

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Емельянов Иван Андреевич



РАЗВИТИЕ МЕТОДА ПОЛНОЙ РАЗГРУЗКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ЕСТЕСТВЕННОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ МАССИВОВ
АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ХИБИН

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, доцент
Беляков Н.А.

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОГО МАССИВА	11
1.1 Характеристика объекта исследования.....	11
1.2 Анализ теоретического представления об естественном гравитационно-тектоническом поле напряжений.....	12
1.3 Анализ методов определения естественного напряженного состояния горного массива	15
1.3.1 Геомеханические методы определения естественного напряженного состояния горного массива	16
1.3.2 Геофизические методы оценки естественного напряженного состояния горного массива	24
1.3.3 Геологические методы оценки естественного напряженного состояния горного массива	29
1.4 Анализ подходов к реконструкции тектонических напряжений горного массива	30
1.4.1 Методы расчета трещинных деформаций	31
1.4.2 Методы дислокационного анализа	32
1.4.3 Методы структурного анализа.....	34
1.5 Анализ численных методов расчета параметров напряженно-деформированного состояния горного массива.....	36
1.6 Выводы по Главе 1	38
ГЛАВА 2 МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОГО МАССИВА АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВЫХ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЙ ХИБИН.....	41
2.1 Натурные испытания при определении естественного напряженного состояния горного массива	42
2.1.1 Методика проведения натурных испытаний	42
2.1.2 Результаты натурных испытаний	48
2.2 Лабораторные испытания кернового материала	49
2.3 Методика обработки данных натурных испытаний	52
2.4 Методика расчета главных напряжений и их ориентаций.....	55
2.5 Реализация метода определения естественного напряженного состояния для условий скальных горных массивов месторождений Хибин	57

2.6 Сопоставление разработанного метода определения естественного напряженного состояния горного массива с методом целевой разгрузки	69
2.7 Выводы по Главе 2	73
ГЛАВА 3 УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ТРЕЩИНОВАТОСТИ ГОРНОГО МАССИВА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЕГО ЕСТЕСТВЕННОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТОДОМ КОЛЬЦЕВОЙ РАЗГРУЗКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ДАТЧИКА СМЕЩЕНИЙ	74
3.1 Характеристики скального массива	74
3.2 Учет влияния микроструктурной трещиноватости	76
3.2.1 Индекс определения качества горны пород (<i>RQD</i>)	77
3.2.2 Геомеханическая классификация породного массива Бартон (рейтинговая система <i>Q</i>)	78
3.2.3 Геомеханическая классификация породного массива Бениявского (рейтинговая система <i>RMR</i>)	79
3.2.4 Геологический индекс прочности массива (<i>GSI</i>)	80
3.2.5 Определение эффективных свойств квазисплошной среды	81
3.3 Учет влияния трещиноватости, сопоставимой по размерам с измерительной скважиной	83
3.3.1 Представление трещины в виде прослойки сплошного материала между контактными блоками	85
3.3.2 Представление трещины в явной форме контактного взаимодействия между структурными блоками	88
3.4 Выводы по Главе 3	97
ГЛАВА 4 УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРНЫХ ПОРОД НА ИЗМЕНЕНИЕ ДИАМЕТРА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СКВАЖИНЫ ПРИ КОЛЬЦЕВОМ ОБУРИВАНИИ	99
4.1 Особенности решения сопряженной термомеханической задачи	99
4.2 Описание методики по учету влияния изменения температуры	101
4.3 Лабораторные испытания кернового материала	101
4.4 Численное моделирование с учетом различных термомеханических параметров горной породы	103
4.5 Выводы по Главе 4	110
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	111
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	113
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт о внедрении результатов кандидатской диссертации	122
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ	124

ПРИЛОЖЕНИЕ В Продольный разрез Хибинских месторождений	126
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Фотографии образцов до и после лабораторных испытаний	127
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Варианты напряженного состояния, использованные при численном моделировании.....	132
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Изохromы распределения радиальных смещений стенок измерительной скважины и деформаций горного массива	136

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

На сегодняшний день одной из не полностью решенных задач геомеханики в области разработки месторождений полезных ископаемых является задача определения естественного напряженного состояния горного массива. Среди методов определения естественного напряженного состояния горного массива наибольшее распространение получили метод щелевой разгрузки и метод полной разгрузки по схеме ВНИМИ. Эти методы имеют следующие недостатки: высокая трудоемкость буровых работ; ограничения по глубине бурения; сложности с сохранением ортогональности измерительных скважин и с установкой измерительного оборудования; отсутствие единого алгоритма обработки данных натурных и лабораторных испытаний. Для повышения достоверности геомеханического прогноза, выбора способов обеспечения устойчивости породных обнажений и безопасных размеров элементов систем разработки необходимо знание не только качественных, но и количественных параметров напряженного состояния, определение которых возможно только на основе решения обратной геомеханической задачи. В связи с этим возникают дополнительные неопределенности при определении деформационно-прочностных свойств вмещающих горных пород и эффективных свойств их массива с учетом структурной нарушенности, необходимых для решения обратной задачи.

С учетом вышеизложенного, для повышения уровня безопасности при ведении горных работ и повышения достоверности информации о состоянии горного массива имеется необходимость в развитии существующих методов определения естественного напряженного состояния, а значит выбранная тема исследования является актуальной.

Степень разработанности темы исследования

Большой вклад в исследование гравитационно-тектонического напряженного состояния горного массива внесли такие ученые, как А.А. Козырев, И.Э. Семенова, И.В. Баклашов, Б.А. Картозия, А.Г. Протосеня, М.М. Протоdjяконов, В.С. Haimson, F.B. Cornet и др.

Изучению и развитию методов, позволяющим получить первичное представление о естественном напряженном состоянии горного массива путем проведения натурных испытаний, посвящены работы Н. Хаста, Е. Лимана, М.В. Курлени, Н.П. Влоха, Г.И. Грицко, В.Д. Барашникова, D. Christiansson, C. Fairhurst, и др.

Тематика реконструкции тектонических напряжений по совокупности сколовых трещин подробно освещена в работах М.В. Гзовского, Д.Н. Осокиной; М.А. Chinnery, E.M. Anderson и др.

Значимые результаты в области исследования напряженного состояния нарушенного горного массива, а именно в изучении влияния строения и различных видов нарушенности массива были получены А.Н. Ставрогиным, И.В. Баклашовым, Д. Хадсоном, М.М. Протодяконовым, З. Бениявским, Н. Бартоном, Р. Миллером и др.

Изучению формирования и изменения напряженного состояния горного массива численными методами посвящены работы А.П. Господарикова, С.А. Саммаля, М.А. Карасева, П.А. Корчака, Н.А. Белякова и др.

Анализ трудов представленных авторов показал, что при определении естественного напряженного состояния горного массива существует ряд нерешенных задач, связанных с физически нелинейным поведением горного массива, сложностью проведения натурных исследований и недостаточной проработкой существующих подходов к обработке результатов натурных измерений для оценки естественного напряженного состояния горного массива, что подчеркивает актуальность, практическую и научную значимости темы диссертационного исследования.

Предметом исследования в диссертационной работе является естественное напряженное состояние анизотропного горного массива. **Объектом исследования** является горный массив апатит-нефелиновых месторождений Хибин.

Цель работы – повышение достоверности определения естественного напряженного состояния горного массива апатит-нефелиновых месторождений Хибин с использованием методов полной разгрузки.

Идея работы. Определение естественного напряженного состояния горного массива должно основываться на выполнении натурных измерений методом кольцевой разгрузки с использованием трехкомпонентного датчика смещений с последующей их обработкой с применением многовариантного численного моделирования в пространственной постановке, учитывающем анизотропность горного массива и температурный фактор.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения перечисленных ниже **задач**:

1. Анализ гипотез формирования естественного напряженного состояния горного массива и методов его оценки. Определение границ применимости этих методов и степени их достоверности.
2. Проведение комплекса натурных исследований, включающего в себя выполнение измерений в рудничных условиях с применением трехкомпонентного датчика смещений и лабораторные испытания кернового материала.
3. Разработка численных геомеханических моделей, корректно описывающих поведение анизотропного горного массива в рамках метода конечных элементов, учитывающих

этапность проведения натурных испытаний и влияние температурного фактора при выполнении буровых работ.

4. Разработка рекомендаций для выполнения работ по оценке естественного напряженного состояния горного массива методом кольцевой разгрузки с применением трехкомпонентного датчика смещений и принятого бурового оборудования.

Исходя из вышесказанного, **актуальной задачей** является реализация подхода к прогнозу естественного напряженного состояния горного массива, позволяющая повысить его достоверность.

Научная новизна работы:

1. Выявлены зависимости изменения радиальных смещений стенок измерительной скважины и деформаций горного массива для условий месторождений апатит-нефелиновых руд на различном удалении от контура горной выработки.

2. Определены прочностные и деформационные параметры контактного взаимодействия для трещиноватости горного массива с размерами, сопоставимыми с измерительной скважиной, и получены зависимости, отражающие их влияние на параметры естественного напряженного состояния.

3. Установлен полиномиальный закон зависимости изменения смещений контура измерительной скважины, формирующихся в результате изменения температуры вмещающего горного массива при бурении разгрузочной щели.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика по пунктам:

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

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

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

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработана методика определения естественного напряженного состояния горного массива методом кольцевой разгрузки с применением трехкомпонентного датчика смещений.
2. Разработаны рекомендации по учету влияния трещиноватости горного массива при определении естественного напряженного состояния горного массива методом кольцевой разгрузки.
3. Разработаны рекомендации по учету температурного фактора, возникающего при проведении буровых работ, при определении естественного напряженного состояния горного массива методом кольцевой разгрузки.
4. Разработана и зарегистрирована программа для ЭВМ «Программа для расчета значений и ориентаций главных напряжений горного массива» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023666261).
5. Результаты диссертационной работы рекомендованы к внедрению при разработке проекта проведения подземных горных работ на рудных месторождениях в виде комплексного метода оценки горно-тектонического естественного поля напряжений горного массива и применены в проектной деятельности ООО «СПб-Гипрошахт», что подтверждается актом внедрения от 23.09.2024 (Приложение А).

Методология и методы исследования

Основой проводимой работы является методика исследований, включающая следующий комплекс методов: анализ литературных источников по теме исследования; проведение натурных испытаний в условиях месторождений апатит-нефелиновых руд КФ АО «Апатит»; проведение лабораторных испытаний кернового материала; многовариантное численное моделирование анизотропного горного массива, выполняемое с учетом его эффективных деформационно-прочностных свойств.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Прогноз естественного напряженного состояния горного массива должен быть основан на методе кольцевой разгрузки и измеренных с применением трехкомпонентного датчика радиальных смещениях контура скважины, обработка которых должна выполняться с применением закономерностей между смещениями, деформациями и напряжениями, установленными в результате многовариантного численного моделирования в пространственной постановке.
2. Численные модели прогноза естественного напряженного состояния горного массива должны учитывать его микроструктурную трещиноватость посредством использования эффективных деформационных свойств квазисплошной среды, а трещиноватость, сопоставимую

по размерам с измерительной скважиной, - в явном виде в форме контактного взаимодействия между структурными блоками, свойства которого следует определять по предложенной методике.

3. При прогнозе естественного напряженного состояния горного массива методом кольцевой разгрузки обработку радиальных смещений стенок измерительной скважины следует выполнять с учетом влияния изменения температуры горных пород, возникающего при ведении буровых работ, которое описывается полиномиальным законом вида:

$$z = (z_0 + a \cdot \lambda_T - b \cdot C - c \cdot \lambda_T^2 + d \cdot C^2) \cdot K_1 \cdot K_2$$

Степень достоверности результатов исследования подтверждается использованием параметров моделей геоматериалов, обоснованных по результатам лабораторных испытаний и натурных наблюдений; хорошей сходимостью результатов численных экспериментов с данными натурных наблюдений; использованием современных методов математического и численного анализа.

Апробация результатов проведена на четырех научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на трех международных. За последние 3 года принято участие в трех научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на двух международных:

IV Международная конференция «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование» (октябрь 2021 года г. Санкт-Петербург).

XIX Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (май 2023 года г. Санкт-Петербург).

XVIII Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Проблемы недропользования» (февраль 2024 года г. Екатеринбург).

XI Международная научно-практическая конференция «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий. Безопасное и эффективное освоение месторождений полезных ископаемых» (май 2024 года г. Санкт-Петербург).

Личный вклад автора заключается в: постановке целей и задач исследования; проведении натурных и лабораторных испытаний; проведении численных экспериментов в пространственной постановке; получении зависимостей радиальных смещений стенок измерительной скважины от деформаций и напряжений в горном массиве; определении прочностных и деформационных свойств контактного взаимодействия, отражающих физически правдоподобное поведение трещиноватости; разработке методики, позволяющей определить величину и ориентацию главных напряжений естественного напряженного состояния горного массива.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 4 печатных работах (пункты списка литературы № 10 – 13), в том числе 2 статьях – в

изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (Приложение Б).

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 110 наименований, и 6 приложений. Диссертация изложена на 143 страницах машинописного текста, содержит 76 рисунков и 26 таблиц.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОГО МАССИВА

1.1 Характеристика объекта исследования

Российская Федерация, являющаяся одним из крупнейших сырьевых государств в мире, находится в условиях стремительно развивающейся горнопромышленной отрасли. Вышесказанное требует проведение ряда работ, цель которых – поиск и открытие новых месторождений, а также техническое перевооружение и дополнительное исследование ныне существующих горных предприятий.

Хибинский массив – самый крупный в мире многофазный интрузив, сложенный нефелиновыми сиенитами, карбонатитами и мельтейгит-уртитам, расположенный в центральной части Кольского полуострова и простирающийся до грабена Осло в Норвегии, пресекая Финляндию и Швецию. Массив, общей площадью 1327 км², имеет кольцевое строение и абсолютный возраст порядка 300 миллионов лет [17,30,39]. Хибинский массив включает в себя группу месторождений апатит-нефелиновых руд как магматического происхождения (Кукисвумчеррское, Юкспорское, Апатитовый цирк, Плато Расвумчорр, Коавшинское и Ньоркпахкское) (Приложение В), так и метасоматического (Поачвумчеррское и Лявойокское) [17,30,39].

Кукисвумчеррское месторождение – пластообразная линза протяженностью 2000 м по простиранию и 800 м по падению, являющаяся северо-восточной частью главного рудного поля. Рудное тело, мощность которого колеблется от 50 до 200 м, имеет среднее содержание оксида фосфора от 16 до 28%.

Юкспорское месторождение – пластообразная линза, включающая в себя Саамский участок, имеет длину 2100 м по простиранию и 700 м по падению. Средняя мощность рудного тела составляет 100 м.

Месторождение Апатитовый цирк – вытянутая пластообразная линза протяженностью 2500 м, имеющая сложное тектоническое строение. Общая мощность рудного тела находится в диапазоне от 10 до 120 м с содержанием оксида фосфора порядка 18%.

Плато Расвумчорр – одно из крупнейших месторождений Хибин, протяженность рудного тела которого составляет 3200 м мощностью порядка 60 м.

Коавшинское месторождение – четыре горизонта апатит-нефелиновых руд общей протяженностью 3000 м и мощностью 160 – 170 м.

Ньоркпахкское месторождение – группа разрозненных апатит-нефелиновых рудных тел, суммарная протяженность которых составляет порядка 3000 м.

Поачвумчерское и Лявойокское месторождения – метасоматические образования, рудное тело которых имеет протяженность порядка 700 м мощностью 5 – 10 м [17,30,39].

На вышеперечисленных месторождениях рудное тело (апатитовую залежь) подстилают уртиты и ийолиты, формируя извилистый, неровный контакт, характеризующийся постоянными переходами между различными литотипами. Такое строение является результатом вулканической активности, выветривания и проявления тектонических процессов, что способствовало формированию сложного естественного гравитационно-тектонического поля напряжений Хибинского массива [25,90].

1.2 Анализ теоретического представления об естественном гравитационно-тектоническом поле напряжений

Как было отмечено ранее, Хибинский массив – сложная интрузия, естественное напряженное состояние которого, характеризуется гравитационно-тектоническим полем напряжений [25].

Естественное напряженное состояние горного массива в верхней части земной коры определяется действием гравитационного и тектонического полей. Первое подчиняется закону всемирного тяготения и приравнивается к весу вышележащего столба горных пород, второе обусловлено наличием градиента тектонического движения, т.е. неравномерного распределения в пространстве скорости деформация земной коры [75,89].

Напряжение представляет собой физическую величину, количественно характеризующую интенсивность внутренних сил, возникающих в сплошной среде под действием внешних нагрузок (1.1):

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (1.1)$$

где F – действующая сила; S – единичная площадь.

В классическом континуальном подходе определение параметров напряженного состояния осуществляется посредством анализа элементарного объема среды с последующим осреднением в макроскопическом масштабе и описываются тензором напряжений второго ранга (1.2), включающим в себя шесть независимых компонент ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$) в произвольной системе координат (x, y, z) [80].

$$T_\sigma = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix} \quad (1.2)$$

В предположении отсутствия вращательного момента тензор напряжений обладает свойством симметрии. Нормальные напряжения ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$), соответствующие диагональным компонентам тензора, характеризуют сжимающие (отрицательные значения) или растягивающие

(положительные значения) усилия, действующие перпендикулярно площадке осреднения единичного объема. Касательные напряжения (τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{xz}), представленные внедиагональными компонентами, описывают напряжения, действующие параллельно данной площадке. Знак касательных напряжений определяется их ориентацией относительно выбранной системы координат. Положительное значение присваивается в случае, когда направление касательного напряжения на координатной площадке (с внешней нормалью, совпадающей с положительным направлением одной из осей) соответствует положительному направлению другой координатной оси. Отрицательное значение фиксируется при несовпадении указанных направлений. Данное правило знаков обеспечивает однозначность математического описания напряженного состояния. Также поле напряжений может быть представлено тремя взаимно перпендикулярными главными напряжениями (σ_1 , σ_2 , σ_3) и их направлениями (рисунок 1.1).

В массиве горный пород давление описывается зависимостью (1.3):

$$P = \gamma \cdot H, \quad (1.3)$$

где γ – средний объемный вес горной породы; H – рассматриваемая глубина.

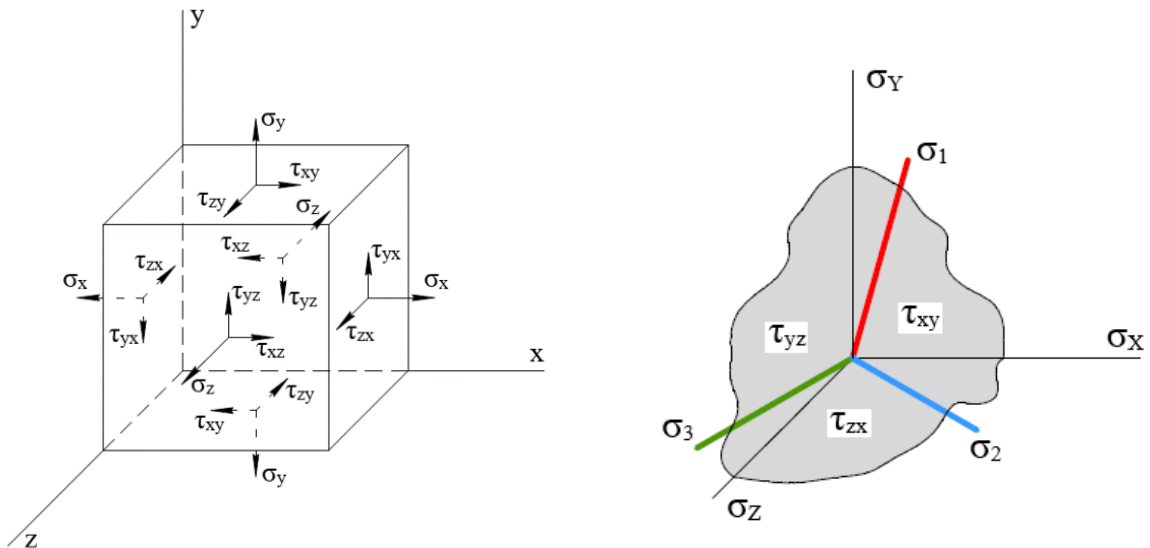


Рисунок 1.1 – Возможная ориентация главных, нормальных и касательных напряжений

Исходя из чего вертикальная компонента гравитационного поля напряжений рассчитывается на основании зависимости (1.4):

$$\sigma_y = \gamma \cdot H \quad (1.4)$$

Исходя из предположения о недеформированности элементарного объема в горизонтальном направлении ($\epsilon_x = \epsilon_z = 0$) горизонтальные компоненты поля напряжений определяются на основании зависимости (1.5):

$$\sigma_x = \sigma_z = \frac{\nu}{1 - \nu} \cdot \sigma_y = \lambda \cdot \sigma_y, \quad (1.5)$$

где λ – коэффициент бокового давления.

Тектоническое движение Земли связано с влиянием космических и глубинных факторов: различная неоднородность земной коры (механическая, тепловая, вещественная и т.д.), положение полюсов Земли и неравномерность ее вращения [52,56]. Результатом непрерывного движения земной коры являются глубинные разломы и разрывы, выделенные в две пары сопряженных систем: ортогональную (широтное и меридиональное направления) и диагональную (направления с северо-запада на юго-восток и с северо-востока на юго-запад). Ориентация представленных систем связана с действием тангенциальных сил, обусловленных вращением Земли.

Геолого-структурному формированию земной коры на всех этапах сопутствовало тектоническое движение ее составляющих, которые проявляются в виде пульсации, колебаний, волнового, блокового, складчатого и глыбового движений. В настоящее время исследователи выделяют два типа тектонических движений [45]: скачкообразные (землетрясения) и медленные (вековые).

Современные геодинамические процессы характеризуются дифференцированными скоростями вертикальных перемещений земной коры, варьирующимися в диапазоне от миллиметров до сантиметров в год. Параллельно наблюдаются горизонтальные тектонические смещения, величина которых может достигать нескольких сантиметров в год, в отдельных случаях превосходя по интенсивности вертикальные компоненты перемещения.

Вышеперечисленные процессы, а именно неравномерное вращение Земли, проявление глубинных процессов, сейсмические явления, силы атмосферного давления, перемещение континентов и т.д. формируют сложное тектоническое поле напряжений, отличительной чертой которого является превышение значений горизонтальных компонент напряжений над вертикальными в несколько раз, что подтверждается результатами экспериментальных измерений, проведенных на Кольском полуострове [27].

Знание параметров естественного напряжённого состояния горного массива критически важно для обеспечения безопасности и эффективности добычных работ. Эти данные позволяют прогнозировать обрушения, горные удары и внезапные выбросы породы, а также проектировать подземные сооружения (тоннели, шахты, хранилища), выбирая оптимальные методы крепления и разработки. Без учёта естественного напряженного состояния возрастают риски аварий, деформаций конструкций и даже техногенных катастроф, таких как активизация разломов или просадки поверхности.

Кроме того, параметры естественного напряженного состояния напрямую влияют на экономику добычи полезных ископаемых и экологическую безопасность. Они определяют рациональные технологии разработки месторождений, снижая потери руды и предотвращая неконтролируемые изменения гидрогеологического режима. Таким образом, в условиях

стремительно растущей потребности в добыче полезных ископаемых особое внимание необходимо уделять изучению естественного напряженного состояния горного массива.

1.3 Анализ методов определения естественного напряженного состояния горного массива

Увеличение мощности вычислительной техники позволяет научному сообществу решать задачи в различных областях горного производства, путем создания прогнозных моделей, отражающих, полностью или частично, поведение реального исследуемого объекта. Однако, одной из фундаментальных неопределенностей в геомеханике на протяжении долгого времени является определение параметров естественного напряженного состояния горного массива. Знание о его количественных и качественных показателях позволит повысить достоверность геомеханических расчетов, так как описанные выше параметры являются исходными данными при выполнении научно-исследовательских работ.

