояния массива, включающего рудное тело, а также определены факторы, влияющие на возникновение очагов повышенного горного давления в районах активного ведения горных работ.

Анализ характера и местоположения проявлений внешних признаков удароопасности на контуре горных выработок подтверждает закономерности, выявленные за период исследований Горного института КНЦ РАН с 2016 года. По результатам обследования 2023 года можно сделать следующие выводы:

1. Одним из определяющих параметры нарушенности приконтурной части выработок фактором является геологическое строение массива, а именно естественная трещиноватость, образованная во время формирования рудного тела, а также эпигенетические дизъюнктивы тектонического характера.

2. Наибольшую опасность по фактору геологического строения представляет нижний контакт рудного тела, выполненный сильно дезинтегрированной, брекчированной, оталькованной, с зеркалами скольжения зоной, вскрываемый по его простирацию буродоставочными штреками.

3. Нарушение приконтурной части выработок по фактору горного давления в большинстве случаев отмечается в выработках штрекового направления. В выработках ортового направления проявление внешних признаков удароопасности фиксируются только на отдельных участках в непосредственной близости от границ очистного пространства.

4. Проявления горного давления в буродоставочных штреках ЦРТ имеют устойчивую закономерность: расположение сектора максимальных нарушений в выработках висячего бока находится на сопряжении северной стенки с кровлей; в выработках лежачего бока - на сопряжении южной стенки с кровлей. При этом

максимальному разрушению подвержены выработки, расположенные в висячем боку под границей вышележащих очистных работ.

5. В 2023 зафиксирован тренд по снижению суммарной протяженности участков с проявлением внешних признаков удароопасности в интенсивной форме, что связано с переходом на отработку Центрального рудного тела расходящимися фронтами от единой разрезки, а также минимизацией применения камерно-целиковой системы отработки запасов (ПОКЦ).

6. Проведенные в 2023 году опытно-промышленные испытания разгрузочных строчек скважин на контуре выработок показали эффективность данного профилактического мероприятия для уменьшения негативных проявлений горного давления.

#### **Анализ геомеханических условий ведения горных работ на руднике «Северный» в соответствии с планом работ на 2024 год**

Планом горных работ на 2024 год предусмотрена разработка запасов рудных тел Ждановского месторождения системой с подэтажным обрушением и торцевым выпуском руды (ПОТ) и отдельных участков с применением камерно-целиковой системы разработки (КЦС). Следует обратить внимание на следующие участки.

##### Центральное рудное тело:

- Гор. -390м, Р 21+23. Планируется отработка треугольников лежачего бока с проходкой буро-доставочного штрека (БДШ). Размер целика между полевым штреком (ПШ) и БДШ будет составлять около 5 метров, что, может спровоцировать проявление внешних признаков удароопасности в виде динамического заколообразования по южной стенке и ее сопряжению с кровлей и потребовать дополнительных мероприятий по поддержанию приконтурной части массива выработок штрекового направления.
- Гор. -460м. Планируется отработка рудного тела с применением ступенчатой формы фронта очистных работ. При этом от квартала к кварталу меняются параметры опережения по висячему боку. Желательно осуществлять равномерное продвижение фронта горных работ, выдерживая угол опережения около 45°.
- Проходка буро-доставочных выработок запланирована с опережением ко времени их погашения. Значительная дезинтеграция массива, обусловленная сложным геологическим строением рудного тела, повышенное горное давление (особенно в зоне опирания подработанного массива висячего бока), сейсмическое воздействие от технологических взрывов, требует дополнительных мер по поддержанию буродоставочных выработок.

- При довыпуске запасов гор.-370 м необходимо учитывать фактор ослабления устойчивости приконтурной части выработок вследствие длительного простоя, а также снижения сцепления структурных блоков в массиве.

Юго-восточное рудное тело:

- На гор. -365м в разрезах 11 ÷ 14 планируется отработка запасов встречными фронтами с формированием блока-целика, что приводит к дополнительной концентрации сжимающих напряжений и повышению риска разрушения массива целика в динамической форме. Необходимо предусмотреть изменение порядка отработки запасов данных участков месторождения, либо разработать мероприятия по обеспечению безопасности при отработке запасов.
- Гор.-385 и -425м при отработке запасов планируется использовать камерно-целиковую системой разработки (КСЦ), что требует дополнительного обоснования размеров камер и целиков.

Северное рудное тело:

- Гор.-410. Работы ведутся на уменьшающийся целик. Оработка целика 2024 году не планируется.
- В зоне стыковки СРТ и ЦРТ предусмотреть специальные мероприятия по снижению геомеханических рисков.