Формирование естественного напряженного состояния горного массива обусловлено влиянием двух факторов: гравитационное воздействие и тектоническое движение земной коры. Исходя из сложности определения их взаимодействия и неоднородности горного массива при изучении его естественного напряженного состояния были разработаны подходы и методы, совершенствующиеся в настоящее время, среди которых можно выделить три основные группы: геомеханические, геофизические и геологические [5,8,55,80] (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Группы методов определения естественного напряженного состояния горного массива

Название группы методов	Механизм определения параметров естественного напряженного состояния	Преимущества	Недостатки
Геомеханические	Измерение параметров деформирования элемента горной породы в месте измерения.	- Высокая степень точности результатов. - Получение количественных и качественных параметров естественного напряженного состояния горного массива.	- Высокая трудоемкость; - Зависимость от точности измерительного оборудования; - Влияние неоднородности и анизотропии исследуемого горного массива; - Необходимость дополнительных лабораторных испытаний.

Продолжение таблицы 1.1

Название группы методов	Механизм определения параметров естественного напряженного состояния	Преимущества	Недостатки
Геофизические	Определение взаимосвязи между естественными и искусственными физическими полями горного массива, и напряжениями, действующими в нем.	- Оценка обширных областей горного массива; - Предоставление информации с учетом изменение временного промежутка измерений.	- Низкая степень точности количественных параметров естественного напряженного состояния горного массива.
Геологические	Основаны на детальном анализе геологической обстановки исследуемого участка, а также его визуальном осмотре.	- Представление качественных параметров естественного напряженного состояния горного массива; - Низкая трудоемкость.	- Невозможность определения количественных параметров естественного напряженного состояния горного массива.

1.3.1 Геомеханические методы определения естественного напряженного состояния горного массива

Геомеханические методы определения естественного напряженного состояния горного массива основаны на исследовании деформационных параметров элемента горного массива в месте измерения. Методы, входящие в данную группу, позволяют с высокой точностью определять качественные и количественные параметры естественного поля напряжений горного массива, однако требуют проведения дополнительных лабораторных испытаний кернового материала и сопровождаются высокой трудоемкостью, связанной с выполнением значительного количества буровых работ. Среди геомеханических методов выделяются две группы, основанные на различных механизмах определения деформационных параметров горного массива (рисунок 1.2): необходимо бурение измерительных скважин; необходимо создание измерительных щелей [80,91,95].

Метод полной разгрузки – исследование восстановления элемента горного массива при искусственном нарушении его связи с вмещающим массивом, в рамках теории упругости описываются зависимостью (1.6) [61,67,80]:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (1.6)$$

где σ – исходное (естественное) напряжение; ε – измеренная деформация.

Сущность метода заключается в определении деформаций, возникающих при искусственном снижении напряжений до нуля (полная разгрузка), с последующим восстановлением естественного напряженного состояния исследуемого горного массива.

Основные этапы метода полной разгрузки:

1. Формирование разгрузочной зоны (бурение скважины);
2. Измерение смещений разгружаемого элемента горного массива;
3. Определение деформаций, соответствующих измеренным смещениям;
4. Расчет естественных напряжений.

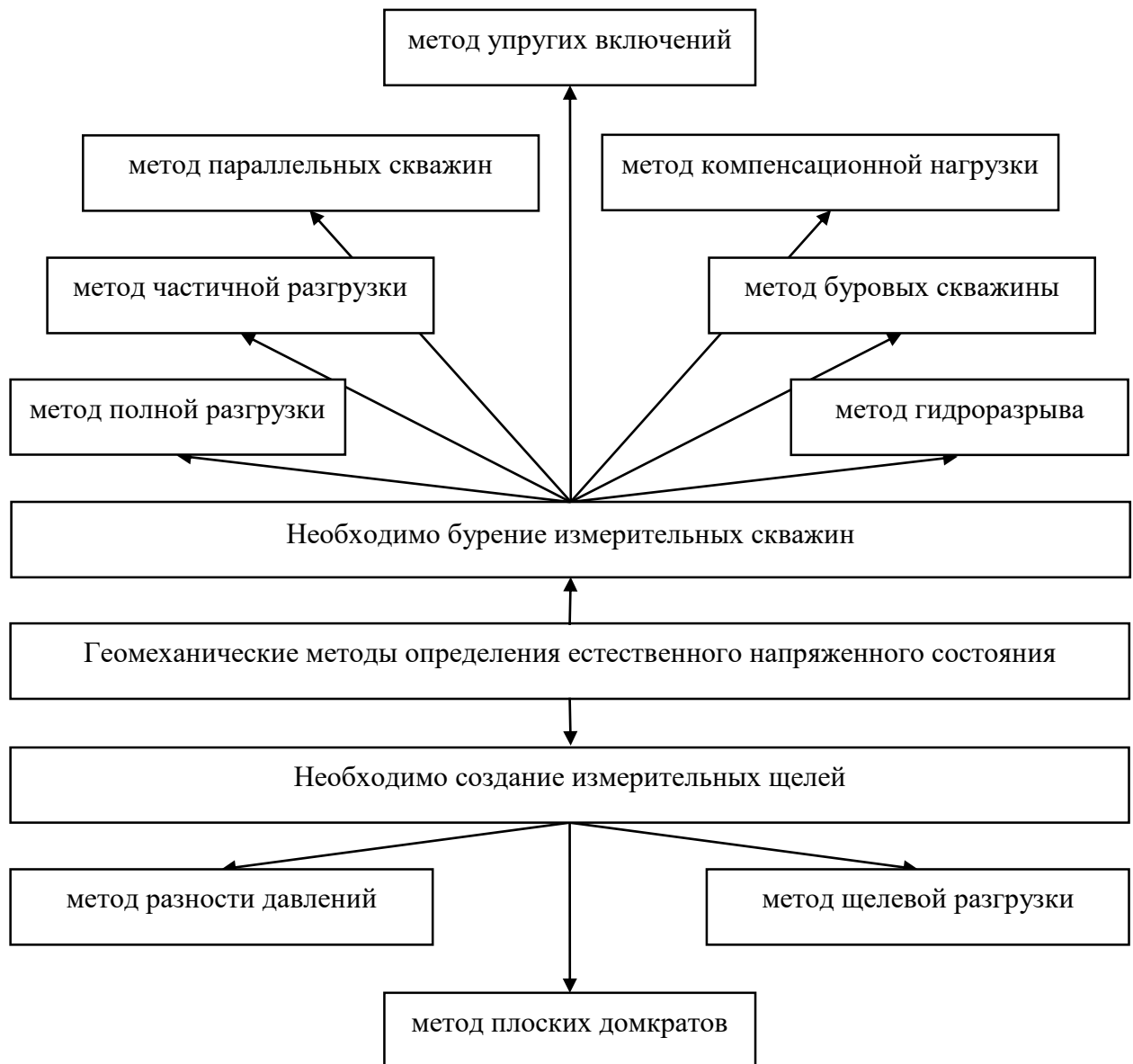


Рисунок 1.2 – Геомеханические методы определения естественного напряженного состояния горного массива

В зависимости от объекта исследования, измеряемых величин и технического исполнения выделяют следующие схемы:

1. Схема Хаста Н. основана на измерении смещений стенок пилотной скважины многокомпонентным датчиком (изменение диаметра) после кольцевого обуривания. На начальном этапе формируется пилотная скважина диаметром 40-80 мм, с последующим монтажом измерительного оборудования и обуриванием соосной скважиной диаметром 100-150 мм (рисунок 1.3.а);

2. Схема Лимана Е. аналогична схеме Хаста Н., однако измерительным оборудованием являются электротензометрические датчики, наклеенные на стенки пилотной скважины (рисунок 1.3.б);

3. Схема ВНИМИ основана на измерении деформаций торца пилотной скважины после кольцевого обуривания розетками, включающими в себя три электротензометрических датчика. Для получения необходимых данных на месте измерения пробуриваются три ортогональные пилотные скважины диаметром 76-80 мм, забои которых шлифуются специальной коронкой, формируя гладкую поверхность для установки измерительного оборудования. Затем производится обуривание торца пилотной скважины коронкой, и как следствие полная разгрузка исследуемого элемента горного массива (рисунок 1.3.в).

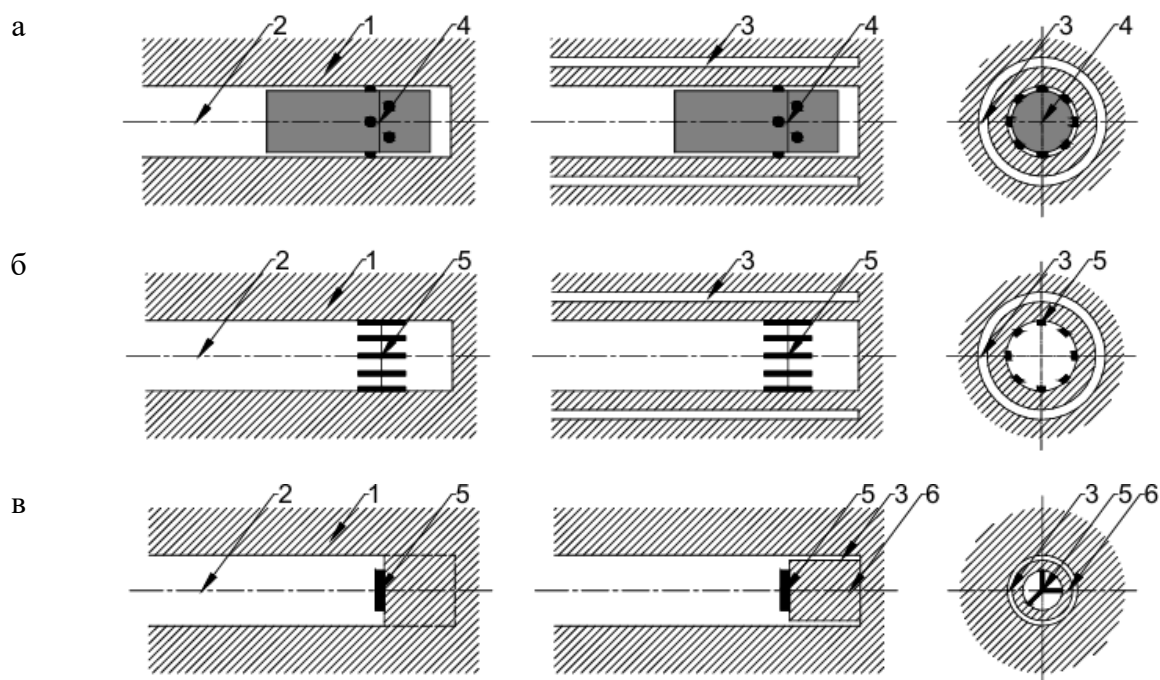


Рисунок 1.3 – Схемы измерения естественного напряженного состояния горного массива методом полной разгрузки; а – схема Хаста Н., б – схема Лимана Е., в – схема ВНИМИ; 1 – горный массив, 2 – пилотная скважина, 3 – кольцевая щель, 4 – многокомпонентный датчик, 5 – электротензометрические датчики, 6 – керн

Для получения достоверных результатов при применении методов полной разгрузки необходимо исключить влияние выработанного пространства, а также влияния горного массива путем увеличения глубины измерения, подбора оптимального соотношения размеров пилотной

скважины и соосной скважины большего диаметра, формируемой при обустройстве, выбора места установки измерительного оборудования.

Метод частичной разгрузки основан на мониторинге деформационных процессов в приконтурной области горной выработки, где создается зона частичной разгрузки посредством бурения центральной измерительной скважины. Этот метод реализуется в двух основных вариантах: с использованием либо наклеиваемых тензометрических датчиков, обеспечивающих непрерывный мониторинг деформаций, либо съемных тензометров, позволяющих проводить дискретные измерения в заданных точках массива (рисунок 1.4) [24,80].

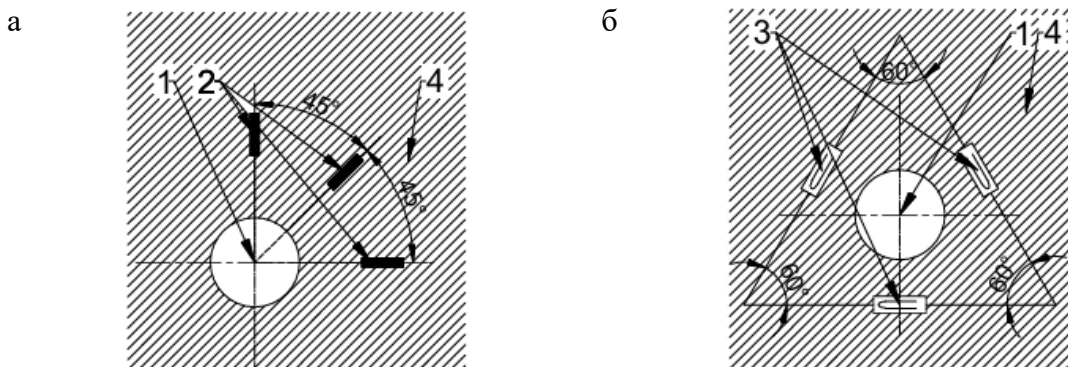


Рисунок 1.4 – Схемы измерения естественного напряженного состояния горного массива методом частичной разгрузки; а – с применением наклеиваемых тензодатчиков, б – с применением съемных тензометров; 1 – измерительная скважина, 2 – тензодатчики, 3 – тензометры, 4 – горный массив

Помимо методов частичной разгрузки, основой которых является инструментальное измерение, существует **метод частичной разгрузки на большой базе**, где в качестве измерительной скважины принимается горная выработка с последующим определением деформации ее стенок относительно ее длины [24,80].

Описанные методы отличаются низкой трудоемкостью, так как не требуют проведения большого количества буровых работ, однако, значительное влияние на точность измеряемых показателей оказывает горная выработка и горно-геологические условия.

Метод параллельных скважин подразумевает измерение радиальных смещений стенок пилотной скважины (скважины меньшего диаметра), формируемых соосно пробуренной скважине большего диаметра (рисунок 1.5) [80,81,87].

При применении метода параллельных скважин решается задача теории упругости о напряженно-деформированном состоянии упругой среды, содержащей два цилиндрических отверстия, при условии пренебрежения осевой компонентой напряжений. В процессе экспериментальных исследований определяются упругие константы и компоненты напряжений, действующие в нормальной плоскости относительно продольной оси скважины. Метод

параллельных скважин позволяет проводить измерения на различной глубине горного массива, что исключает влияние горной выработки.

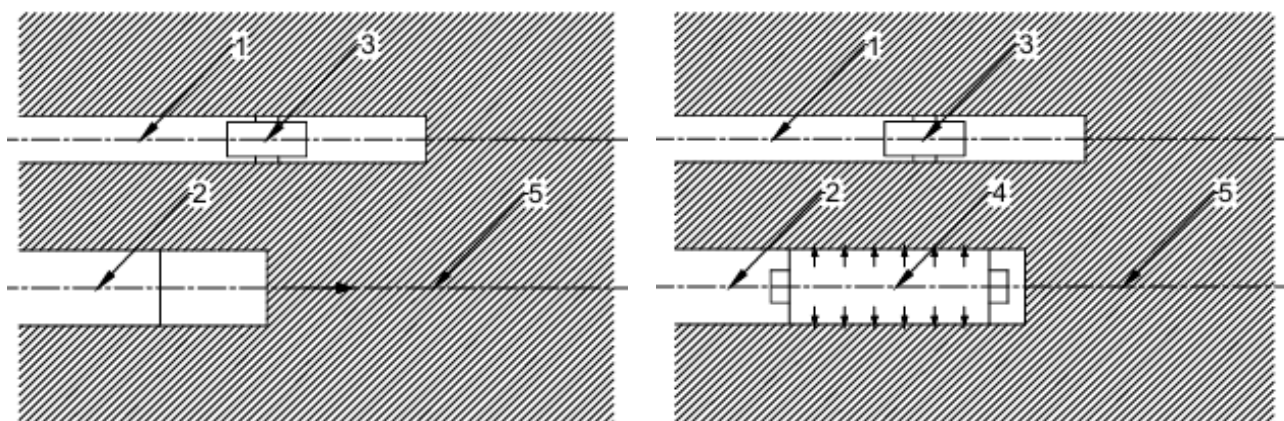


Рисунок 1.5 – Схемы измерения естественного напряженного состояния горного массива методом параллельных скважин; 1 – измерительная скважина, 2 – разгрузочная скважина, 3 – измерительное оборудование, 4 – нагнетательное устройство (гидробаллон), 5 – горный массив

Метод буровых скважин представляет собой экспериментальный подход, основанный на точном измерении компонент упругой деформации в стенках пилотной скважины, возникающих в результате воздействия при ведении горных работ. Из борта выработки на определенную глубину пробуривается измерительная скважина с последующим монтажом измерительного оборудования. При применении метода буровых скважин выделяется два способа проведения измерения, зависящих от определяемой величины: абсолютные значения напряжений, действующих в горном массиве и приращение напряжений, вызванное горно-технологическими процессами. В первом случае измерительное оборудование искусственно пригружается. Во втором случае измерительное оборудование дополнительно распирается в скважины с целью формирования прочного контакта с горным массивом [80,100].

Метод гидроразрыва (метод гидравлического разрыва пласта) представляет собой адаптированную методику определения естественного напряженного состояния горного массива, изначально разработанную для нефтедобывающей отрасли с целью интенсификации притока углеводородов посредством создания искусственной трещиноватости в продуктивном пласте. Из горной выработки в глубь массива пробуривается исследовательская скважина, соосная одному из главных напряжений с последующим монтажом измерительного оборудования. Далее формируется камера разрыва (межпакерный интервал), в которую нагнетается рабочая жидкость до критического давления гидроразрыва (рисунок 1.6). В результате формируется трещина, совпадающая с направлением максимального сжимающего напряжения, действующего в плоскости, ортогональной оси скважины [28,80,100].

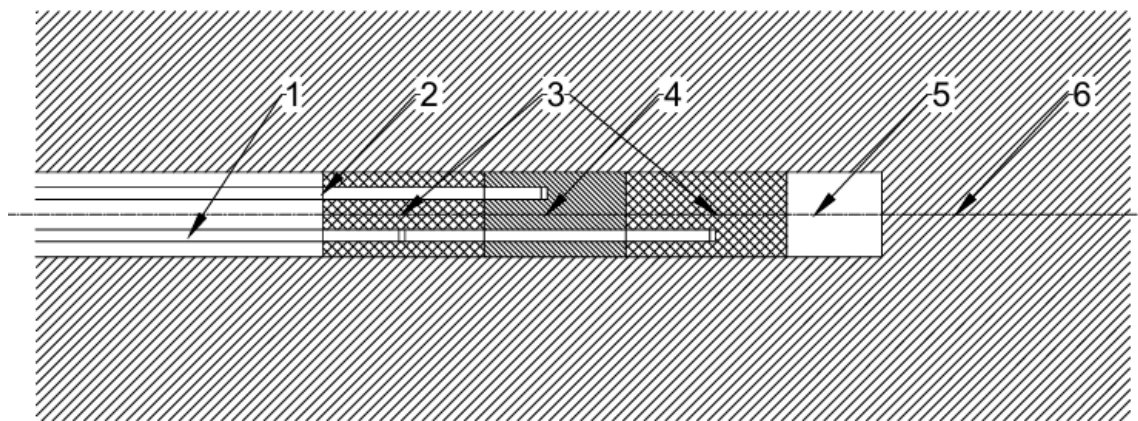


Рисунок 1.6 – Схема измерения естественного напряженного состояния горного массива методом гидроразрыва; 1 – трубопровод подачи сжатого воздуха, 2 – трубопровод подачи рабочей жидкости, 3 – нагнетательный пакер, 4 – зона действия рабочей жидкости, 5 – измерительная скважина, 6 – горный массив

Сущность метода **щелевой разгрузки** заключается в измерении расстояния между двумя реперами, установленными на борту выработки, до и после формирования разгрузочной щели (рисунок 1.7). В качестве бурового оборудования используются дисковые пилы (разгрузочная щель имеет форму полудиска), буры мелкого диаметра (разгрузочная щель формируется за счет удаления перемычек между отверстиями) [14,80].

На основании проведенных полевых испытаний определяются компоненты напряжений, перпендикулярные плоскости разгрузочной щели (зависимость 1.7):

$$\sigma_n = \frac{E \cdot \Delta}{k \cdot b_p}, \quad (1.7)$$

где Δ – смещение между реперами, реализующиеся при разгрузке; k – безразмерный коэффициент, характеризующий степень разгрузки массива горных пород при выбранном расстоянии между реперами; b_p – расстояние между реперами.

Метод щелевой разгрузки требует меньше трудозатрат в сравнении с методами, где необходимо бурение измерительных скважин, однако исследования проводятся в зоне действия горной выработки, что необходимо учитывать при последующем определении естественного напряженного состояния горного массива.

Метод плоских домкратов – усовершенствование метода щелевой разгрузки, вследствие уменьшения влияния локальных неоднородностей массива на определяемые параметры. Последовательность выполнения исследовательских работ на начальных этапах аналогична описанному ранее методу. Однако после повторного измерения расстояния между реперами в сформированную разгрузочную щель монтируется плоский гидродомкрат с последующим увеличением давления. В результате величина давления, необходимая для возврата реперов в

начальное положение (деформации исследуемого участка горного массива, образованные разгрузочной щелью равны нулю), является величиной нормального напряжения, действующего на стенки горной выработки. Для определения достоверных данных о естественном напряженном состоянии горного массива необходимо провести измерения в шести независимых направлениях [24,80].

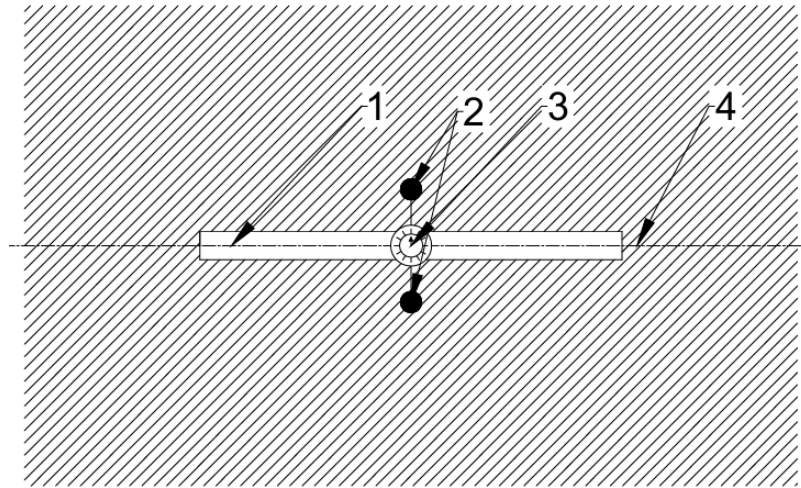


Рисунок 1.7 – Схема измерения естественного напряженного состояния горного массива методом щелевой разгрузки; 1 – разгрузочная щель, 2 – измерительные репера, 3 – деформометр

Метод компенсационной нагрузки схож по механизму определения естественного напряженного состояния горного массива с методом плоских домкратов и основан на первоначальном снятии и последующем искусственном нагружении исследуемого участка. Изначально на исследуемой области перпендикулярно друг другу устанавливаются индикаторы с начальными значениями. После горный массив разгружают, путем формирования разгрузочных щелей (значения индикаторов меняется) и специальным нагрузочным оборудованием подают компенсационное давление (индикаторы возвращаются к начальным значениям). Величина приложенного компенсационного давления соответствует значению напряжений, действующих в исследуемом массиве горных пород. Данный метод обеспечивает прямую оценку нормальной компоненты напряжений относительно плоскости обнажения. Необходимо отметить, что в связи с анизотропией горных пород, сложно добиться начальных параметров одновременно на обоих индикаторах, а также исключить влияние горной выработки [24,80].

Принцип действия **метода разности давлений** базируется на регистрации разности между текущими и начальными показаниями гидравлических датчиков, что позволяет количественно оценить изменение напряженного состояния массива во времени. Особенностью методики является возможность дифференцированной оценки влияния различных

производственных факторов на напряженно-деформированное состояние горного массива. (рисунок 1.8) [80,87].

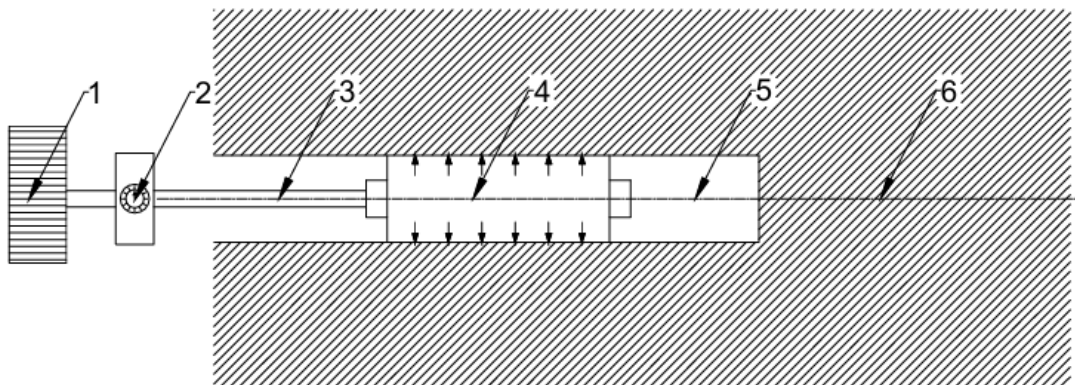


Рисунок 1.8 – Схема измерения естественного напряженного состояния горного массива методом разности давлений; 1 – жидкостный насос, 2 – прессрасходомер, 3 – трубопровод рабочей жидкости, 4 – нагнетательное устройство (гидробаллон), 5 – измерительная скважина, 6 – горный массив

Метод упругих включений представляет собой экспериментальный подход к оценке изменения напряженного состояния горного массива, основанный на оптико-механическом принципе измерений. Методика реализуется посредством следующих ключевых этапов: установка фотоупругих тензометрических датчиков в исследуемый массив; воздействие механической нагрузкой на измерительную систему; анализ оптических характеристик в поляризованном свете. Метод позволяет проводить как качественный (по ориентации изоклин), так и количественный (по плотности изохром) анализ напряженного состояния исследуемого массива. Для определения естественного напряженного состояния горного массива метод упругих включений должен использоваться в сочетании с методом полной или частичной разгрузки [24,80].

Сравнительные характеристики геомеханических методов определения естественного напряженного состояния горного массива, выявленные на основании анализа отечественных и зарубежных исследований, представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Сравнительные характеристики геомеханических методов оценки естественного напряженного состояния горного массива

Название метода	Объект исследования	Измеряемые величины	Средства измерения
Схема Хаста	Стенки пилотной скважины	Диаметр скважины	Тензометрические, магнитострикционные, емкостные датчики
Схема Лимана	Стенки пилотной скважины	Смещения на поверхности скважины	Тензометрические датчики

Продолжение таблицы 1.2

Название метода	Объект исследования	Измеряемые величины	Средства измерения
Схема ВНИМИ	Стенки торца скважины	Смещения разгрузки на торце скважины	Тензометрические или фотоупругие датчики
Частичная разгрузка	Участок стенки выработки или ниши	Деформация участка стенки выработок	Тензометрические датчики
Метод параллельных скважин	Стенки скважины	Диаметр скважины	Манометры, электроманометры, тензометрические датчики
Метод буровых скважин	Стенки скважины	Диаметр скважины	Тензометрические, струнные, индуктивные, емкостные деформометры
Метод гидроразрыва	Стенки скважины	Направления и величины трещин	Портальный пакер, Манометры, электроманометры
Метод щелевой разгрузки	Участок горного массива	Расстояние между реперами	Деформометры, механические индикаторы часового типа
Метод плоских домкратов	Участок горного массива	Давление, создаваемое в домкрате	Манометры, электроманометры, тензометрические датчики
Метод компенсационной разгрузки	Участок горного массива	Деформация упругого восстановления участка массива. Давление в гидравлической системе	Тензометрические датчики и механические индикаторы часового типа, манометры, электроманометры
Метод разности давлений	Стенки скважины	Давление в гидравлической системе	Манометры, электроманометры, тензометрические датчики
Метод упругих включений	Стенки скважины	Нагрузка на упругий динамометр	Фотоупругие тензометрические динамометры

1.3.2 Геофизические методы оценки естественного напряженного состояния горного массива

Геофизические методы оценки естественного напряженного состояния основаны на изучении физических полей горного массива и их взаимодействии с параметрами исходного напряженного поля. Основные геофизические методы представлены на рисунке 1.9 [2,26,29]

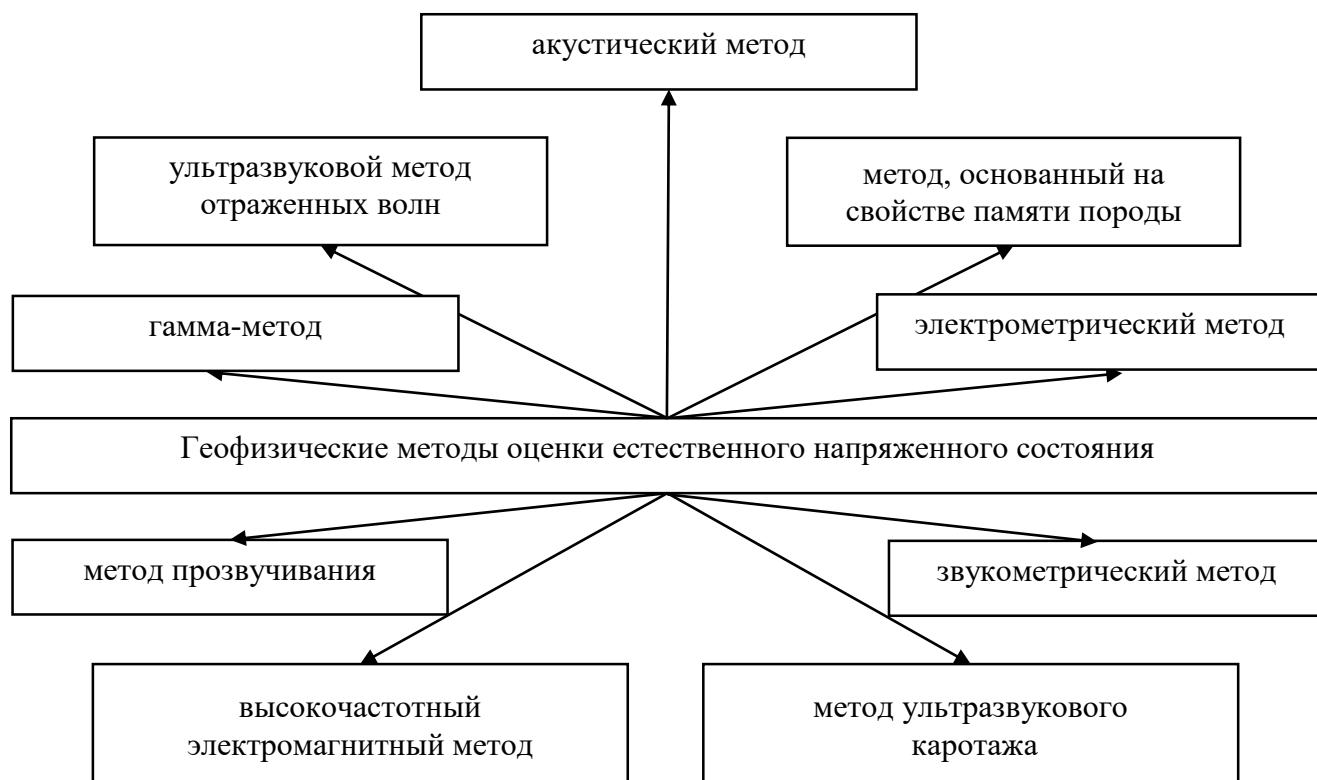


Рисунок 1.9 – Геофизические методы оценки естественного напряженного состояния горного массива

Гамма-метод основан на анализе явления ослабления радиоактивного излучения с увеличением плотности горных пород, которая зависит от напряжений, действующих в исследуемом массиве. Исходя из малой проникающей способности горных пород наибольшее распространение получили три типа описываемого метода: метод широкого пучка; метод узкого пучка; метод рассеянного гамма-излучения [97].

При применении **метода широкого пучка** формируется ряд параллельных шпуров глубиной не более трех метров с последующей установкой газоразрядных счетчиков с интегрирующими радиометрами. Измерительное оборудование позволяет фиксировать первичное и рассеянное излучение, что позволяет использовать данный метод в подземных условиях [2].

Метод узкого пучка характеризуется технологической сложностью аппаратной реализации, что обусловлено необходимостью обеспечения: высокой коллимации излучения; точной геометрии измерительной системы. Основным принцип метода заключается в регистрации исключительно первичного (нерассеянного) излучения, прошедшего через контролируемый слой горной породы. Широкое применение нашел при проведении лабораторных испытаний образцов горной породы [4].

Метод рассеянного гамма-излучения представляет собой радиометрический подход для определения плотностных характеристик горных пород, основанный на регистрации вторичного (рассеянного) излучения. Методика реализуется посредством следующих конструктивных и технологических особенностей: специализированная конструкция измерительного зонда; физический принцип действия.

Необходимо отметить, что гамма-метод способен предоставить элементарную (первичную информацию о напряженном состоянии горного массива, которая зависит от состояния исследуемого массива и энергии излучения [26].

Ультразвуковые методы определения напряженного состояния горного массива основаны на изучении взаимодействия ультразвукового излучения (ультразвуковых колебаний) с естественными полями горного массива. Выделяется три основных типа ультразвуковых метода: метод отраженных волн; метод ультразвукового каротажа; метод ультразвуковых проходящих волн (метод прозвучивания) [59].

Метод отраженных волн позволяет определить значения ультразвукового сигнала, отраженного от естественного поля горного массива или искусственной неоднородности. Однако применение данного метода ограничено значительной потерей мощности фиксируемого ультразвукового сигнала, при его отражении от породного обнажения [60].

Сущность **метода ультразвукового каротажа** заключается в исследовании акустических свойств горного массива зондом, установленным в заранее сформированную скважину. Измерительное оборудование, включающие в себя излучатель ультразвукового сигнала и один или несколько приемников, перемещается относительно продольной оси скважины, фиксируя изменение отношения исходящего и отраженного (получаемого) сигнала. Характер описанной неоднородности позволяет оценить распределение напряжений горного массива в плоскости перпендикулярной оси скважины [21].

Метод ультразвуковых проходящих волн (метод прозвучивания) основан на измерении пространственного распределения ультразвукового сигнала. В исследуемой области горного массива формируется вруб кругового, либо треугольного очертания (от трех до девяти шпуров) с последующим монтажом измерительного оборудования. В отличие от ультразвуковых методов, описанных ранее, в настоящем методе реализовано применение нескольких зондов, где один является источником ультразвукового сигнала, а второй приемником. В ходе проведения полевых измерений зонды синхронно и соосно перемещаются вглубь массива, фиксируя пространственное распределение ультразвукового сигнала, отражающие распределение поля напряжений исследуемой области. Метод прозвучивания является наиболее распространенным ультразвуковым методом, исходя из достаточно совершенного методического и аппаратного

обеспечения, а также возможности предоставления комплексной информации о напряженном состоянии горного массива [101].

Горный массив под действием напряжений подвержен микроразрушению с последующей генерацией упругих звуковых импульсов, детальный анализ которых оказал существенное влияние на развитие **акустического метода** определения свойств и поведение горного массива. Сущность настоящего метода заключается в фиксировании неоднородности скорости упругих волн в материалах с различными физико-механическими свойствами, что характеризует изменение напряженного состояния исследуемого горного массива [2].

Метод, использующий эффект механической памяти горных пород, основан на фундаментальном свойстве массива сохранять реологическую информацию о предшествующих напряженно-деформированных состояниях в виде структурных изменений кристаллической решетки и накопленных дефектов. Данный подход позволяет реконструировать историю нагружения породного массива через анализ характерных особенностей его деформационного отклика и структурных преобразований, возникающих в результате длительного воздействия механических напряжений [46,62].

Электрометрические методы основаны на исследовании изменения величины удельного сопротивления с ростом давления в породах с различными литотипами для определения напряженного состояния горного массива (зависимость 1.8):

$$\rho_m = \frac{R_{обр} \cdot S}{b_{обр}}, \quad (1.8)$$

где $R_{обр}$ — объемное сопротивление образца; S — площадь электрода; $b_{обр}$ — толщина образца.

Данные методы основаны на изучении особенностей электролитической проводимости горных пород, которые в большинстве случаев проявляют диэлектрические свойства. Основные электрометрические методы, получившие широкое распространение в подземных условиях: активный контактный метод; пассивный контактный метод; активный бесконтактный метод; индукционный метод; индуктивный метод; пассивный бесконтактный метод [1].

Высокочастотные электромагнитные методы применяются для решения широкого спектра поставленных задач, в том числе и геомеханических, и геотехнических, исходя из больших возможностей использования, обусловленных волновой природой. Основой настоящих методов является исследование магнитной проницаемости горного массива. Выделяются следующие типы высокочастотных электромагнитных методов, применяемых в подземных условиях: метод радиоволнового профилирования; метод радиоволнового просвечивания; метод радиоволнового зондирования [1].

Звукометрический метод представляет собой акустический подход к исследованию напряженно-деформированного состояния горного массива, основанный на анализе параметров

распространения упругих волн. Метод позволяет оценивать: динамику изменения напряженного состояния; зоны структурных нарушений; эффективность мероприятий по управлению массивом. Ограничения метода связаны с необходимостью: тщательной подготовки измерительной базы; учета региональных особенностей пород; комплексной интерпретации с другими методами. Однако перед натурными измерениями проводится ряд лабораторных исследований на образцах горной породы, чтобы определить вышеописанную взаимосвязь [47].

Сравнительные характеристики геофизических методов оценки естественного напряженного состояния горного массива представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Сравнительные характеристики геофизических методов оценки естественного напряженного состояния горного массива

Название метода	Объект исследования	Измеряемые величины	Средства измерения
Гамма-метод	Естественное физическое поле участка горного массива	Изменение радиоактивного излучения	Интегрирующие радиометры, зонды
Ультразвуковой метод отраженных волн	Естественное и искусственное физические поля участка горного массива	Изменение ультразвукового сигнала	Зонды, излучатели и приемники ультразвукового сигнала
Метод ультразвукового каротажа	Естественное и искусственное физические поля участка горного массива	Изменение акустических параметров	Зонды, излучатели и приемники ультразвукового сигнала
Метод прозвучивания	Естественное физическое поле участка горного массива	Пространственное распределение акустического сигнала	Зонды, излучатели и приемники ультразвукового сигнала
Акустический метод	Естественное физическое поле участка горного массива	Изменение скорости упругих волн	Акустические зонды
Метод, основанный на свойстве памяти горных пород	Естественное и искусственное физические поля участка горного массива	Изменение деформационных параметров	Зонды, деформометры
Электрометрический метод	Электролитическая проводимость горного массива	Изменение удельного сопротивления	Кондуктометры, апекслокаторы
Высокочастотный электромагнитный метод	Естественное магнитное поле горного массива	Магнитная проводимость	Магнитометры
Звукометрический метод	Естественное и искусственное физические поля участка горного массива	Изменение акустического сигнала	Зонды, излучатели и приемники ультразвукового сигнала

1.3.3 Геологические методы оценки естественного напряженного состояния горного массива

Методы, входящие в данную группу, основаны на визуальной оценке, а также опыте исследователя. Являются наименее трудоемкими, однако не способны предоставить количественные параметры естественного напряженного состояния горного массива (рисунок 1.10) [53,107].



Рисунок 1.10 – Геологические методы оценки естественного напряженного состояния горного массива

Визуальный метод основан на изучение поведения почвы, кровли и бортов горных выработок в подземных условиях без применения специального измерительного оборудования. В процессе наблюдения производятся зарисовки, отмечаются характерные деформации вмещающих пород и крепей. Повысить степень достоверности определяемых параметров позволяет метод фотофиксации – фотографирование исследуемого явления. Сравнительный анализ серийных фотографических изображений, выполненных в различные временные периоды, позволяет провести: качественную оценку кинематики деформационных процессов; визуальную документацию динамики смещений контура горной выработки; фиксацию пространственно-временных изменений геометрии подземных сооружений. Метод рекомендуется применять исключительно для качественного анализа деформационных процессов в комплексе с другими инструментальными методами контроля [3].

Метод контурных реперов основан на определении расстояния между реперами (металлические стержни длиной 0,3 – 0,5 м). Сущность метода заключается в измерении изменения расстояния между контрольными точками в заданном временном промежутке. При выполнении полевых исследований проводятся работы по нивелированию одного из заложенных реперов относительно неподвижных реперов околоствольного двора, с целью расчета абсолютных значений перемещений горного обнажения [53].

Для определения параметров смещения горного массива на различном удалении от породного обнажения научным сообществом был разработан **метод глубинных реперов**, заключающийся в измерении перемещения контрольных точек исследовательского оборудования (реперов), установленного в заранее пробуренной скважине. Относительные величины смещения горного массива определяются на основании взаимного перемещения

глубинных реперов относительно друг друга в пределах одной скважины (репер большей длины считается неподвижным). Абсолютные величины смещений горного массива определяются исходя из перемещения глубинных реперов относительно неподвижных реперов, расположенных в околоствольном дворе либо на поверхности [107].

Метод засечек (метод треугольников) основан на измерении расстояния между засечками, нанесенными на металлических арках, и точками на головках рельсового пути. Для определения абсолютных значений смещений крепи горной выработки необходимо производить нивелирование отметок рельсового пути [53].

Сравнительные характеристики геологических методов оценки естественного напряженного состояния горного массива представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Сравнительные характеристики геологических методов оценки естественного напряженного состояния горного массива

Название метода	Объект исследования	Измеряемые величины	Средства измерения
Визуальный метод	Участок горного массива, крепь горной выработки	Смещение участка породного обнажения (крепи)	Фотоаппаратура, рулетки, линейки
Метод контурных реперов	Участок горного массива, крепь горной выработки	Расстояние относительно реперов	Рулетки, линейки, нивелиры, деформометры
Метод глубинных реперов	Участок горного массива	Расстояние относительно реперов	Кондукторы, деформометры
Метод засечек	Участок горного массива, крепь горной выработки	Расстояние относительно контрольных точек (засечек)	Рулетки, линейки, нивелиры

1.4 Анализ подходов к реконструкции тектонических напряжений горного массива

Необходимость в изучении механизмов формирования месторождений полезных ископаемых требовала от исследователей развития знаний о напряженном состоянии горного массива, где активно проявляется тектоническое воздействие [40,45]. В середине XX столетия М.В. Гзовским была установлена фундаментальная корреляционная зависимость между кинематикой формирования тектонических структур и эволюцией компонент тензора напряжений. Данное открытие потребовало разработки специального математического аппарата для решения обратной задачи – реконструкции полей напряжений по совокупности наблюдаемых дизъюнктивных нарушений. Полученные результаты позволили: установить количественные закономерности; разработать критерии оценки напряженного состояния; создать методику интерпретации разрывных нарушений [15,41].

В рассматриваемом подходе трещины представляют собой своеобразные тензодатчики, в отличие от ранее рассмотренных методов, где измерительное оборудование – различные датчики, репера и т.д.

На основе анализа механизмов трансформации структурно-кинематических данных о трещинообразовании и разрывных нарушениях в параметры напряженного состояния горных пород можно систематизировать существующие подходы в три методологические группы [7]:

1. Методы расчета деформаций трещинообразования.
2. Методы дислокационного моделирования.
3. Методы структурно-кинематического анализа.

Первые две группы методов обеспечивают комплексное определение как пространственной ориентации главных осей действующего напряженного поля, так и его качественных характеристик через коэффициент Лоде-Надаи. В отличие от них, методы структурного анализа обладают ограниченной функциональностью, позволяя установить исключительно ориентационные параметры главных осей напряженного состояния.

1.4.1 Методы расчета трещинных деформаций

Научным сообществом принято выделять четыре основных метода расчета трещинных деформаций, представленных на рисунке 1.11.

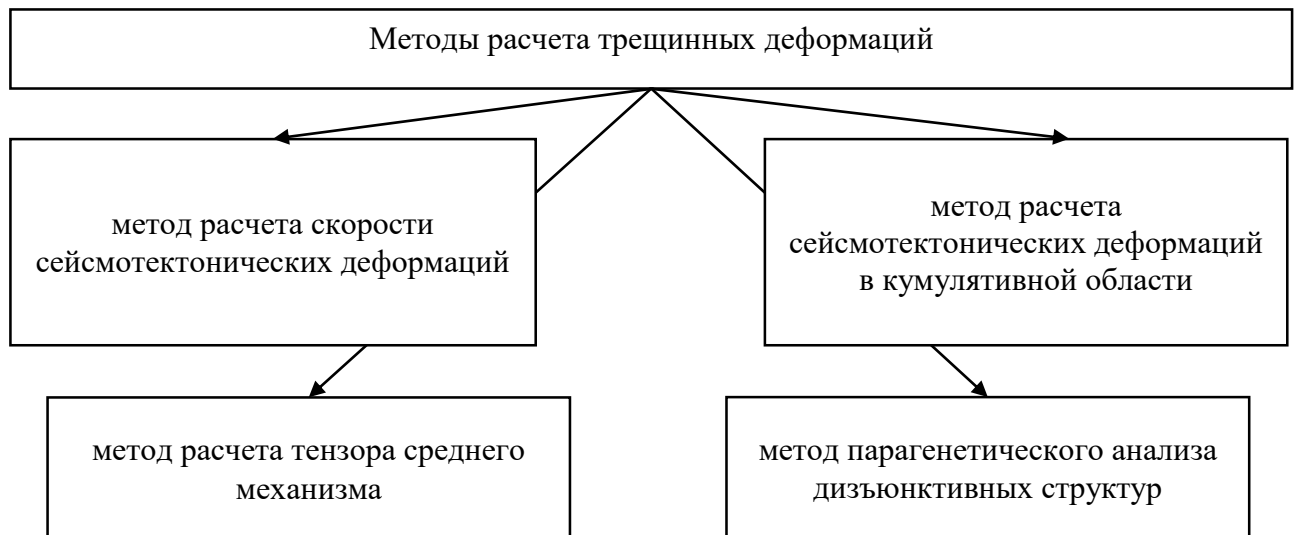


Рисунок 1.11 – Методы расчета трещинных деформаций

Метод расчета скорости сейсмостектонических деформаций базируется на концепции, согласно которой сейсмостектонические разрушения представляют собой составную часть процесса квазипластического течения горных масс. На основании вышеизложенного тензор скорости необратимых деформаций, реализованных за счет землетрясения, имеет вид зависимости (1.9):

$$S_{ij} = \frac{1}{2 \cdot \Delta V \cdot \Delta T} \cdot \sum_{\alpha=1}^A \bar{U}^{\alpha} \cdot \Omega^{\alpha} \cdot (l_{ni}^{\alpha} \cdot l_{sj}^{\alpha} + l_{nj}^{\alpha} \cdot l_{si}^{\alpha}), \quad (1.9)$$

где ΔV — объем горного массива; ΔT — интервал времени измерения; $\bar{U}^{\alpha}$ — средняя величина подвижки; Ω^{α} — площадь разрыва (трещины); $l_{ni}^{\alpha}, l_{sj}^{\alpha}, l_{nj}^{\alpha}, l_{si}^{\alpha}$ — проекции единичных векторов нормали к плоскости разрыва и подвижки по ней.

В результате развития предложенного метода была установлена взаимосвязь относительно площади разрыва и магнитуды землетрясения, позволившая определить механизм перехода к параметрам тектонического напряженного состояния горного массива [34].