Юго-западные рудные тела (1 и 2):

В отметках подэтажей -370 м (-375 м) и -390 м (-395 м) запланирована практически одновременная отработка запасов рудных тел ЮЗРТ и ЮЗРТ-2. Между очистными пространствами ЮЗРТ и ЮЗРТ-2 будет формироваться маломощный целик, с областью пригрузки от двух образующихся выемок. Массив горных пород Западного и Юго-западных рудных тел характеризуется сложным тектоническим строением и развитой трещиноватостью, что также снижает устойчивость целика и элементов горной технологии. В массиве целика на двух подэтажах запроектирована проходка полевого штрека ЮЗРТ-2, в котором в условиях влияния вышеприведенных факторов существенно повышается риск нарушений приконтурного массива. Благоприятные условия для отработки ЮЗРТ могут быть созданы при опережении очистных работ по ЮЗРТ-2, что сформирует защитную зону для пород лежащего бока.

Для всех участков:

При применении системы с обрушением и торцевым выпуском руды на флангах рудных тел в областях выклинивания необходимо применение технологических решений, предусматривающих извлечение запасов без образования целиков - концентраторов напряжений.

**Общее заключение по развитию горных работ на 2024 год**

Анализ планов развития горных работ на 2024 год показал, что они подготовлены согласно проектной документации и в соответствии с рекомендациями ГИИ КНЦ РАН и ВНИМИ. Основная применяемая система разработки ПОТ позволяет создать оптимальные условия для обеспечения геодинамической безопасности при отработке месторождений при соблюдении ряда условий. Следует отметить, что за 2023 год предприятие предприняло ряд дополнительных мер для минимизации рисков, связанных со сложными геомеханическими и геодинамическими условиями: принят в штат рудника квалифицированный сотрудник для осуществления геомеханического мониторинга; проведены опытно-промышленные испытания разгрузочных строчек скважин на контуре выработок; в плане горных работ учтены рекомендации по отработке запасов удароопасных участков с формированием защитной зоны; снижается количество блоков-целиков при выемке запасов; ведутся организационные мероприятия по созданию службы геомеханического мониторинга.

Для повышения безопасности горных работ и улучшения геодинамического состояния массива предлагаются следующие мероприятия:

- отработку запасов осуществлять от центра к флангам или от одного фланга к другому без формирования блоков-целиков;
- при применении системы с обрушением и торцевым выпуском руды на флангах рудных тел в областях выклинивания необходимо применение технологических решений, предусматривающих извлечение запасов без образования целиков – концентраторов напряжений.
- формировать опережения фронта очистных работ вышележащего подэтажа к нижележащему на расстояние не менее 1,5 высоты подэтажа;
- при проектировании нижних горизонтов необходимо выносить полевые штреки за зону влияния очистных работ (п.929 Приказа ФСЭТ и АН №505 от 8.12.2020г, "Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых");
- рекомендуется равномерное продвижение фронта очистных работ с выдержанными параметрами опережений по висячему боку; при штрековой подготовке и существенной геолого-структурной нарушенности массива ведение очистных работ рекомендуется выполнять с минимальным опережением по висячему боку по отношению к лежащему (2-3 веера по смежным выработкам);
- для условий Ждановского месторождения предпочтительнее вариант ортовой подготовки, что снизит протяженность выработок с проявлениями горного давления в динамической форме; кроме того, в этом случае тектоническая слабоустойчивая зона в лежащем боку рудной залежи пересекается по нормали, что снижает ее негативное влияние

на устойчивость приконтурной части массива выработок и упрощает мероприятия по поддержанию данных участков в безопасном состоянии;

- буродоставочные штреки должны проектироваться таким образом, чтобы их проходка не велась по тектонической зоне, слагающей нижний контакт рудного тела;

- при отработке двух юго-западных рудных тел рекомендуется обеспечить опережение очистных работ по ЮЗРТ-2, что сформирует защитную зону для пород лежащего бока и создаст благоприятные условия для отработки ЮЗРТ;

- в зоне стыковки СРТ и ЦРТ предусмотреть специальные мероприятия по снижению геомеханических рисков;

- рекомендуется нанесение актуальной бровки обрушений на планы горных работ (по результатам ежегодной съемки дневной поверхности);

- разрезы в плане горных работ представлять с учетом дневной поверхности;

- рекомендуется разработка проекта и внедрение на предприятии системы микросейсмического мониторинга, позволяющей контролировать изменения геодинамической ситуации в режиме реального времени в объемах геомеханического пространства рудника;

- рекомендуется развитие службы геомеханического мониторинга, специально обученный персонал которой будет выполнять работы по контролю и прогнозу проявлений горного давления и выполнению мероприятий по разгрузке массива горных пород.

План развития горных работ на месторождениях Ждановское, Тундровое и Заполярное на 2024 год рекомендуется к утверждению с выполнением дополнительных работ по обоснованию выемки запасов на потенциально опасных участках, где сохраняется необходимость ведения горных работ встречными фронтами.

Научный сотрудник



М.С. Кулькова

Ведущий инженер



А.В. Пантелеев