Метод расчета сейсмотектонических деформаций в кумулятивной области основывается на предположении, что магнитуда землетрясения определяет размер области упругой разгрузки горного массива, однако не оказывает влияние на деформации, формируемые в области действия землетрясения. Необходимо отметить, что область кумулятивного сложения (взаимное пересечение областей разгрузок, формируемых в результате землетрясений) определяет тензор приращений сейсмотектонических деформаций, а деформации, рассчитанные в пределах очага воздействия землетрясения, обратно пропорциональны расстоянию от гипоцентра [33].

В отличие от рассмотренных ранее подходов, **метод расчета тензора среднего механизма** опирается на анализ деформационных характеристик исследуемых участков литосферы в качестве ключевого критерия для оценки тектонического напряженного состояния горного массива. Данная методика предполагает статистическую обработку параметров деформации структурных элементов литосферы, включенных в репрезентативную выборку, что позволяет реконструировать интегральный тензор напряжений (зависимость 1.10) [51]:

$$P_{ij} = \frac{1}{2 \cdot A} \cdot \sum_{\alpha=1}^A (l_{ni}^{\alpha} \cdot l_{sj}^{\alpha} + l_{nj}^{\alpha} \cdot l_{si}^{\alpha}), \quad (1.10)$$

где A — число событий, участвующих в выборке.

Метод парагенетического анализа дизъюнктивных структур базируется на установлении корреляционных зависимостей между компонентами тензора тектонических напряжений и литологическими комплексами, объединенными общностью генезиса и условий формирования. Методологическая основа включает следующие положения: теоретические предпосылки; аналитические принципы; практическая реализация [44].

1.4.2 Методы дислокационного анализа

Группа методов дислокационного анализа представлена четырьмя методами (рисунок 1.12) [22].



Рисунок 1.12 – Методы дислокационного анализа

Метод экстремума функции однородности основан на определении максимума функции совместности, которая формализует степень согласованности структурно-кинематических параметров трещиноватости в пределах исследуемого массива. В основе подхода лежит математический анализ совокупности характеристик сколовых трещин из репрезентативной выборки, позволяющий количественно оценить их пространственную и кинематическую согласованность. Максимизация данной функции обеспечивает оптимальное решение задачи идентификации преобладающих направлений напряжений, ответственных за формирование наблюдаемой трещинной структуры. Данная зависимость имеет вид (1.11):

$$F_1 = \sum_{\alpha=1}^A \left(\frac{(s^\alpha \cdot t^\alpha)}{|s^\alpha|^2 \cdot |t^\alpha|^2} \right), \quad (1.11)$$

где s^α, t^α – векторы относительного смещения бортов сколовой трещины и средних для объема касательных напряжений, действующих на плоскости скола; A – число сколов, участвующих в выборке.

Максимально значение функции однородности равняется единице, означающее полное совпадение подвижек на борту сколовых трещин с ориентацией действующих касательных напряжений. Фиксация значений меньше единицы, свидетельствует о неоднородности действующих напряжений и анизотропии исследуемого горного массива. Более подробно, описанные выше зависимости, представлены в работах [37].

Метод выделения локации разрушения – представляет собой комплексный подход, интегрирующий принципы тектонодинамического анализа и методологию экстремального анализа "функции однородности". Метод реализуется посредством следующих процедур: аналитическая процедура; критериальные основы; интерпретационные алгоритмы. Теоретическая база метода основана на: принципах механики разрушения; законах тектонического расслоения; статистической теории прочности [64].

Метод М-плоскостей базируется на фундаментальном положении о детерминирующей роли упругих деформаций в формировании кинематики сколовых смещений. Теоретическая

основа метода включает следующие положения: концептуальные предпосылки; эволюция методики; математическая формализация. Области эффективного применения данного метода: анализ структурных нарушений; оценка сейсмического потенциала; прогноз зон разрывной тектоники [65].

Кинематический метод анализа механизмов очагов землетрясений базируется на принципе пространственного разделения сейсмических данных на единичной сфере. Методологическая основа включает следующие положения: геометрическая интерпретация; физические принципы; математическая формализация [22].

1.4.3 Методы структурного анализа

Методы структурного анализа, представленные на рисунке 1.13, наиболее распространены при исследовании подходов к реконструкции тектонических напряжений горного массива.

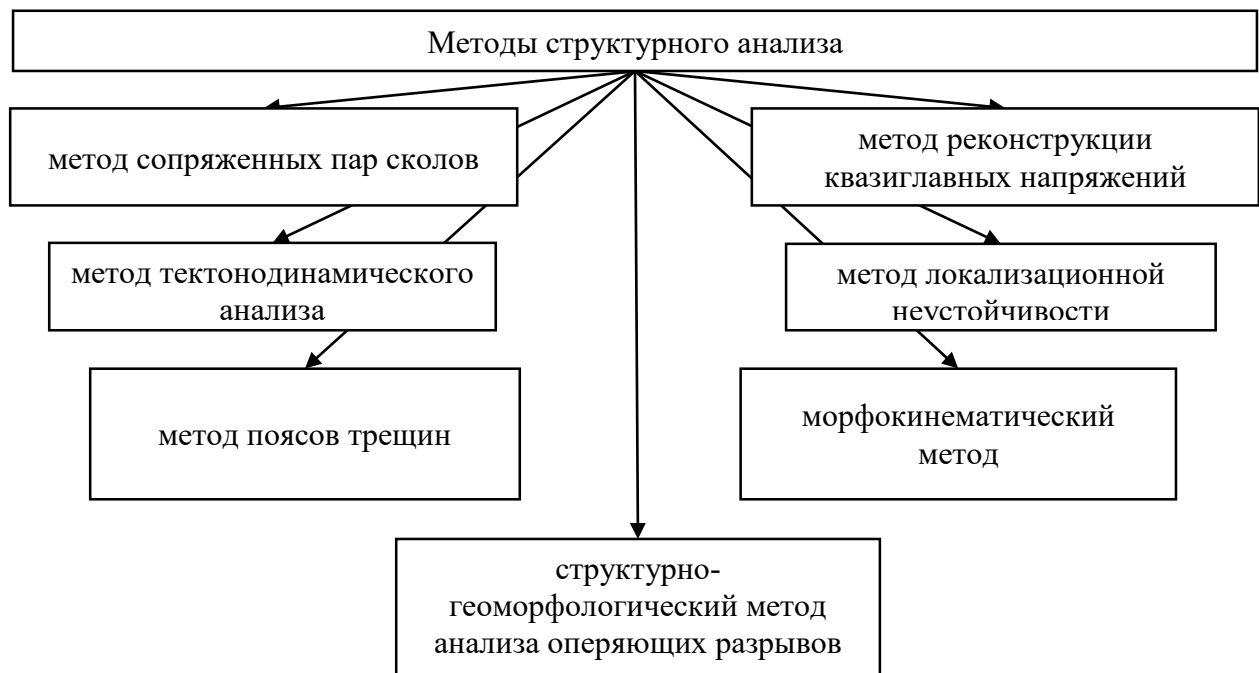


Рисунок 1.13 – Методы структурного анализа

Метод сопряженных пар сколов основывается на выделении пары сколовых трещин, сформированных в условиях однородного поля напряжений горного массива, имеющий схожую морфологию и возраст. Для получения достоверных данных о сопряженности принятых сколовых трещин, имеющих различную ориентацию, необходимо определить степень взаимного пересечения, противоположность направления смещений их бортов.

Ось промежуточного главного напряжения совпадет с линией пересечения выделенных сколовых трещин, а направления осей главных напряжений с биссектрисами смежных углов [15].

Метод реконструкции квазиглавных напряжений представляет собой аналитический подход, основанный на критерии прочности Кулона-Мора, который устанавливает зависимость

между упругими деформациями и напряжениями на основании подвижек по разрыву. В результате статистического анализа выборки разрывов и представления горного массива в качестве геосреды с изотропными свойствами ориентация компонент естественного напряженного поля исследуемого массива определяется исходя из характера плотности распределения «квазиглавных напряжений» [42].

Метод тектонодинамического анализа – развитие метода анализа сколовых разрывов и трещин. В исследуемом массиве горных пород выделяется объем, с последующим статистическим анализом ориентации и расположения одноранговых трещин и определением сопряженных общностей. Далее рассчитываются азимут и угол падения плоскости трещины, локальные максимумы выделенных систем трещин, определяющие индексацию (направление) осей главных напряжений нетронутого горного массива [38].

В **методе локализационной неустойчивости** исследуется процесс осадконакопления слоистой геосреды и выдвигается предположение, что значительное уплотнение слоистого горного массива (деформации «стеснения») под действием тектонических напряжений формирует нарушение сплошности и зарождение сдвиговых и отрывных сколовых трещин. Эволюция структурных нарушений демонстрирует каскадный характер развития деформационных структур, где прогрессирующая активизация систем сколовых трещин инициирует формирование мезо- и макроскопических дислокаций, включая складчатые структуры и разрывные нарушения более высокого порядка [38].

Метод поясов трещин основан на принципах механики разрушения горных пород и структурной геологии. Анализ пространственной ориентации трещинных поясов выявляет их кинематическую связь с тектоническими напряжениями: оси трещинных систем совпадают с направлением промежуточного главного напряжения (σ_2) и располагаются в плоскости, перпендикулярной вектору относительного смещения крыльев разлома. Структурная интерпретация ориентировки сколовых трещин предоставляет возможность реконструкции пространственного положения двух других главных напряжений (σ_1 и σ_3), что позволяет восстановить полный тензор тектонических напряжений в исследуемом массиве. Данный подход основан на принципах механики разрушения горных пород и структурной геологии [23].

Морфокинематический метод анализа зон скалывания представляет собой усовершенствованный подход к исследованию тектонического напряженного состояния, основанный на комплексном изучении структурных элементов разломных зон. Объект исследования: линейно-протяженные зоны скалывания; структурные и динамометаморфические парагенезисы; иерархия разрывных нарушений: (магистральные разломы (1-го порядка) и сопутствующие нарушения (2-3 порядков)). Данный метод позволяет реконструировать

эволюцию напряженного состояния, определить параметры палеонапряжений и выявить зоны повышенной деформации [16].

Структурно-геоморфологический метод анализа оперяющих разрывов направлен на изучение субвертикальных разломов и последующую реконструкцию тектонического напряженного состояния вблизи неоднородности. Промежуточное главное напряжение соосно с исследуемым разломом, что позволяет использовать данные об изменении простирания мелких систем трещин, полученных в результате дешифровки топокарт и анализу фотограмметрической съемки [50].

1.5 Анализ численных методов расчета параметров напряженно-деформированного состояния горного массива

Для определения параметров естественного напряженного состояния горного массива необходимо применение комплексного подхода, основанного как на экспериментальных методах, так и на численном моделировании. Степень достоверности данных, полученных в результате выполнения численных расчетов зависит от выбора корректной геомеханической модели, способной отразить свойства и модель поведения реальных материалов. Исходя из чего исследователями были разработаны различные численные методы, представленные на рисунке 1.14.

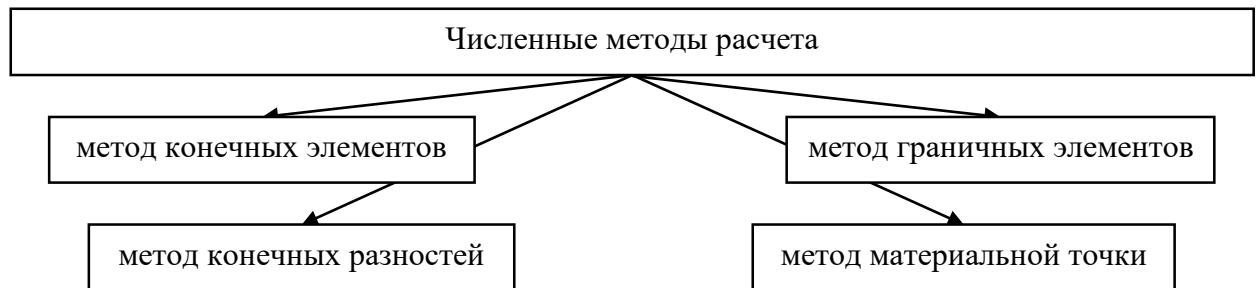


Рисунок 1.14 – Методы структурного анализа

Метод конечных элементов – численный, вариационно-разностный метод, основой которого является дискретизация исследуемой области (континуума) на конечное число непересекающихся элементов. При решении задач в плоской постановке, элементы представляются в форме треугольников и параллелограммов, в пространственной – в форме тетраэдров и параллелепипедов. Для каждого элемента задается базис (определенная функция формы), а поле определяется через условие стационарности, что гарантирует непрерывность между элементами и преобразует инженерные задачи в системы алгебраических уравнений.

Необходимо отметить, что метод конечных элементов является эффективным методом исследования напряженно-деформированного состояния различных материальных тел, однако для получения достоверных данных необходима проверка, которая осуществляется сопоставлением их с имеющимися точными или известными решениями [77].

Метод конечных разностей представляет собой численный подход для решения дифференциальных уравнений в частных производных в двумерных и трехмерных постановках. Методологическая схема включает три ключевых этапа реализации:

1. дискретизация расчетной области (построение структурированной сетки узловых точек; аппроксимация непрерывной функции дискретными значениями в узлах; определение шагов дискретизации);
2. построение разностной схемы (замена дифференциальных операторов конечно-разностными аналогами; формирование системы алгебраических уравнений);
3. решение системы уравнений (число неизвестных n (или порядок решений системы) соответствует числу узловых значений, в которых определяется значение искомой функции) [110].

Метод граничных элементов обладает принципиальным преимуществом перед другими численными методами, поскольку требует дискретизации исключительно граничной поверхности исследуемой области. Такой подход приводит к значительному снижению размерности решаемой системы линейных уравнений, что существенно упрощает вычислительный процесс.

При моделировании напряженно-деформированного состояния горного массива после проведения горной выработки применяется принцип суперпозиции. Согласно этому принципу, результирующее поле представляет собой сумму двух составляющих: первичного поля напряжений в ненарушенном массиве и дополнительного поля, обусловленного влиянием проведенной выработки.

Существует две принципиальные модификации метода граничных элементов:

Прямой метод – решение интегральных уравнений относительно физически интерпретируемых величин (напряжений и перемещений на границе). После определения граничных значений, параметры внутри области вычисляются через процедуру численного интегрирования.

Косвенный метод – использование фундаментальных сингулярных решений исходных дифференциальных уравнений. В этом подходе решение выражается через распределенные по границе неизвестные плотности, не имеющие прямой физической интерпретации [98].

Метод материальной точки относится к категории бессеточных численных методов. В его основе лежит представление сплошной среды в виде множества дискретных частиц (материальных точек), каждая из которых характеризуется ключевыми физическими параметрами: массой, скоростью, деформацией и напряжением. В отличие от традиционных подходов, движение и деформация материала описываются в Лагранжевой системе координат, где материальные точки перемещаются вместе с веществом.

Особенностью настоящего метода является использование неподвижной фоновой сетки, которая служит Эйлеровой системой координат. На этой сетке вычисляются пространственные градиенты и решаются дискретизированные уравнения импульса. На каждом временном шаге данные с материальных точек переносятся на узлы сетки для формирования уравнений движения. После их решения обновленные значения возвращаются обратно к материальным точкам, корректируя их скорость и положение.

Главное преимущество метода материальной точки заключается в том, что фиксированная фоновая сетка исключает проблему искажения, характерную для классических сеточных подходов. Благодаря этому метод эффективно моделирует процессы с экстремальными деформациями, сохраняя высокую точность расчетов [104].

Аналитические методы исследования напряженно-деформированного состояния горного массива представляют собой альтернативу численному моделированию. В их основе лежат теоретические концепции, описываемые формулами и математическими зависимостями. Такой подход позволяет охватить более широкий диапазон геомеханических условий по сравнению с дискретными численными расчетами. Точность аналитических решений напрямую зависит от двух ключевых аспектов: полноты учета влияющих факторов (геологических, тектонических, техногенных) и соответствия параметров модели реальным свойствам горных пород.

Преимуществом настоящего подхода является возможность быстрой оценки влияния исходных данных на конечные результаты. Это позволяет анализировать как изменения начальных условий (например, механических характеристик пород или граничных нагрузок) сказываются на распределении напряжений и деформаций в массиве.

1.6 Выводы по Главе 1

Исследования, проводимые в рамках диссертационной работы, направлены на разработку методики оценки естественного напряженного состояния горного массива, основой которой является один из методов полной разгрузки – метод кольцевой разгрузки. В связи с этим первая глава посвящена анализу существующих методов оценки естественного напряженного состояния горного массива, а также иным подходами, связанными с реконструкцией тектонического напряженного состояния.

На основании проведенного анализа научно-технических работ можно сделать вывод о том, что определение параметров естественного напряженного состояния горного массива является сложной, решенной в недостаточной степени задачей, требующей комплексного подхода, включающего в себя проведение натурных и лабораторных испытаний, численного моделирования и аналитического анализа полученных результатов.

Исследование натуральных методов оценки естественного напряженного состояния горного массива позволило сделать вывод о том, что наиболее распространенным является метод полной разгрузки. Его ключевые преимущества заключаются в следующем:

1. Высокая точность измерений (позволяет получить наиболее достоверные данные о величине и направлении главных напряжений в массиве, так как основан на прямом измерении деформаций при снятии нагрузки; минимизирует погрешности, связанные с косвенными расчётными методами; даёт возможность определить полный тензор напряжений, включая все три главных компоненты).
2. Возможность исследований на разных глубинах (применим как вблизи контура горной выработки, так и за пределом зоны ее влияния; позволяет изучать изменение естественного напряженного состояния с увеличением глубины измерения).
3. Практическая значимость для проектирования (полученные данные могут быть использованы при расчётах устойчивости выработок; позволяют оптимизировать параметры крепления горных выработок; дают основу для прогноза геомеханических явлений (горных ударов, вывалов и др.).
4. Технологическая универсальность (может сочетаться с другими методами исследований (например, с акустическими или ультразвуковыми измерениями; позволяет проводить измерения в сложных геологических условиях).

Однако существует ряд трудностей при использовании данных методов. Точность измерений зависит от прямолинейности ствола скважины, от степени анизотропии горного массива (трещиноватость, блочность, естественные и искусственные включения). Неоднородность, встречающаяся на пути исследовательской скважины в момент бурения, способствует снижению качества формируемой поверхности и оказывает влияние на измеряемые параметры. Исходя из чего, разрабатываемая методика должна корректно учитывать влияние различных нарушений исследуемого горного массива. Необходимо отметить, что выполнение буровых работ сопровождается изменением температурного режима исследуемого горного массива.

Подходы, основанные на реконструкции тектонических напряжений горного массива, способны продемонстрировать только качественную информацию о действующем поле напряжений, т.е. возможно определить направления главных напряжений без их количественных показателей вблизи тектонических нарушений глобальных масштабов. Существует ряд неопределенностей, связанных с выделением и общностью исследования систем сколовых трещин.

Проведенный в главе анализ подходов по оценке естественного напряженного состояния горного массива позволяет сформировать необходимые составляющие разрабатываемой методики:

1. Проведение натурных испытаний с применением высокоточного измерительного оборудования.
2. Проведение лабораторных испытаний кернового материала с целью определения деформационных и прочностных свойств горного массива.
3. Численное моделирование, корректно отражающей параметры горного массива и этапность проведения натурных испытаний.
4. Аналитический расчет, с целью определения величин и ориентаций главных напряжений, формирующих естественное напряженное состояние горного массива.
5. Учет влияния нарушенности исследуемого горного массива, пресекающий измерительную скважину.
6. Учет температурного влияния буровых работ на изменение деформационных параметров измерительной скважины.

ГЛАВА 2 МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОГО МАССИВА АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВЫХ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЙ ХИБИН

Диссертационная работа посвящена повышению достоверности определяемого естественного напряженного состояния горного массива апатит-нефелиновых месторождений Хибин. В данной главе представлен разработанный метод определения естественного напряженного состояния горного массива, а также его реализация в условиях скальных горных массивов месторождений Хибин. Сущность метода заключается в создании единого алгоритма, включающего проведение натурных и лабораторных испытаний с применением современного измерительного оборудования и обработку данных, основанную на численном моделировании и аналитическом расчете.

На блок-схеме (рисунок 2.1) представлены основные этапы и последовательность предлагаемого в работе метода.

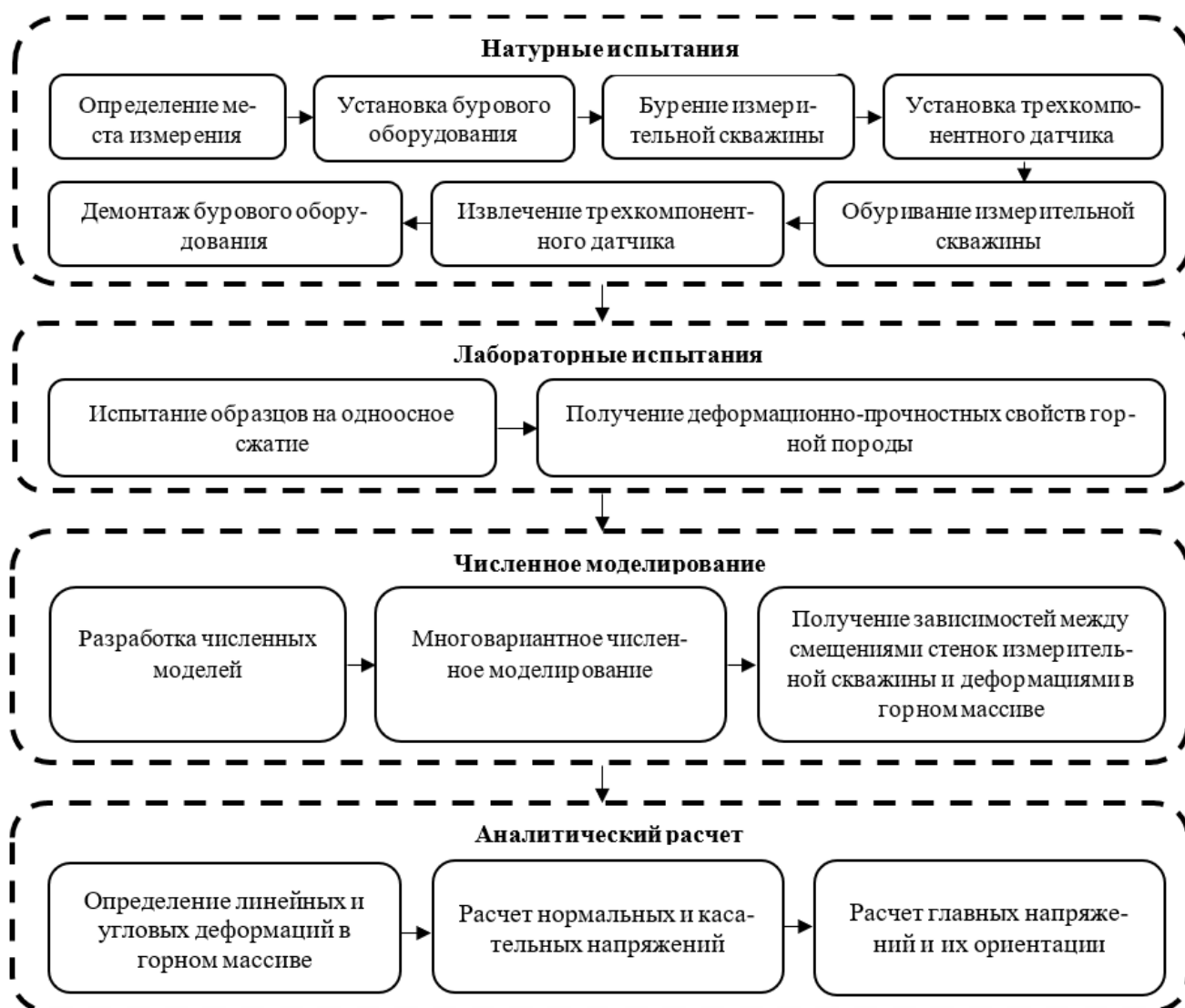


Рисунок 2.1 – Блок-схема предлагаемого метода

Основная задача заключается в подборе таких параметров естественного напряженного состояния, которые обеспечат радиальные смещения стенок измерительной скважины и деформации горного массива после создания разгрузочной кольцевой щели, соответствующих натурным испытаниям. В этом случае можно предположить, что именно такие параметры естественных напряжений действовали в горном массиве до начала ведения горных работ.

2.1 Натурные испытания при определении естественного напряженного состояния горного массива

Натурные испытания, проведенные в рамках диссертационной работы, представляют собой комплекс инструментальных измерений, которые выполнялись в течение двух лет на различных рудниках КФ АО «Апатит». Основными целями исследования являлись: определение смещений стенок измерительной скважины, отбор кернового материала с целью проведения лабораторных испытаний (определение прочностных и деформационных свойств) и общая оценка состояния исследуемого горного массива.

2.1.1 Методика проведения натурных испытаний

Объектом исследования является горный массив. Основной задачей этапа натурных испытаний является измерение радиальных смещений стенок измерительной скважины методом кольцевой разгрузки с применением трехкомпонентного датчика смещений. Метод кольцевой разгрузки – одна из вариаций метода полной разгрузки (схема Н. Хаста), позволяющего исследовать параметры упругого восстановления элемента горного массива при искусственном нарушении его связи с окружающим массивом. Сущность данного метода заключается в измерении радиальных смещений стенок измерительной скважины в результате ее обруивания. На основании полученных данных определяются деформации горного массива, соответствующие измеренным смещениям, с последующим расчетом главных напряжений и их ориентаций, отражающих естественное напряженное состояние исследуемого массива.

При проведении натурных испытаний выделяются три этапа:

1. Подготовительный этап, включающий сбор и анализ данных об исследуемом горном массиве.
2. Основной этап, характеризующийся проведением инструментальных измерений.
3. Заключительный этап: отбор кернового материала и первичная обработка полученных данных.

На подготовительном этапе проводится первичное изучение данных об исследуемом горном массиве: геологическое строение (структура горного массива, степень нарушенности, тектоническое воздействие, состав горных пород); гидрогеология (наличие водоносных горизонтов, обводненность горных выработок); данные о действующем напряженном состоянии (при наличии); сейсмическая активность (данные о землетрясениях и микросейсмичности); геотехнологические данные (планы горизонтов, отражающие последовательность проходческих и очистных работ). На основании комплексного анализа параметров, описанных выше, делается вывод о применимости, представленного в настоящей работе, метода.

Проведение инструментальных измерений является основным и наиболее трудоемким этапом натурных испытаний, последовательность проводимых операций которого представлена ниже.

1. Выбор места измерений, уделяя особое внимание состоянию горного массива (рисунок 2.2): оценивается нарушенность и обводненность; изучается степень проявления горного давления и т.д. Высокая значимость данного этапа формируется за счет того, что неверный выбор места измерений может повлечь за собой как невозможность выполнения инструментальных измерений, так и получение недостоверных результатов.



Рисунок 2.2 – Выбор места измерений

2. Краткое описание места измерения, включающее: размеры горной выработки; расстояние от места измерения до сопряжения; расстояние от места измерения до почвы горной выработки; геологическое и структурное состояние и т.д.

3. Установка бурового оборудования (рисунок 2.3), в качестве которого выступает установка алмазного бурения Hilti DD 350-CA.



Рисунок 2.3 – Установка бурового оборудования

4. Бурение измерительной скважины (рисунок 2.4), типоразмеры (длина измерительного интервала 0,5-2 м и диаметр 77 мм) которой обусловлены буровым и измерительным оборудованием.



Рисунок 2.4 – Бурение измерительной скважины

В процессе выполнения буровых работ особое внимание уделяется прямолинейности измерительной скважины, а также состоянию извлекаемого керна, которое отражает величину действующих напряжений в исследуемом горном массиве. Если извлекаемый из скважины керн не имеет видимых повреждений (рисунок 2.5.a), то инструментальные измерения продолжаются на данной глубине, если керн разрушается в процессе бурения (извлекается

кольцами (рисунок 2.5.б)) – высоконапряженный горный массив, то глубина измерения увеличивается.

а



б



Рисунок 2.5 – Состояние керна; а – без видимых повреждений; б – кольцевание (высокие действующие напряжения)

5. Установка измерительного оборудования. При проведении инструментальных измерений применяется трехкомпонентный датчик смещений (рисунок 2.6) – современное измерительное устройство, позволяющее измерить смещения стенок скважины в пяти различных направлениях, что в сочетании с измерениями, выполненными в двух ортогональных выработках, является достаточным для получения полных тензоров деформаций и напряжений. В направлениях №1-5,3-7 определяются радиальные смещения, соответствующие линейным деформациям, в №2-6,4-8 – угловым. Последнее измерительное направление всегда перпендикулярно оси горной выработки (соосно скважине), в которой проводятся измерения.

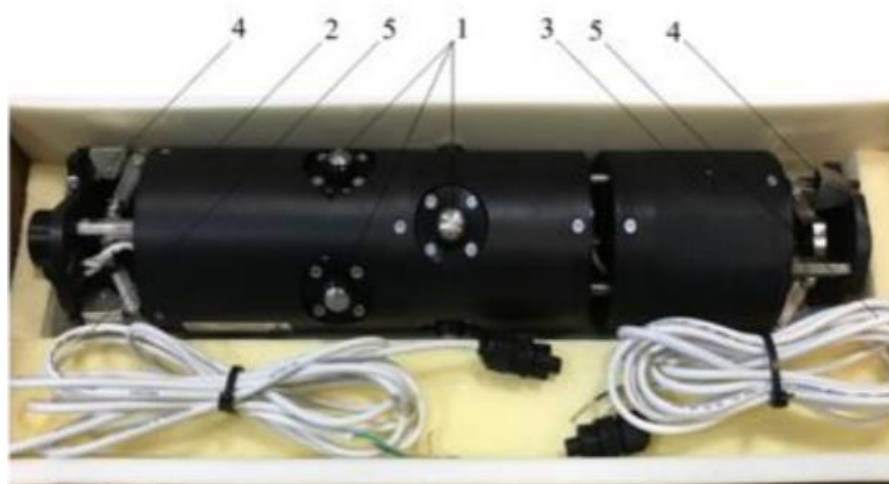


Рисунок 2.6 – Трехкомпонентный датчик смещений; 1 – высокочувствительные элементы; 2 – корпус; 3 – записывающее устройство; 4 – распорные (фиксирующие) элементы; 5 – кабели питания и передачи данных

Измерительная скважина углубляется на 30 сантиметров относительно исследуемого измерительного интервала, для того чтобы исключить влияние ее торца (забой скважины) на определяемые величины радиальных смещений. В момент установки трехкомпонентный датчик смещений подключен к компьютерной программе, отражающей его основные параметры (номер, заряд, время, температуру окружающей среды, ориентацию чувствительных элементов). После начальной настройки и получения исходных данных с использованием того же программного обеспечения выполняется конечное позиционирование трехкомпонентного датчика смещений в измерительной скважине (рисунок 2.7).

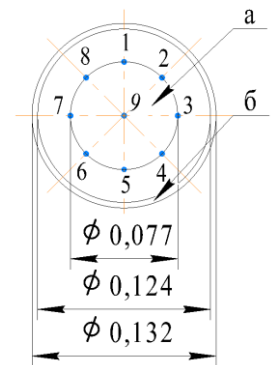


Рисунок 2.7 – Расположение трехкомпонентного датчика смещений

(1-9 – измерительные направления): а – измерительная скважина; б – кольцевая разгрузочная щель

6. Обуривание измерительной скважины т.е. создание зоны разгрузки горного массива происходит за счет формирования кольцевой щели толщиной 4 мм поллой коронкой большего диаметра (132 мм). В момент обуривания трехкомпонентный датчик записывает радиальные смещения стенок измерительной скважины.

7. Извлечение трехкомпонентного датчика смещений. После обуривания измерительной скважины датчик подключается к программе, выполняется первичный анализ полученных данных и датчик извлекается.

В процессе проведения инструментальных испытаний ведется «карта бурения» (рисунок 2.8), где отмечаются глубина измерительных интервалов, время обуривания, размеры горной выработки, температура горного массива в процессе буровых и измерительных работ, начальная ориентация чувствительных элементов и т.д. Это необходимо при выполнении обработки результатов инструментальных испытаний и численном моделировании.

Сечение выработки: форма свод, ширина 5,0/5,4 м, высота 4,0/4,2 (каска)

Примечания: крепление капролаз-серон

от старой по высоте - 0,9 м,
то кратчайшей - 1,65 м

Дата	Ø скважины, мм	Глубина бурения, м			Время бурения, мин			Примечания
		начало	окончание	пробурено	начало	окончание	прод-ть	
26.06.23	132	0/0,4						
0043	24.06.	132	0,45/	1,2/	0,45			
0,1		132	0,45/0,48	0,88/0,35	0,43	9 ⁵⁹ /10 ²⁰	10 ²⁴	7
		132	0,88	1,65	0,57			креп: 121,387
0043		132	1,65/	2,38	0,53			
2,0		132	1,65/0,95	2,08/	0,43	12 ³⁶ /12 ⁴¹	12 ⁴⁶	5
		132	2,08/	2,9/	0,82			
28.06.		132	2,9/0,91	3,65	0,85	8 ⁴⁴		
045		132	3,65		0,85			
4,0		132	3,65	4,18	0,83	11 ⁵²	11 ⁵⁶	4
		132	4,18		0,83	12 ⁰⁹		креп: 118,
29.06.		132	10,95	6,47/0,33	0,77	9 ³³		

Рисунок 2.8 – Карта бурения

Обобщенная схема проведения инструментальных измерений, отражающая основные технологические этапы и их последовательность выполнения представлена на рисунке 2.9.

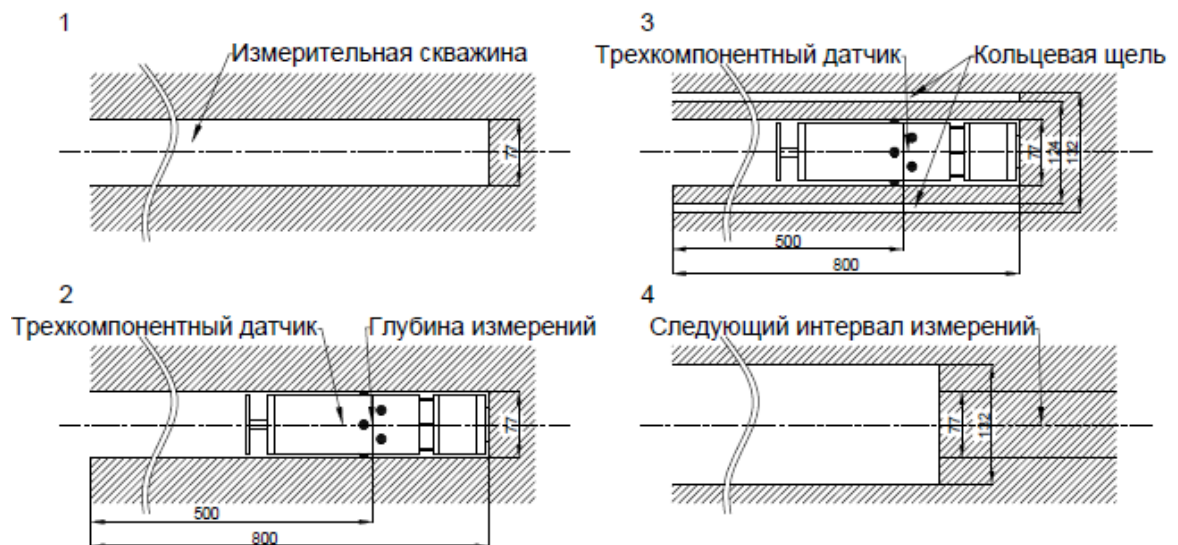


Рисунок 2.9 – Обобщенная схема проведения инструментальных измерений

Необходимо сделать два важных примечания. Первое – измерения производятся на различных интервалах (глубинах), что необходимо для определения зоны влияния горной выработки. Второе – в процессе обустройства пилотной скважины происходит повышение температуры, которое оказывает влияние на измеряемые датчиком радиальные смещения стенок измерительной скважины.

На заключительном этапе отбирается керновый материал по два образца с каждого измерительного интервала, производится их описание. Это необходимо для повышения достоверности определяемых прочностных и деформационных свойств горной породы при проведении лабораторных испытаний. Отражается наличие включений, нарушений и т.д.

Анализируется «карта бурения», с целью определения времени буровых операций и изменения температуры. Далее выполняются подготовительные работы для проведения измерений в ортогональном направлении [11].

2.1.2 Результаты натурных испытаний

Основными данными, требуемыми для оценки естественного напряженного состояния горного массива по методике, приведенной в разделе 2.1.1, являются величины радиальных смещений стенок измерительной скважины.

На рисунке 2.10 представлены результаты натурных испытаний. Погрешность трехкомпонентного датчика, равная 5 мкм, принимается в качестве исходных данных (нулевые значения). Конечные данные – радиальные смещения измерительной скважины, формируемые после создания разгрузочной кольцевой щели.

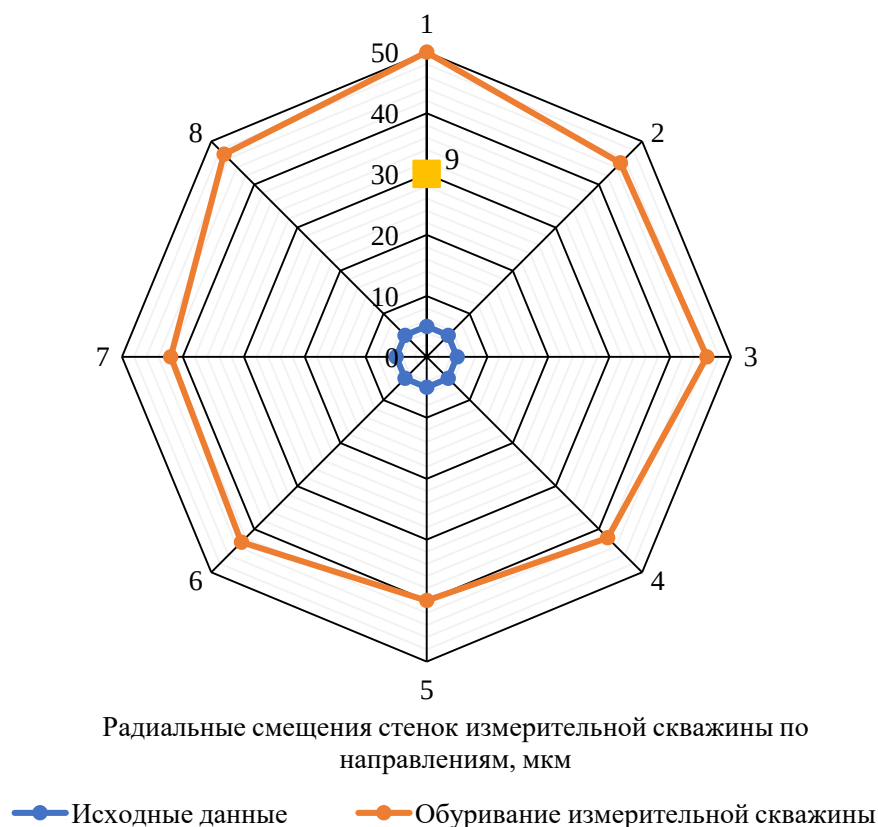


Рисунок 2.10 – Результаты измеренных радиальных смещений стенок измерительной скважины трехкомпонентным датчиком смещений

При формировании зоны разгрузки наибольшее увеличение радиальных смещений стенок измерительной скважины фиксируется в направлении действия наибольшего главного напряжения.

На основании обработки измеренных радиальных смещений стенок измерительной скважины составляется таблица, где отражаются результаты натурных испытаний (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Результаты натурных испытаний

Номер измерительного участка	Глубина измерения, м	Радиальные смещения стенок измерительной скважины по чувствительным элементам при разгрузке горного массива, мкм		Суммарные радиальные смещения измерительной скважины по измерительным направлениям при разгрузке горного массива, мкм	
У.И. – №	$L_{изм}$	1	Значение (1)	1-5	Значение (1) + Значение (5)
		5	Значение (5)		
		2	Значение (2)	2-6	Значение (2) + Значение (6)
		6	Значение (6)		
		3	Значение (3)	3-7	Значение (3) + Значение (7)
		7	Значение (7)		
		4	Значение (4)	4-8	Значение (4) + Значение (8)
		8	Значение (8)		
		9	Значение (9)	9	Значение (9)

2.2 Лабораторные испытания кернового материала

Отобранный в результате проведения натурных испытаний керновый материал испытывают в лабораторных условиях с целью определения прочностных и деформационных характеристик при одноосном сжатии. На начальном этапе подготавливаются цилиндрические образцы правильной формы, размеры которых составляют 63 мм (в диаметре), 100-105 мм (по высоте) (рисунок 2.11).

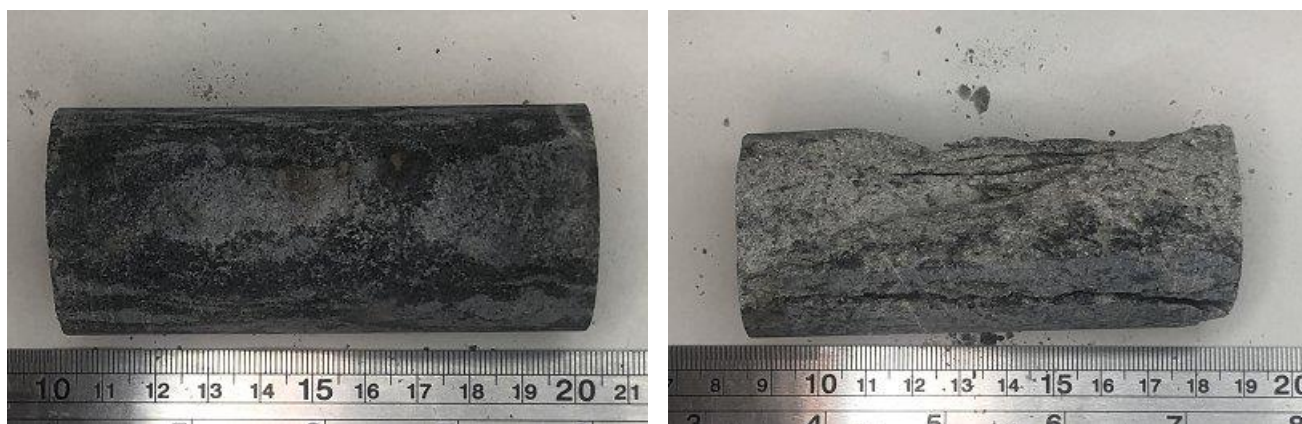


Рисунок 2.11 – Фотографии образцов до и после лабораторных испытаний

Определение предела прочности при одноосном сжатии. Предел прочности исследуемой горной породы при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$ определяется в соответствии с методом, представленном в ГОСТ [18]. Основой метода является определение предельной разрушающей силы, воздействующей на образец правильной формы через жесткие стальные плиты, контактирующие с его торцевыми поверхностями. Цилиндрические образцы правильной формы непрерывно нагружают со скоростью 0,5-1,0 МПа/сек до разрушения. В качестве лабораторного оборудования применяется сервогидравлическая испытательная

система MTS 816 (MTS, США) (рисунок 2.12), максимальная нагрузка которой составляет 1500 кН.



Рисунок 2.12 – Сервогидравлическая испытательная система MTS 816 (MTS, США)
(модификация для испытаний на одноосное сжатие)

Предел прочности при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$ вычисляется по формуле (2.1):

$$\sigma_{сж} = \frac{P_{раз}}{S}, \quad (2.1)$$

где $P_{раз}$ – разрушающая образец сила, кН; S – площадь поперечного сечения образца, см².

Определение деформационных свойств (модуль деформации $E_{д.о.}$, модуль упругости $E_{у.о}$ и коэффициент Пуассона ν_o). Деформационные свойства исследуемой горной породы при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$ определяется в соответствии с методом, представленном в ГОСТ [19]. Основой метода является определение продольных и поперечных деформаций цилиндрического образца правильной формы в результате его одноосного сжатия. Необходимо отметить, что диапазон осевых напряжений составляет от 5 до 50% от величины предела прочности при одноосном сжатии. В качестве лабораторного оборудования применяется сервогидравлическая испытательная система MTS 816 (MTS, США), продольные деформометры. Расположение продольных деформометров относительно образца горной породы представлено на рисунке 2.13.



Рисунок 2.13 – Расположение продольных деформометров относительно образца горной породы

По результатам лабораторных испытаний определяются следующие характеристики:

Продольная относительная деформация вычисляется по формуле (2.2):

$$\varepsilon_{np} = \frac{\Delta H}{H}, \quad (2.2)$$

где ΔH – изменение высоты образца, мм; H – высота образца, мм.

Поперечная относительная деформация вычисляется по формуле (2.3):

$$\varepsilon_{nop} = \frac{\Delta D}{D}, \quad (2.3)$$

где ΔD – изменение диаметра образца, мм; D – диаметр образца, мм.

Модуль деформации вычисляется по формуле (2.4):

$$E_{\partial.o} = \frac{\sigma_k - \sigma_n}{\varepsilon_{np.k} - \varepsilon_{np.n}}, \quad (2.4)$$

где σ_k, σ_n – напряжения в конце и начале диапазона при нагружении и разгрузке, МПа; $\varepsilon_{np.k}, \varepsilon_{np.n}$ – относительные продольные деформации образца в конце и начале диапазона при нагружении.

Коэффициент поперечной деформации вычисляется по формуле (2.5):

$$\nu = \frac{\varepsilon_{nop.k} - \varepsilon_{nop.n}}{\varepsilon_{np.k} - \varepsilon_{np.n}}, \quad (2.5)$$

где $\varepsilon_{nop.k}, \varepsilon_{nop.n}$ – относительные поперечные деформации образца в конце и начале диапазона при нагружении.

Модуль упругости вычисляется по формуле (2.6):

$$E_{y.o} = \frac{\sigma_k - \sigma_n}{\varepsilon'_{пр.к} - \varepsilon'_{пр.н}}, \quad (2.6)$$

где $\varepsilon'_{пр.к}$, $\varepsilon'_{пр.н}$ – относительные продольные деформации образца в конце и начале диапазона при разгрузке.

Коэффициент Пуассона вычисляется по формуле (2.7):

$$\nu_0 = \frac{\varepsilon'_{поп.к} - \varepsilon'_{поп.н}}{\varepsilon'_{пр.к} - \varepsilon'_{пр.н}}, \quad (2.7)$$

где $\varepsilon'_{поп.к}$, $\varepsilon'_{поп.н}$ – относительные поперечные деформации образца в конце и начале диапазона при разгрузке.

Шаблон для результатов проведенных лабораторных испытаний представлен в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Прочностные и деформационные свойства кернового материала

№ образца	Естественная плотность, г/см ³	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона	Модуль деформации, ГПа	Предел прочности при одноосном сжатии, МПа
№	ρ_0	$E_{y.o}$	ν_0	$E_{д.o}$	$\sigma_{сж}$
...	...	...	...	...	...

2.3 Методика обработки данных натурных испытаний

Предлагаемый в настоящей работе численный подход к обработке данных натурных и лабораторных испытаний основан на использовании метода конечных элементов (МКЭ). В рамках данного метода используется модель линейно деформируемого тела, описывающая поведение горного массива, что необходимо для применимости метода кольцевой разгрузки. Основная задача заключается в определении деформаций горного массива, соответствующих измеренным радиальным смещениям стенок измерительной скважины после создания разгрузочной кольцевой щели.

С целью определения полного тензора деформаций в программном комплексе Simulia Abaqus разрабатываются пространственные численные модели, расчетная схема которых представлена на рисунке 2.14. Они предусматривают: формирование естественного напряженного состояния во вмещающем массиве; создание горной выработки, измерительной скважины и кольцевой разгрузочной щели. Численная модель представляет собой горный массив размером 50×50×50 м, что обусловлено необходимостью исключения влияния граничных условий (не менее пяти пролетов горной выработки).

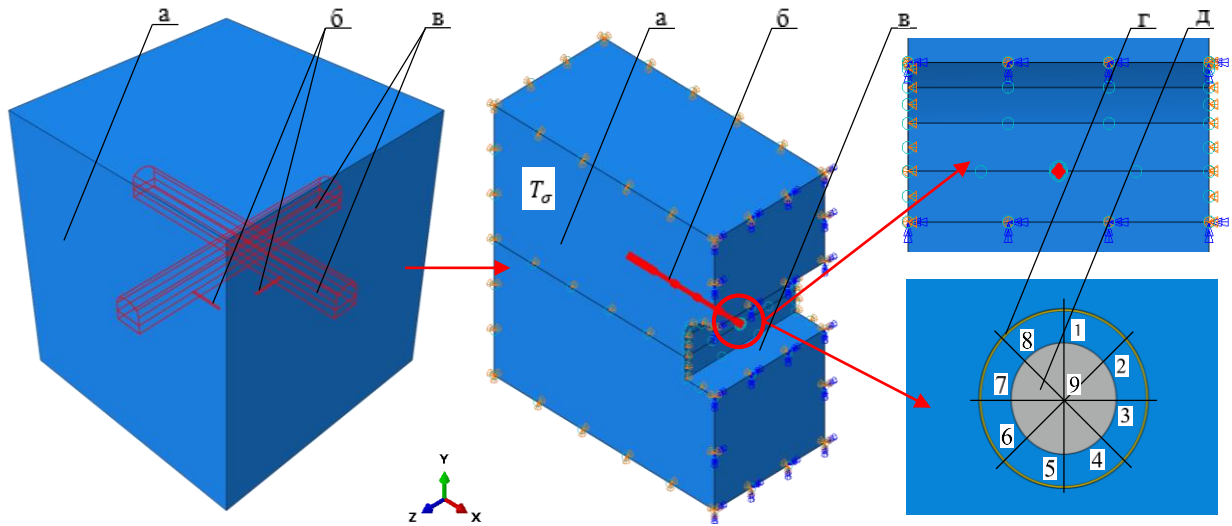


Рисунок 2.14 – Расчетная схема разработанных численных моделей: а – горный массив; б – измерительная скважина; в – горная выработка; г – кольцевая разгрузочная щель; д – измерительная скважина

Исходными данными для численной модели являются прочностные и деформационные свойства горного массива: удельный вес γ , модуль упругости горного массива E , коэффициент Пуассона ν . Эти параметры определяются в результате лабораторных испытаний кернового материала и последующего перехода к свойствам горного массива на основе рейтинговых систем и разработанной локальной геотехнической модели [102].

Измерения радиальных смещений стенок измерительной скважины после создания разгрузочной кольцевой щели по вертикальной оси и оси, направленной вдоль горной выработки, в которой выполнялись измерения (1-5 и 3-7 (рисунок 2.14), характеризуют величины нормальных напряжений, действующих в этих направлениях. Соотношение дополнительных компонент смещений (2-6, 4-8 (рисунок 2.14)), измеренных под углами в 45° к вертикальной и горизонтальной осям скважины, характеризует угол наклона соответствующих нормальных напряжений к главным напряжениям в вертикальной плоскости.

Естественное напряженное состояние вмещающего горного массива формируется путем задания главных компонент тензора напряжений (T_σ). В качестве исходного напряженного состояния горного массива принимаются прогнозные компоненты напряжений для условий рудников КФ АО «Апатит» [57]. При моделировании изменяются коэффициент бокового давления ($\lambda_1=0,5$; $\lambda_2=1$; $\lambda_3=2$; $\lambda_4=3$) и угол поворота главных напряжений ($\theta_1=0$; ...; $\theta_{10}=90^\circ$, с шагом 10°) относительно исходного положения, при котором промежуточное главное напряжение ориентировано вертикально, а максимальное и минимальное главные напряжения – горизонтально. Это позволяет получить необходимое количество значений

радиальных смещений стенок измерительной скважины и деформаций горного массива и в полной мере описать предполагаемый разброс параметров естественного напряженного состояния.

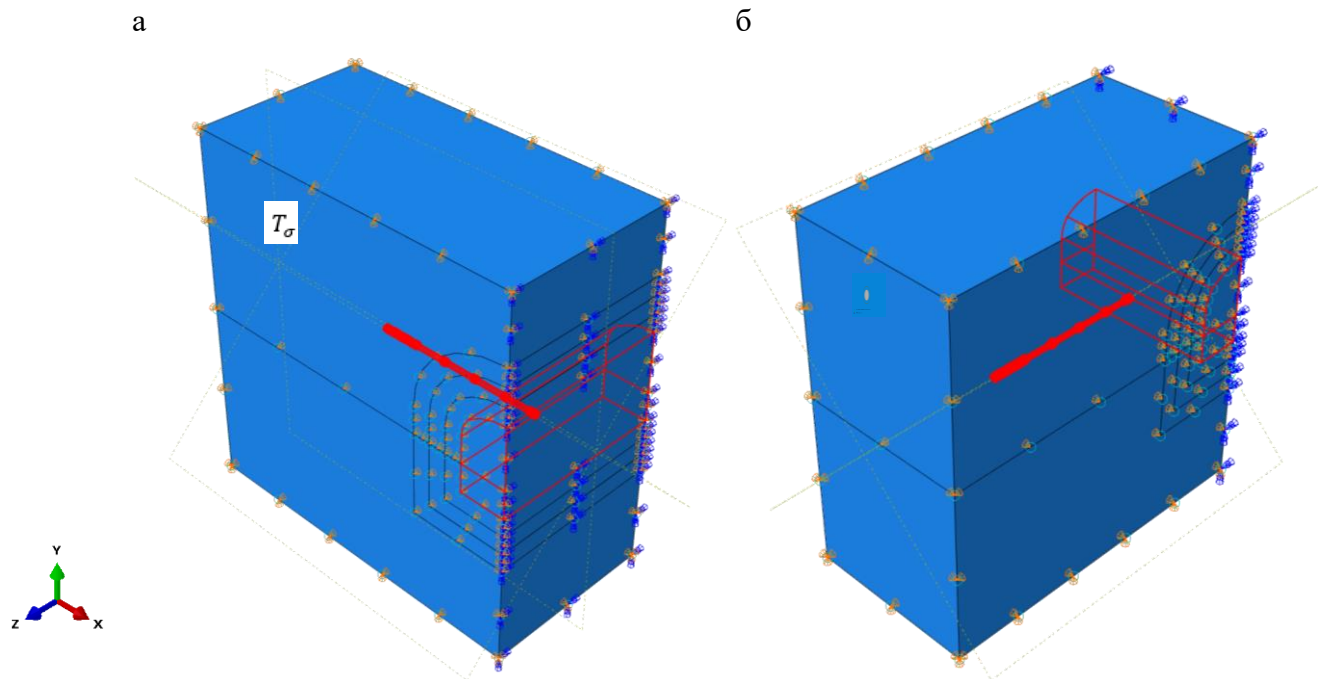


Рисунок 2.15 – Схемы проведения измерений: а – измерительная скважина направлена вдоль действия максимального горизонтального напряжения; б – измерительная скважина направлена вдоль действия минимального горизонтального напряжения

Как было отмечено в разделе 2.1.1, чтобы определить полный тензор деформаций горного массива при использовании разработанного метода, необходимо выполнять инструментальные измерения в двух ортогональных скважинах. Следовательно, на этапе численного моделирования рассматриваются две схемы проведения измерений (рисунок 2.15): измерительная скважина направлена вдоль действия максимального главного напряжения; измерительная скважина направлена вдоль действия минимального главного напряжения.

При проведении расчетов по схеме а изменяются промежуточное и минимальное главные напряжения. Максимальное главное напряжение остается постоянным, так как не оказывает влияния на определяемые величины радиальных смещений стенок измерительной скважины и деформаций горного массива в плоскости перпендикулярной оси измерительной скважины. При проведении расчетов по схеме б минимальное главное напряжение остается постоянным, максимальное и промежуточное главные напряжения изменяются (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Параметры напряженного состояния при выполнении численного моделирования

Коэффициент бокового давления λ	Угол поворота главных напряжений θ , град	Максимальное главное напряжение σ_1 , МПа	Промежуточное главное напряжение σ_2 , МПа	Минимальное главное напряжение σ_3 , МПа	Касательное напряжение, действующее в плоскости 1-2 τ_{1-2} , МПа	Касательное напряжение, действующее в плоскости 2-3 τ_{2-3} , МПа	Касательное напряжение, действующее в плоскости 1-3 τ_{1-3} , МПа
Схема а							
λ_n	θ_k	σ_1	σ_2	$\sigma_2 \cdot \lambda_n$	0	0	0
			$\sigma_2(\theta_k)$	$\sigma_2 \cdot \lambda_n(\theta_k)$			$\tau_{1-3}(\theta_k)$
Схема б							
λ_n	θ_k	$\sigma_2 \cdot \lambda_n$	σ_2	σ_3	0	0	0
		$\sigma_2 \cdot \lambda_n(\theta_k)$	$\sigma_2(\theta_k)$		$\tau_{1-2}(\theta_k)$		

Примечание: n – значения коэффициента бокового распора (0,5; 1; 2; 3); k – значения угла поворота главных напряжений (0 ... 90°, с шагом 10°).

Результатом многовариантного численного моделирования являются закономерности изменения радиальных смещений стенок измерительной скважины и деформаций горного массива, которые будут представлены при описании реализации разработанного метода [10].

2.4 Методика расчета главных напряжений и их ориентаций

Предлагаемая методика действует в рамках теории упругости, так как основой метода кольцевой разгрузки является процесс упругого восстановления элемента после обуривания. Следовательно, компоненты напряжений и деформаций имеют линейное соотношение, описываемое законом Гука (2.8):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (2.8)$$

где σ – нормальное напряжение; E – модуль упругости; ε – относительная деформация.

На основании закономерностей и измеренных значений смещений стенок пилотной скважины на этапе полевых исследований определяются все компоненты линейных и угловых деформаций, представленные в виде матрицы (тензор деформаций) (2.9):

$$T_\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & \frac{\gamma_{xy}}{2} & \frac{\gamma_{xz}}{2} \\ \frac{\gamma_{yx}}{2} & \varepsilon_y & \frac{\gamma_{yz}}{2} \\ \frac{\gamma_{zx}}{2} & \frac{\gamma_{zy}}{2} & \varepsilon_z \end{pmatrix}, \quad (2.9)$$

где, $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – линейные деформации; $\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yx}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}, \gamma_{zy}$ – угловые деформации.

Исходя из того, что в предлагаемой методике задача по определению естественного напряженного состояния горного массива решается в пространственной постановке, тело

подвергается воздействию трех нормальных напряжений, которые определяются законом Гука путем решения системы уравнений (2.10):

$$\begin{cases} \sigma_x = \varepsilon_x \cdot E + \nu \cdot (\sigma_y + \sigma_z) \\ \sigma_y = \varepsilon_y \cdot E + \nu \cdot (\sigma_x + \sigma_z), \\ \sigma_z = \varepsilon_z \cdot E + \nu \cdot (\sigma_x + \sigma_y) \end{cases} \quad (2.10)$$

где, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – нормальные напряжения; ν – коэффициент Пуассона.

Помимо нормальных напряжений, рассчитываются касательные напряжения (2.11), необходимые для определения главных напряжений и их ориентаций:

$$\begin{aligned} \tau_{xy} &= \gamma_{xy} \cdot G & \tau_{xz} &= \gamma_{xz} \cdot G & \tau_{yx} &= \gamma_{yx} \cdot G \\ \tau_{yz} &= \gamma_{yz} \cdot G & \tau_{zx} &= \gamma_{zx} \cdot G & \tau_{zy} &= \gamma_{zy} \cdot G' \end{aligned} \quad (2.11)$$

где, $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{zy}$ – касательные напряжения; G – модуль сдвига.

Также необходимо отметить, что для напряженного состояния справедлив закон парности касательных напряжений, следовательно: $\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{xz} = \tau_{zx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}$.

На основании полученных значений решается характеристическое (кубическое) уравнение, корнями которого являются главные напряжения (2.12):

$$\sigma_i^3 - J_1 \cdot \sigma_i^2 + J_2 \cdot \sigma_i - J_3 = 0, \quad (2.12)$$

где σ_i – главные напряжения, $i=1,2,3$; J_1, J_2, J_3 – коэффициенты, включающие в себя линейные и касательные напряжения (2.13):

$$\begin{aligned} J_1 &= \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \\ J_2 &= \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_x \cdot \sigma_z + \sigma_y \cdot \sigma_z - \tau_{xy}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{yz}^2 \\ J_3 &= \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z + 2 \cdot \tau_{xy} \cdot \tau_{xz} \cdot \tau_{yz} - \sigma_x \cdot \tau_{yz}^2 - \sigma_y \cdot \tau_{xz}^2 - \sigma_z \cdot \tau_{xy}^2 \end{aligned} \quad (2.13)$$

Завершающим этапом аналитического расчета является определение направляющих косинусов главных напряжений, то есть их ориентацию в пространстве (2.14):

$$\begin{cases} (\sigma_x - \sigma_i) \cdot l_i + \tau_{xy} \cdot m_i + \tau_{xz} \cdot n_i = 0 \\ \tau_{yx} \cdot l_i + (\sigma_y - \sigma_i) \cdot m_i + \tau_{yz} \cdot n_i = 0 \\ \tau_{zx} \cdot l_i + \tau_{zy} \cdot m_i + (\sigma_z - \sigma_i) \cdot n_i = 0' \\ l_i^2 + m_i^2 + n_i^2 = 0 \end{cases} \quad (2.14)$$

где, l_i, m_i, n_i – направляющие косинусы площадок, в которых действуют главные напряжения относительно площадок, в которых действуют нормальные напряжения, $i=1,2,3$.

Система уравнений (2.14) является избыточной (четыре уравнения при трех неизвестных). Следовательно, для нахождения направляющих косинусов исключается одно из трех первых равенств.

Результатом проведенного расчета являются величины и пространственная ориентация главных напряжений, отражающие напряженное состояния до ведения горных работ (рисунок 2.16).

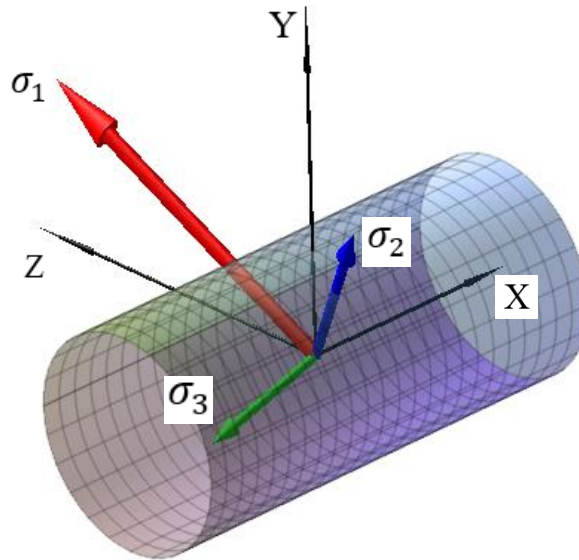


Рисунок 2.16 – Ориентация главных напряжений относительно направления измерительной скважины

2.5 Реализация метода определения естественного напряженного состояния для условий скальных горных массивов месторождений Хибин

По методике натуральных испытаний, последовательность которой подробно описана в разделе 2.1.1, были проведены инструментальные измерения радиальных смещений стенок измерительной скважины в двух ортогональных направлениях на различном удалении от контура горной выработки (0,7 м, 2 м, 4 м и 6 м). Размеры поперечного сечения горной выработки, где проводились измерения представлены на рисунке 2.17. Длина измерительной скважины 6,3 м.

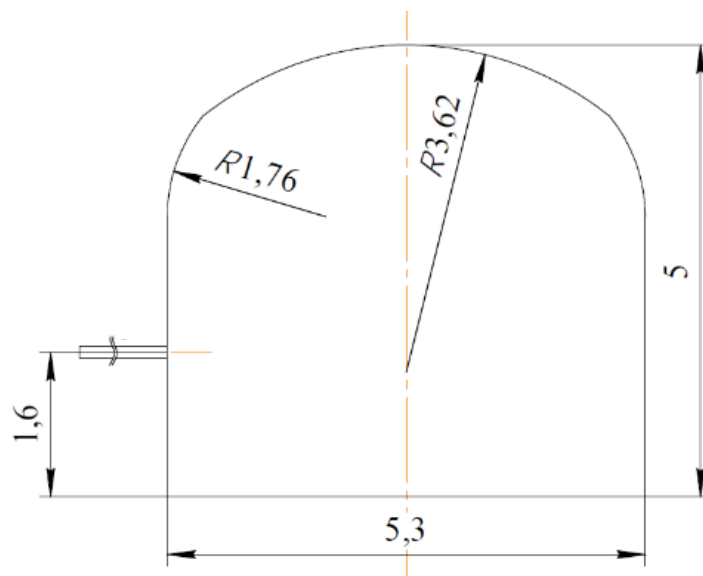
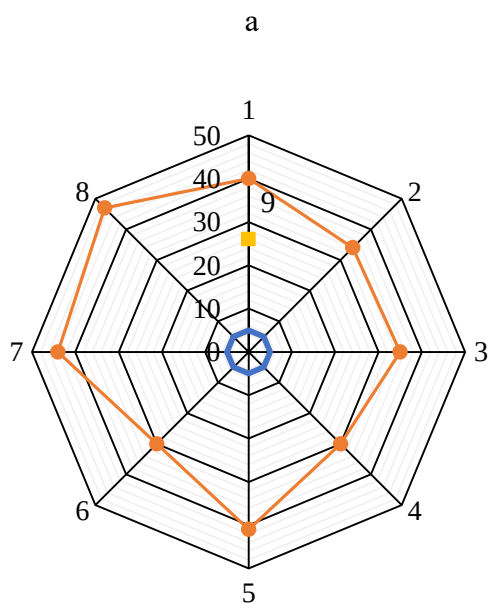
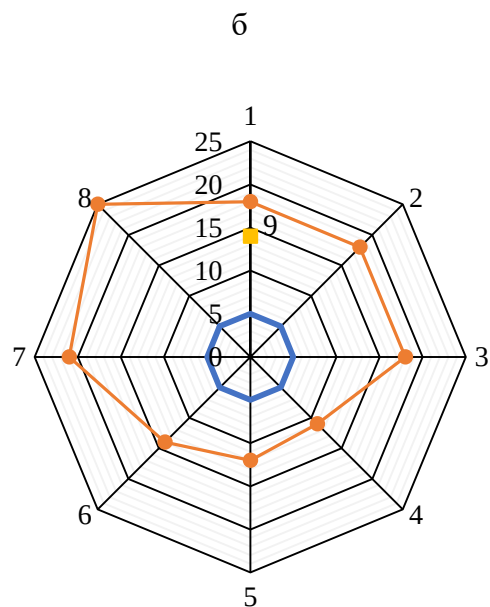


Рисунок 2.17 – Типовое поперечное сечение горной выработки для условий рудников КФ АО «Апатит»

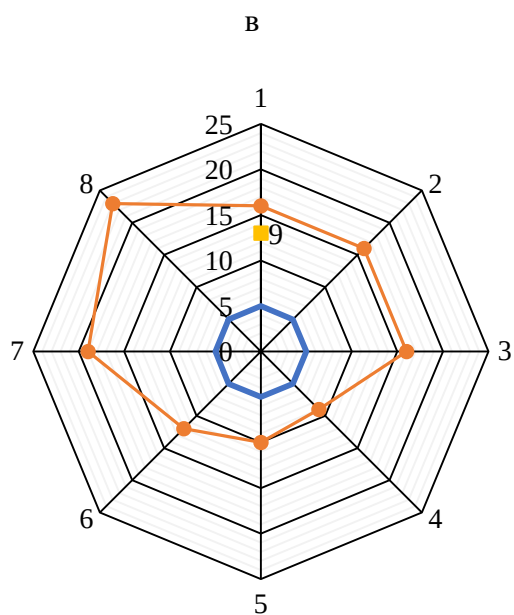
Результаты инструментальных измерений представлены на рисунке 2.18, 2.19 и в таблице 2.4.



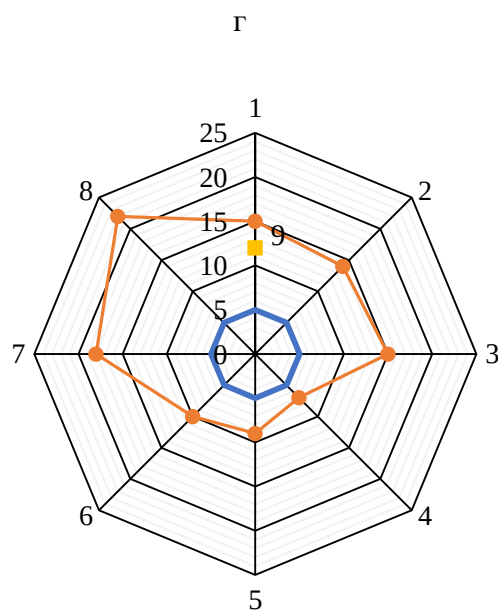
Радиальные смещения стенок
измерительной скважины по
направлениям, мкм



Радиальные смещения стенок
измерительной скважины по
направлениям, мкм



Радиальные смещения стенок
измерительной скважины по
направлениям, мкм

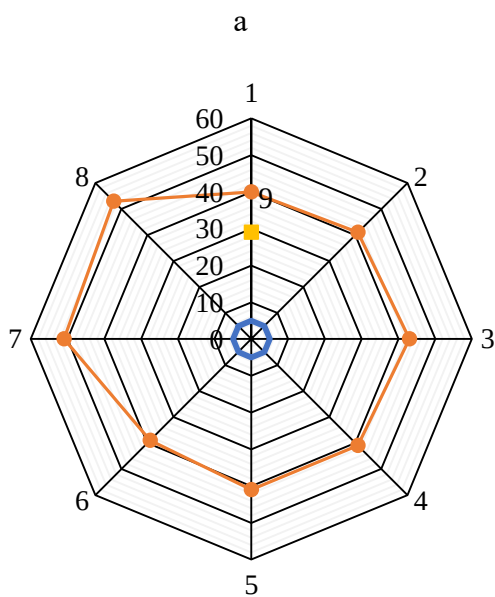


Радиальные смещения стенок
измерительной скважины по
направлениям, мкм

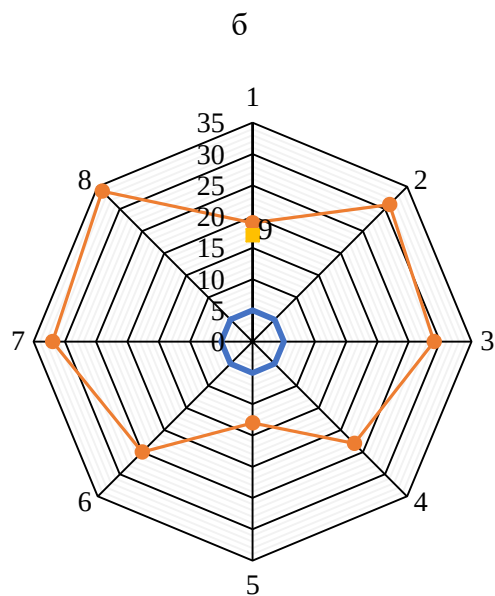
— Исходные данные

— Обустройство измерительной скважины

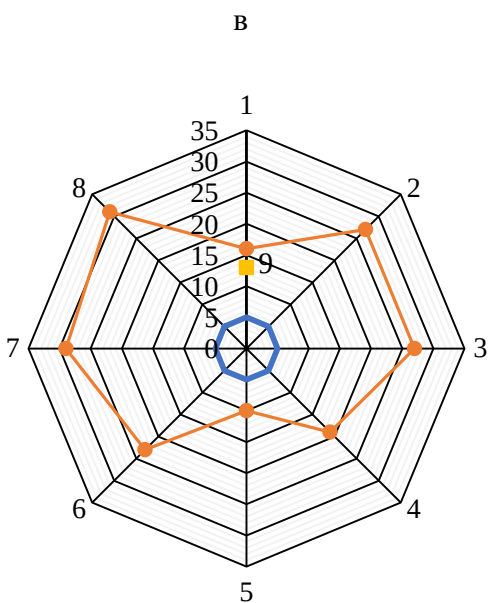
Рисунок 2.18 – Результаты измеренных радиальных смещений стенок измерительной скважины трехкомпонентным датчиком по схеме а: а – глубина измерений 0,7 м; б – глубина измерений 2 м; в – глубина измерений 4 м; г – глубина измерений 6 м



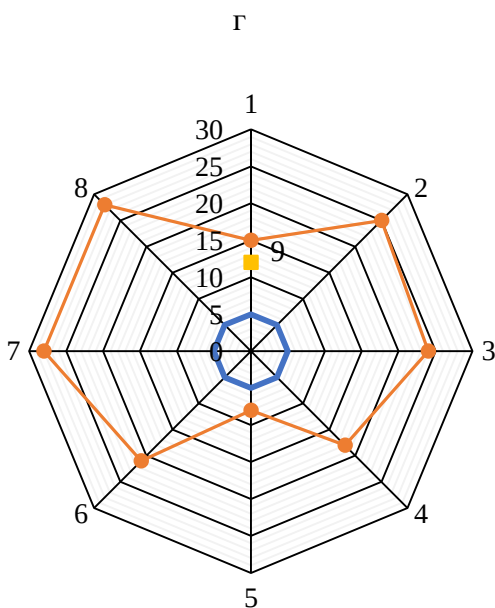
Радиальные смещения стенок
измерительной скважины по
направлениям, мкм



Радиальные смещения стенок
измерительной скважины по
направлениям, мкм



Радиальные смещения стенок
измерительной скважины по
направлениям, мкм



Радиальные смещения стенок
измерительной скважины по
направлениям, мкм

— Исходные данные — Обустройство измерительной скважины

Рисунок 2.19 – Результаты измеренных радиальных смещений стенок измерительной скважины трехкомпонентным датчиком смещений по схеме б: а – глубина измерений 0,7 м; б – глубина измерений 2 м; в – глубина измерений 4 м; г – глубина измерений 6 м

Таблица 2.4 – Результаты измеренных радиальных смещений стенок измерительной скважины трехкомпонентным датчиком смещений в двух ортогональных скважинах

Номер измерительного участка	Глубина измерения, м	Радиальные смещения стенок измерительной скважины по чувствительным элементам при разгрузке горного массива, мкм		Суммарные радиальные смещения измерительной скважины по измерительным направлениям при разгрузке горного массива, мкм	
У.И. – 1 (схема а)	0,7	1	40	1-5	81
		5	41		
		2	34	2-6	64
		6	30		
		3	35	3-7	79
		7	44	3-7	79
		4	30	4-8	77
У.И. – 1 (схема а)	2	8	47	4-8	77
		9	26	9	26
		1	18	1-5	30
		5	12		
		2	18	2-6	32
		6	14		
		3	18	3-7	39
		7	21		
		4	11	4-8	36
		8	25		
		9	17	9	14
	4	1	16	1-5	32
		5	10		
		2	16	2-6	30
		6	12		
		3	16	3-7	40
		7	19		
		4	9	4-8	36
		8	23		
		9	13	9	13
	6	1	15	1-5	24
		2	9		
		3	14	2-6	24
		4	10		
		5	15	3-7	33
		6	18		
		7	7	4-8	29
		8	22		
		9	12	9	12
У.И. – 1 (схема б)	0,7	1	40	1-5	81
		5	41		
		2	41	2-6	80
		6	39		

Продолжение таблицы 2.4

Номер измерительного участка	Глубина измерения, м	Радиальные смещения стенок измерительной скважины по чувствительным элементам при разгрузке горного массива, мкм		Суммарные радиальные смещения измерительной скважины по измерительным направлениям при разгрузке горного массива, мкм	
У.И. – 1 (схема б)	0,7	3	43	3-7	94
		7	51		
		4	41	4-8	94
		8	53		
		9	26	9	29
	2	1	19	1-5	32
У.И. – 1 (схема б)	2	5	13	1-5	32
		2	31	2-6	56
		6	25	2-6	56
		3	29	3-7	61
		7	32	3-7	61
		4	23	4-8	57
		8	34		
		9	17	9	17
	4	1	16	1-5	27
		5	11		
		2	26	2-6	48
		6	22		
		3	28	3-7	57
		7	29		
		4	18	4-8	48
		8	30		
		9	13	9	13
	6	1	15	1-5	23
		2	8		
		3	25	2-6	46
		4	21		
		5	24	3-7	52
		6	28		
		7	18	4-8	46
		8	28		
		9	12	9	12

Установлено, что на глубине измерения 0,7 м радиальные смещения стенок измерительной скважины имеют наибольшие значения и при удалении от контура горной выработки монотонно снижаются. Данная закономерность свидетельствует о влиянии горной выработки, что необходимо учитывать при определении естественного напряженного состояния горного массива. Более подробно данное влияние будет рассмотрено в главе 3 диссертационной работы.

Результаты лабораторных испытаний кернового материала, отобранного в ходе проведения натурных испытаний представлены в таблице 2.5, а фотографии образцов до и после лабораторных испытаний представлены в приложении Г.

Таблица 2.5 – Прочностные и деформационные свойства кернового материала, отобранного из двух ортогональных скважин

№ образца	Естественная плотность, г/см ³	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона	Модуль деформации, ГПа	Предел прочности при одноосном сжатии, МПа
1-1(схема а)	2,778	54,15	0,19	0,23	147,68
1-2(схема а)	2,747	54,75	0,18	0,22	140,57
2-1(схема а)	2,832	56,84	0,19	0,22	121,6
2-2(схема а)	2,807	54,09	0,19	0,22	143,9
3-1(схема а)	2,752	62,92	0,21	0,25	143,08
3-2(схема а)	2,738	65,25	0,2	0,23	165,4
4-1(схема а)	2,818	50,26	0,2	0,2	131,67
4-2(схема а)	2,856	65,73	0,18	0,2	139,66
1-1(схема б)	2,983	70,48	0,19	0,2	132,63
1-2(схема б)	3,094	66,64	0,19	0,23	129,01
2-1(схема б)	2,784	72,01	0,21	0,27	125,05
2-2(схема б)	2,784	50,8	0,21	0,22	131,23
3-1(схема б)	2,851	48,23	0,18	0,21	123,62
3-2(схема б)	2,816	46,47	0,2	0,23	129,41
4-1(схема б)	2,753	88,03	0,18	0,2	116,36
4-2(схема б)	2,758	67,23	0,21	0,23	120,41

Исходные данные для численного моделирования были получены в ходе комплексных натурных и лабораторных исследований, включающих процедуру масштабного перехода от деформационно-прочностных характеристик кернового материала к эквивалентным параметрам массива горных пород. Данный переход реализован на основе геомеханической классификации Бениавиского (Rock Mass Rating, RMR) [72], которая посредством интегральной оценки структурных и физико-механических свойств массива позволяет выполнить корректный пересчет лабораторных данных с учетом масштабного эффекта и структурной нарушенности породного массива. Часть этой модели, включающая место проведения натурных испытаний, представлена на рисунке 2.20. Установлено, что параметр RMR равен 44. Далее были определены деформационные и прочностные свойства горного массива.

Таблица 2.6 – Исходные данные численного моделирования

Удельный вес, МН/м ³	Модуль упругости горного массива, ГПа	Коэффициент Пуассона
0,0306	13,05	0,3

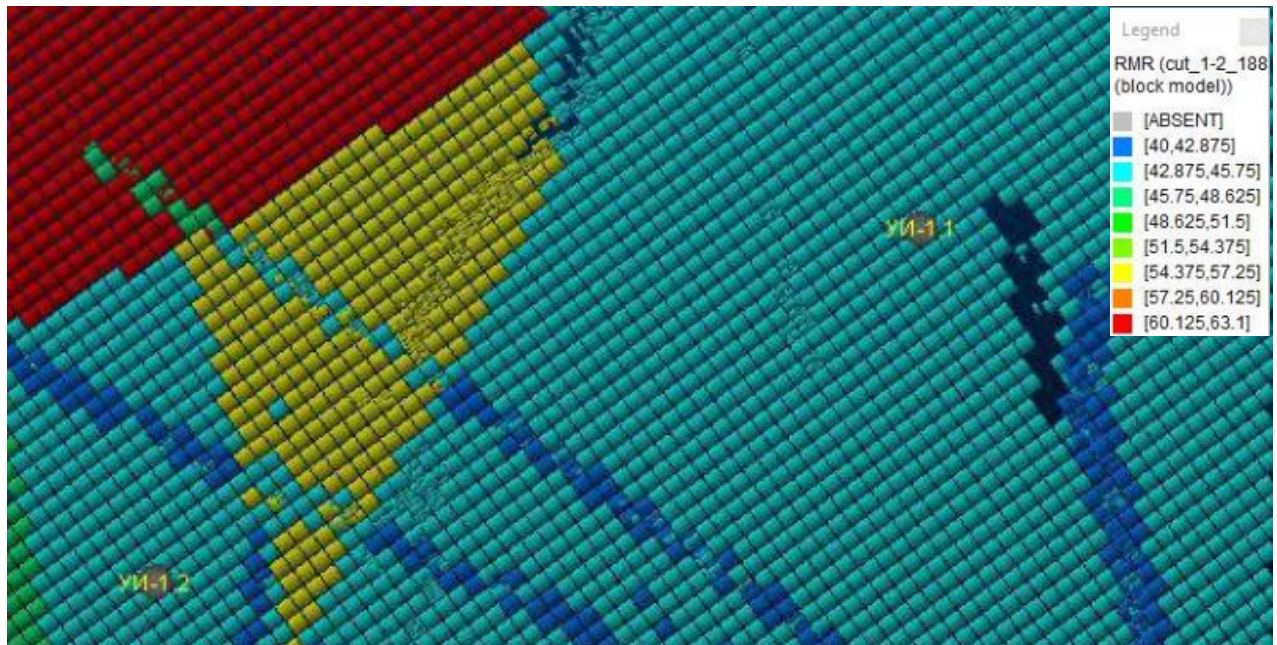


Рисунок 2.20 – Общий вид локальной геотехнической модели, демонстрирующий распределение параметра RMR

С целью получения необходимого количества значений радиальных смещений стенок измерительной скважины и деформаций горного массива, позволяющих в полной мере описать предполагаемый разброс параметров естественного напряженного состояния, было выполнено многовариантное численное моделирование. Изменяемыми характеристиками являлись главные компоненты тензора напряжений. Варианты, использованные при расчете представлены в приложении Д.

Результатом проведенного многовариантного численного моделирования являются изохромы распределения радиальных смещений стенок измерительной скважины и деформаций горного массива, представленные в приложении Е, а также закономерности их изменения (рисунки 2.21 и 2.22).

Установлено, что при увеличении коэффициента бокового давления, радиальные смещения стенок измерительной скважины и деформации горного массива монотонно увеличиваются по закону близкому к линейному. Максимальное приращение радиальных смещений стенок измерительной скважины составило 110 мкм, линейных и угловых деформаций горного массива: 570 и 690 соответственно. Аналогичная закономерность наблюдается при увеличении угла поворота главных напряжений. Максимальное приращение радиальных смещений стенок измерительной скважины составило 28 мкм, линейных и угловых деформаций горного массива: 470 и 570.

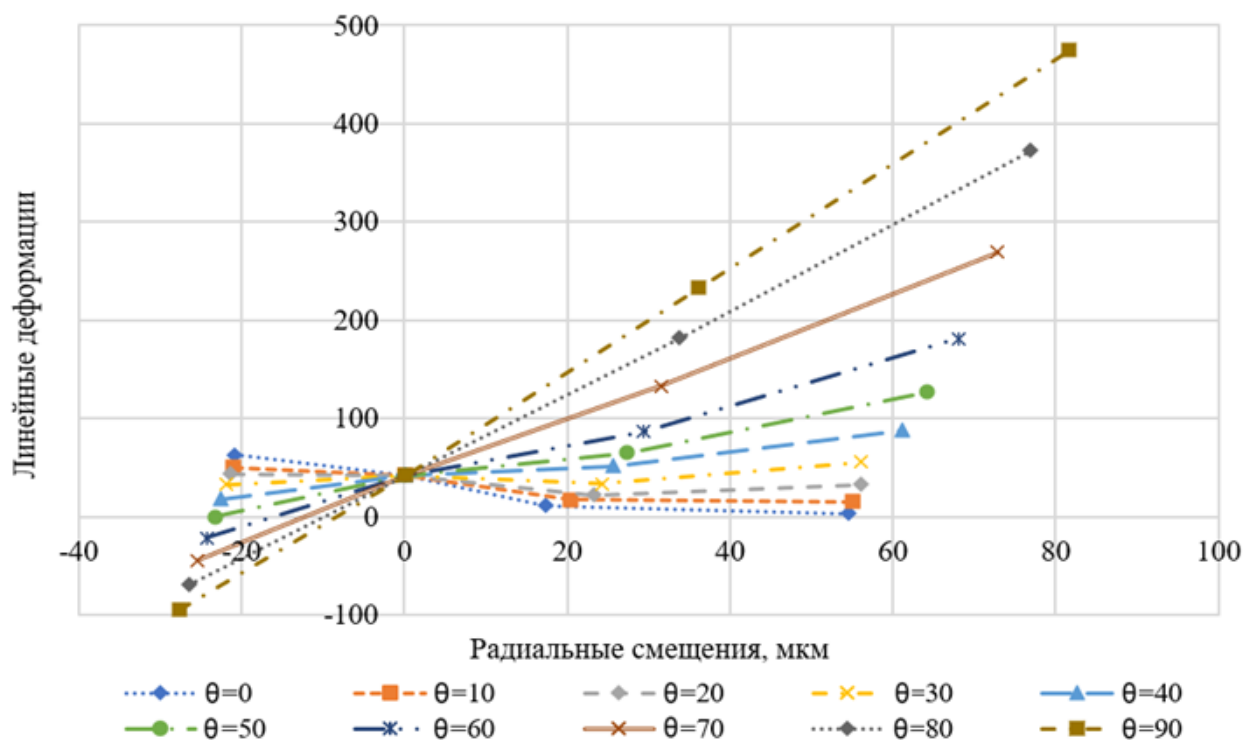


Рисунок 2.21 – Закономерности изменения радиальных смещений стенок измерительной скважины и линейных деформаций горного массива: θ – угол поворота главных напряжений, град

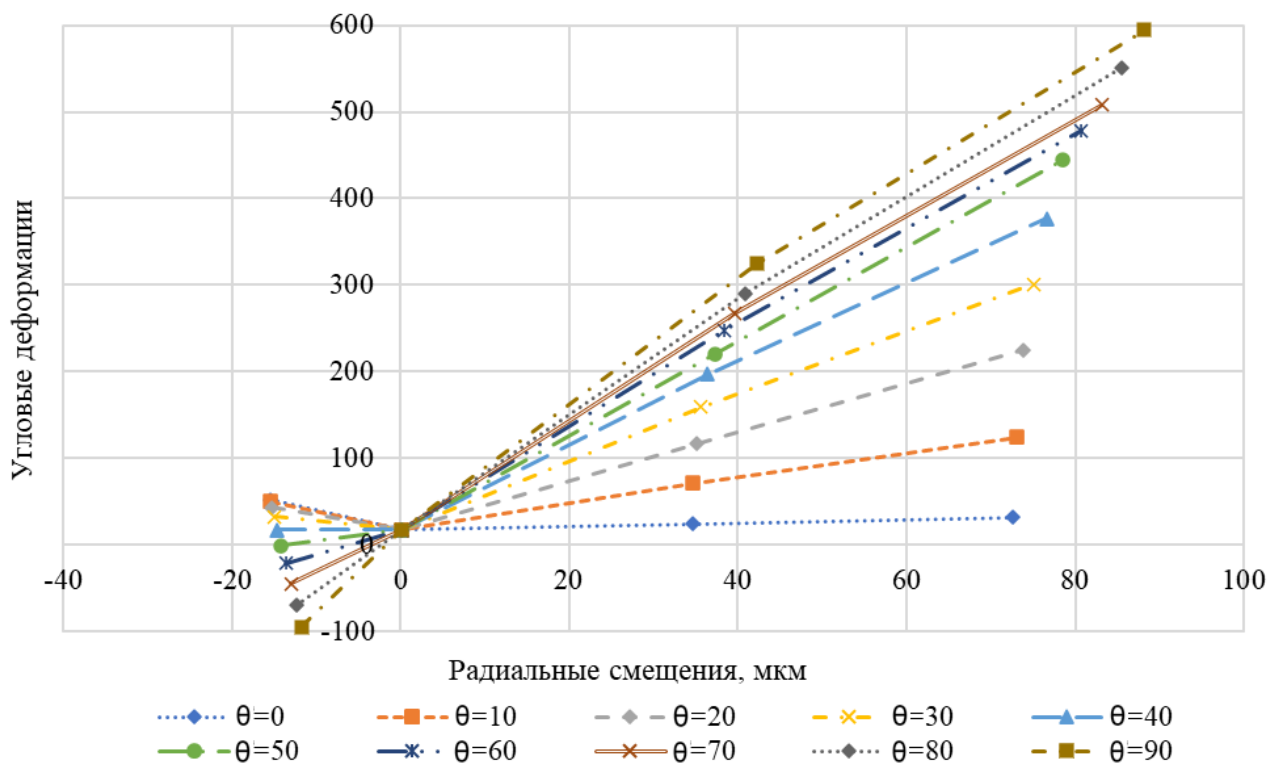


Рисунок 2.22 – Закономерности изменения радиальных смещений стенок измерительной скважины и угловых деформаций горного массива: θ – угол поворота главных напряжений, град

Выявленный диапазон изменения радиальных смещений стенок измерительной скважины и деформаций горного массива является достаточным для обработки данных натурных испытаний и последующего определения параметров естественного напряженного состояния.

В разработанном методе естественное напряженное состояние горного массива описывается главными напряжениями и их ориентацией, которые рассчитываются по методике, представленной в разделе 2.1.5. Основой алгоритма являются полученные зависимости изменения радиальных смещений стенок измерительной скважины и деформаций горного массива [49].

В таблице 2.7 представлены результаты определения естественного напряженного состояния горного массива по разработанному методу.

Таблица 2.7 – Результаты разработанного метода

В зоне влияния горной выработки			
Величины главных напряжений, МПа			Графическое представление
$\sigma_1 = 68,5$	$\sigma_2 = 44,6$	$\sigma_3 = 32,1$	
Направляющие косинусы наибольшего главного напряжения (σ_1)			
$l_1 = 0,77$	$m_1 = 0,63$	$n_1 = 0,1$	
Направляющие косинусы среднего главного напряжения (σ_2)			
$l_2 = 0,39$	$l_2 = 0,35$	$m_2 = 0,85$	
Направляющие косинусы наименьшего главного напряжения (σ_3)			
$l_3 = 0,51$	$m_3 = 0,69$	$n_3 = 0,52$	
За пределом зоны влияния горной выработки			
Значения главных напряжений, МПа			Графическое представление
$\sigma_1 = 47,1$	$\sigma_2 = 27,9$	$\sigma_3 = 9,9$	
Направляющие косинусы наибольшего главного напряжения (σ_1)			
$l_1 = 0,49$	$m_1 = 0,43$	$n_1 = 0,76$	
Направляющие косинусы среднего главного напряжения (σ_2)			
$l_2 = 0,39$	$l_2 = 0,67$	$m_2 = 0,63$	
Направляющие косинусы наименьшего главного напряжения (σ_3)			
$l_3 = 0,78$	$m_3 = 0,6$	$n_3 = 0,17$	

Полученные главные напряжения и их ориентации указывают на влияние горной выработки, в зоне которой наибольшее главные напряжение больше на 25% относительно значений, определенных за ее пределом; среднее главное напряжение на 27%; минимальное

главное напряжение на 59%. Важно отметить, что помимо увеличения главных напряжений, также изменяется их ориентации.

Анализ результатов натурных испытаний показал, что горная выработка оказывает влияние на определяемые радиальные смещения измерительной скважины. Это подтвердилось при выполнении численного моделирования и аналитического расчета. На рисунках 2.23 и 2.24 представлены закономерности изменения радиальных смещений стенок измерительной скважины и деформаций горного массива по длине измерительной скважины.

Установлено, что размер зоны влияния горной выработки составляет 2,65 м при пролете 5,3 м (типовое сечений в условиях рудников КФ АО «Апатит») и за ее пределами изменение радиальных смещений стенок измерительной скважины и деформаций горного массива не превышает 5%. Наибольшие значения радиальных смещений стенок измерительной скважины и деформаций горного массива были получены в интервале 0,6 – 0,8 м по длине измерительной скважины [12].

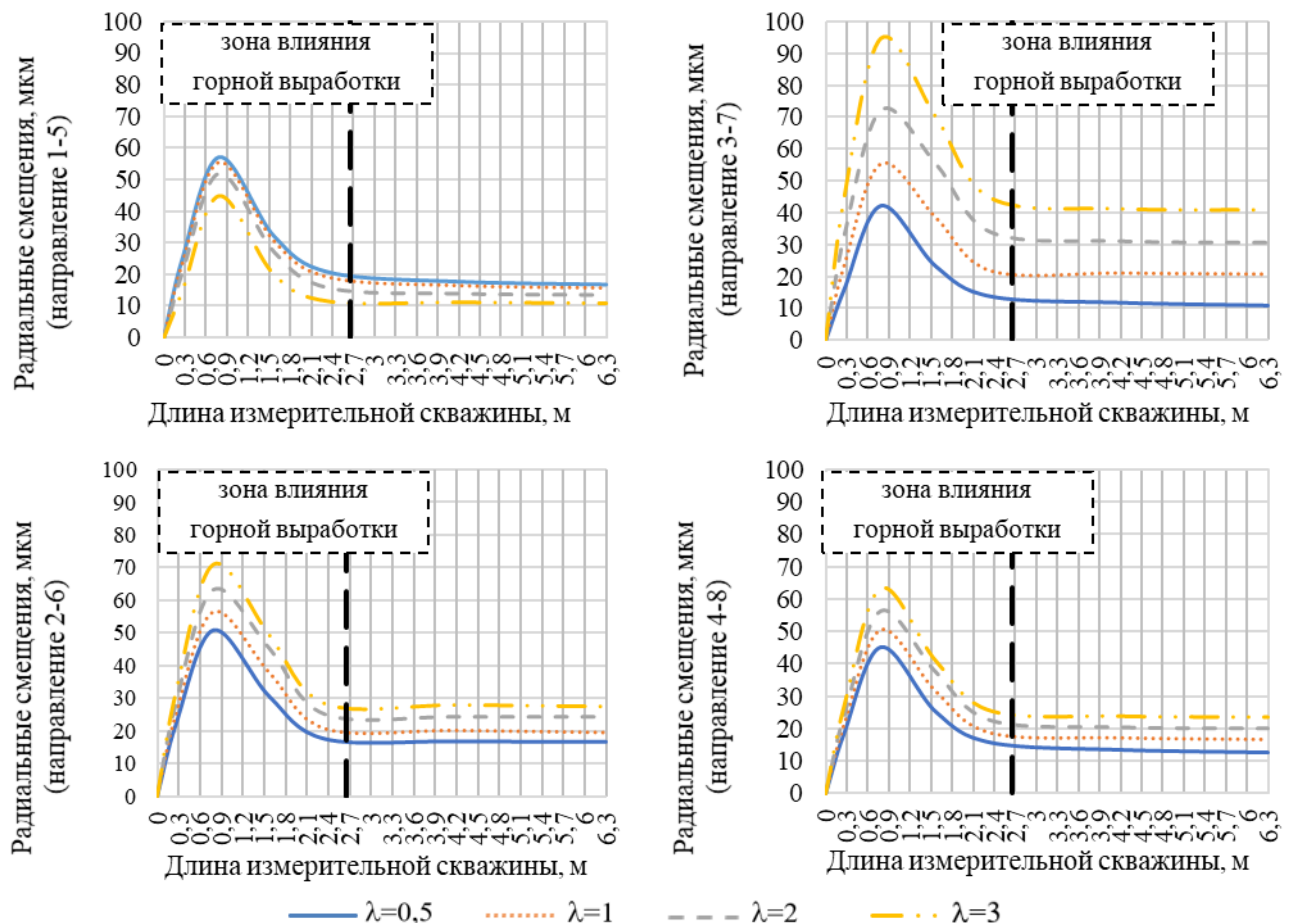


Рисунок 2.23 – Закономерности изменения радиальных смещений стенок измерительной скважины: λ – коэффициент бокового давления

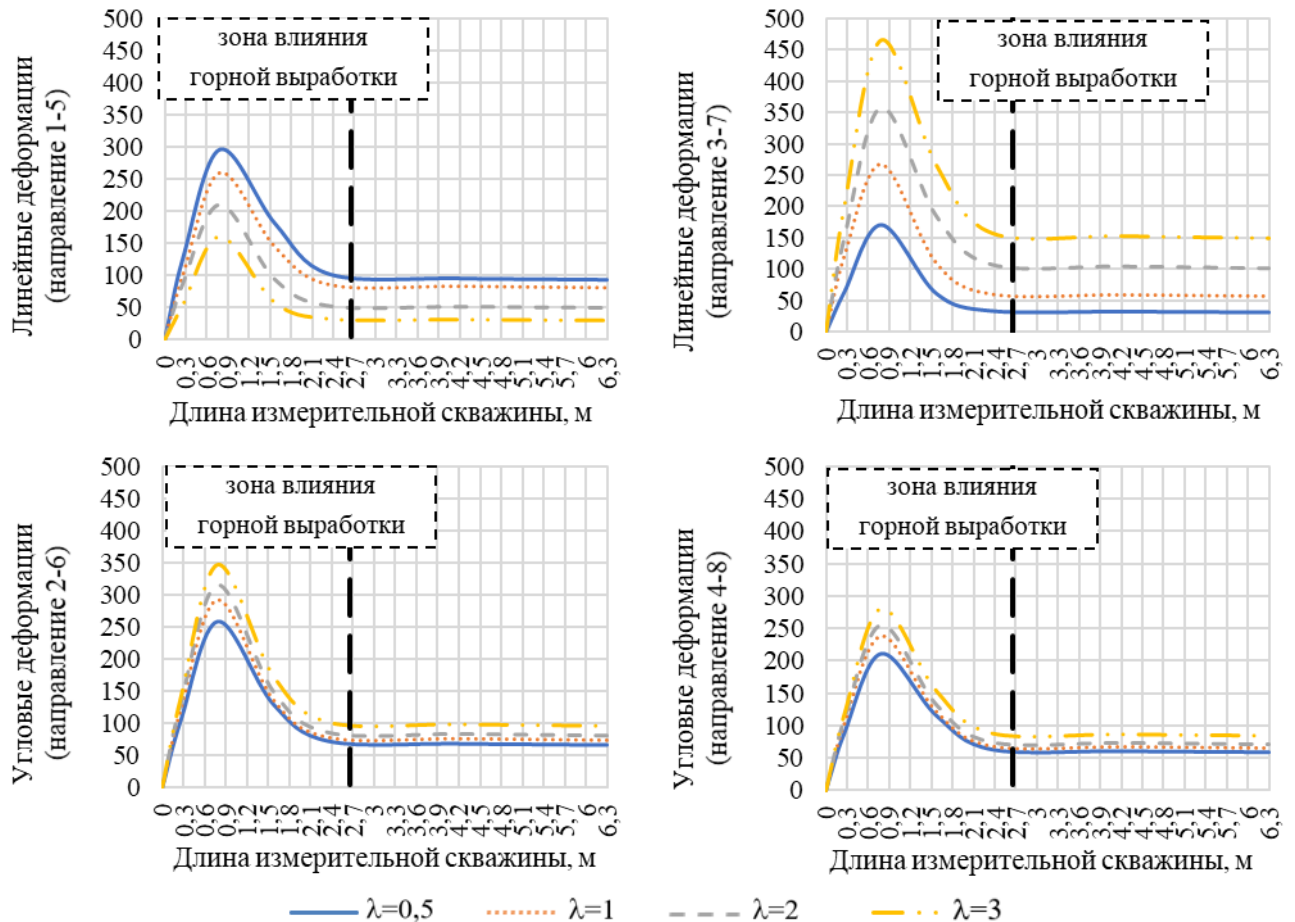


Рисунок 2.24 – Закономерности изменения деформаций горного массива:

λ – коэффициент бокового давления

Для определения размера зоны влияния горных выработок, имеющих иные размеры поперечного сечения, были рассмотрены варианты, имеющие пролет 4 м, 6 м и 8 м. На рисунке 2.25 представлены закономерности изменения радиальных смещений стенок измерительной скважины по одному из измерительных направлений для исследуемых размеров горной выработки. Закон распространения аналогичен для всех измерительных направлений.

На основании полученных закономерностей установлено следующее:

1. зона влияния горной выработки увеличивается прямо пропорционально увеличению ее пролета (рисунок 2.26);
2. при пролете горной выработки равном 4 м зона ее влияния составляет 2 м;
3. при пролете горной выработки равном 6 м зона ее влияния составляет 3 м;
4. при пролете горной выработки равном 8 м зона ее влияния составляет 4 м.

Таким образом, зона влияния горной выработки составляет половину ее пролета. Следовательно, для повышения достоверности определяемого естественного напряженного состояния горного массива, натурные испытания необходимо проводить за пределом этой зоны.

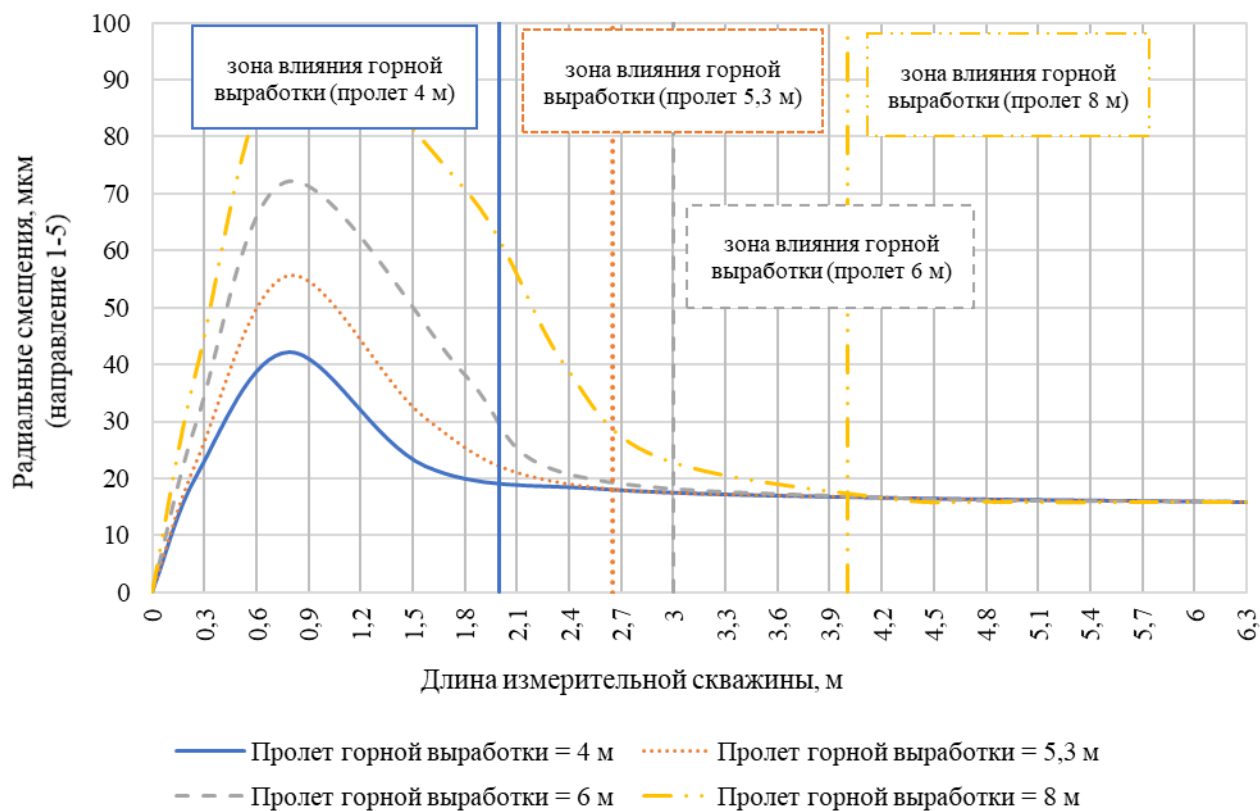


Рисунок 2.25 – Изменение радиальных смещений стенок измерительной скважины для исследуемых размеров горной выработки

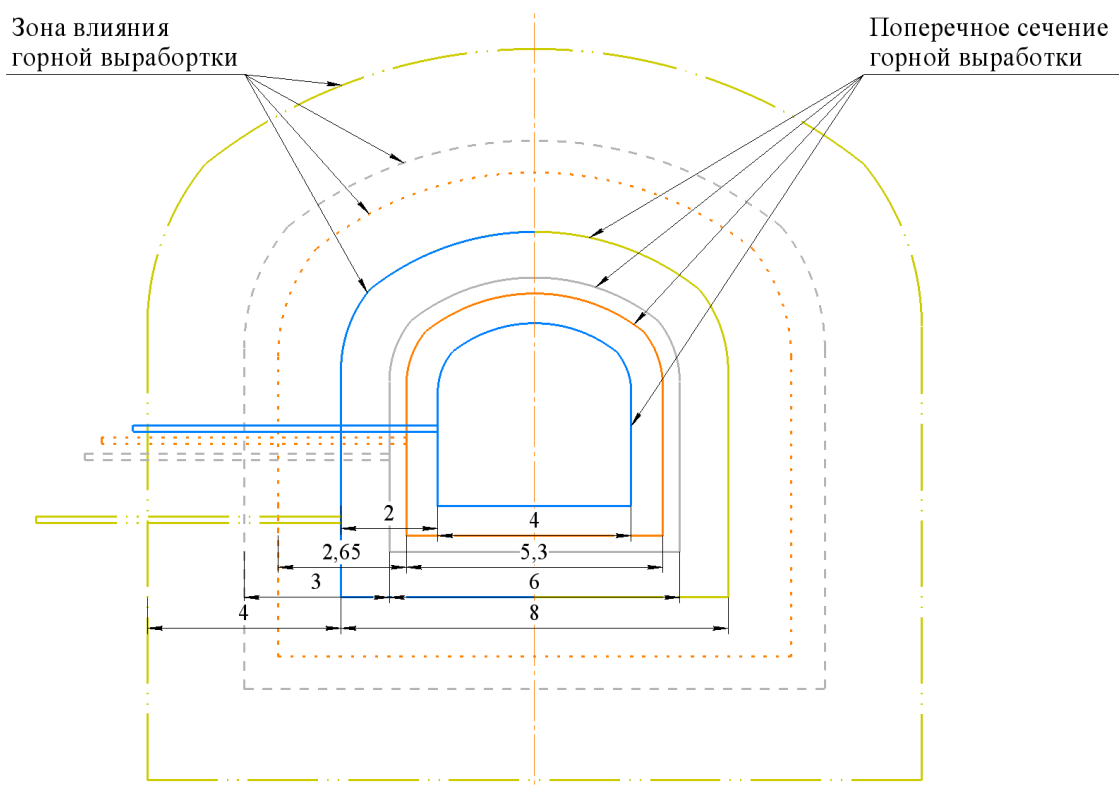


Рисунок 2.26 – Размеры зоны влияния горных выработок при различных пролетах

2.6 Сопоставление разработанного метода определения естественного напряженного состояния горного массива с методом щелевой разгрузки

Результаты разработанного метода определения естественного напряженного состояния горного массива были сопоставлены с результатами метода щелевой разгрузки в условиях скальных горных массивов месторождений Хибин. Исходные данные в обоих случаях одинаковы, так как натурные испытания проводились в непосредственной близости друг от друга (таблица 2.6). В качестве исходного напряженного состояния горного массива принимаются прогнозные напряжения для условий рудников КФ АО «Апатит»: $\sigma_1 = 35$ МПа; $\sigma_2 = 19,25$ МПа; $\sigma_3 = 5,8$ МПа, соотношение которых составляет 1:0,55:0,17 [57].

Метод щелевой разгрузки представляет собой экспериментальный подход, основанный на регистрации деформационных изменений, возникающих в стенках или забое горной выработки при формировании в ней продолговатой полости, приведенной на рисунке 2.27.

Вертикальная щель служит для фиксации горизонтальных деформаций горного массива, горизонтальная – для вертикальных деформаций. Сооружение щелей производится перфоратором, ширина щели составляет 16 ± 2 мм, длина 500 ± 20 мм, глубина щели 150 ± 30 мм.

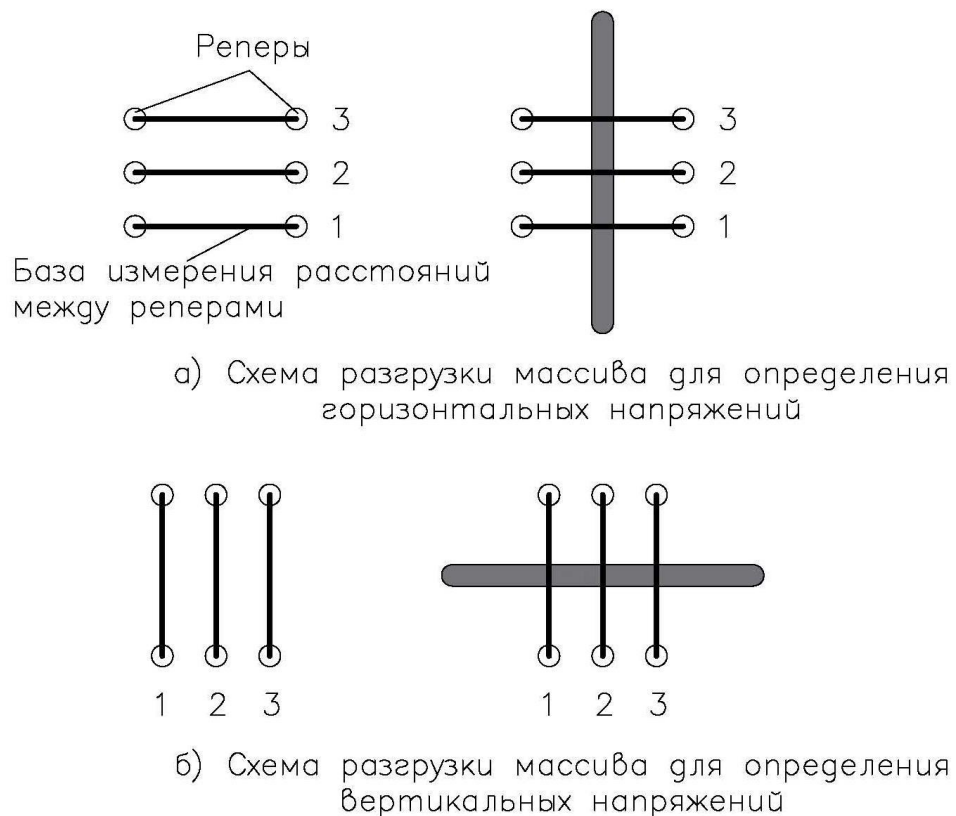


Рисунок 2.27 – Схемы определения напряжений методом щелевой разгрузки

Исходные деформации разгрузки определяются измерением расстояний между маркирующими реперами до и после сооружения щели, цифровым штангенциркулем с

точностью измерений до 0,01 мм. Результаты измерений усредняются по трем реперам (таблица 2.8).

Таблица 2.8 – Результаты замеров деформаций

№ замерной линии	Начальные деформации, мм	Деформации после формирования щели, мм	Смещение между анкерами при разгрузке, Δ мм	Усредненное смещение по базе реперов, мм
Вертикальная щель				
1	287,08	287,12	-0,04	0,05
2	287,97	287,86	0,11	
3	289,06	288,98	0,08	
Горизонтальная щель				
1	296,51	296,36	0,15	0,15
2	298,93	298,82	0,11	
3	301,63	301,44	0,19	

Необходимо отметить, что величина вертикальной компоненты естественного поля напряжений (σ_3) не влияет на распределение смещений в окрестности вертикальной щели. В связи с этим, определяется соотношение горизонтального напряжения, действующего в направлении оси выработки (σ_2), к горизонтальному напряжению, действующему в плоскости сечения выработки (σ_1). На рисунке 2.28 приведены полученные при моделировании изохромы распределения прогнозных смещений стенок вертикальной разгрузочной щели при исходном соотношении компонент напряжений.

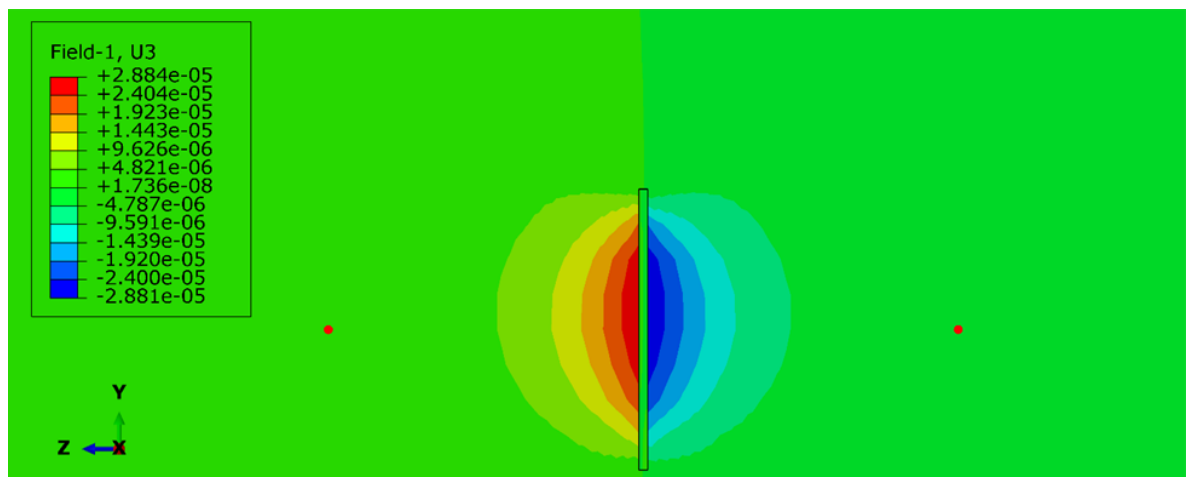


Рисунок 2.28 – Изохромы распределения продольных смещений U_z в окрестности вертикальной разгрузочной щели, м

Для анализа влияния соотношения компонент напряжений на параметры деформации стенок щели по результатам многовариантного моделирования был составлен график распределения смещений в перпендикулярном к плоскости щели направлении (для вертикальной щели – это продольные смещения U_z) (рисунок 2.29).

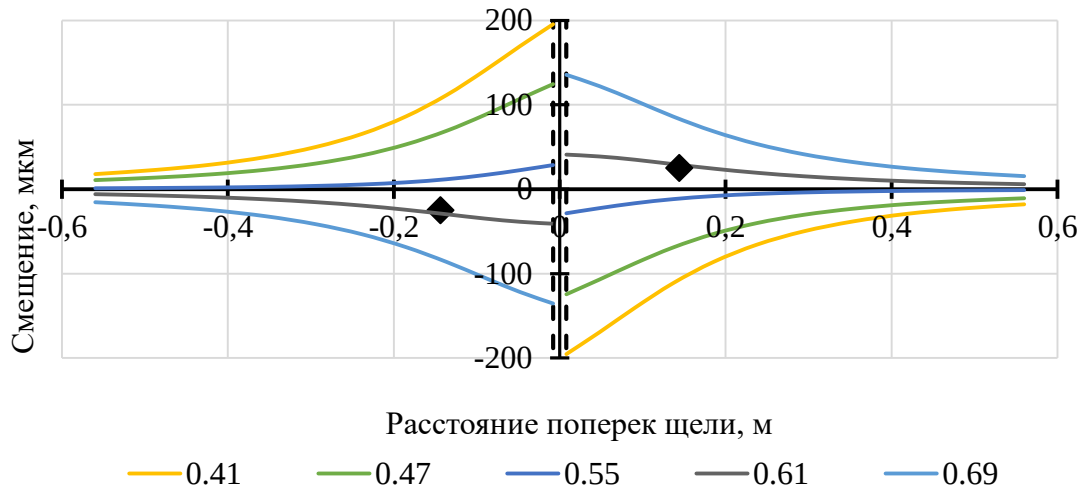


Рисунок 2.29 – Закономерности распределения смещений в окрестности разгрузочной щели при различных соотношениях компонент естественного поля напряжений

Черным ромбом отмечены усредненные смещения стенок вертикальной разгрузочной щели, измеренные в результате натурных испытаний (0,05 мм). Черным пунктиром обозначены границы разгрузочной щели. Для обеспечения такого смещения на модели необходимо естественное поле напряжений с соотношением $\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 0,60$.

Величина компоненты естественного поля напряжений, направленной вдоль оси выработки (σ_2) не влияет на распределение смещений в окрестности горизонтальной щели. В связи с этим, определяется соотношение вертикального напряжения (σ_3) к горизонтальному напряжению, действующему в плоскости сечения выработки (σ_1).

На рисунке 2.30 приведены полученные при моделировании изохромы распределения прогнозных смещений стенок горизонтальной разгрузочной щели при исходном соотношении компонент напряжений.

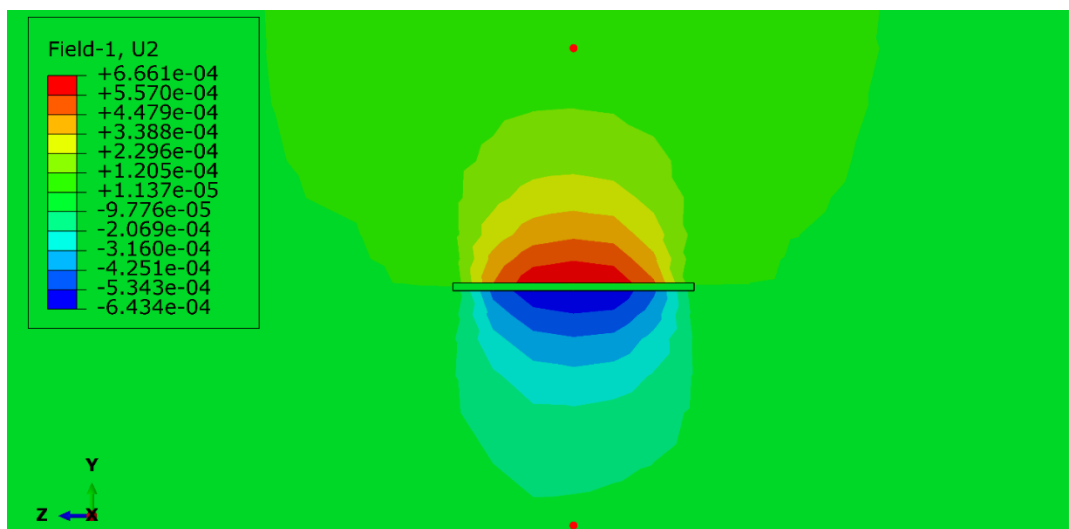


Рисунок 2.30 – Изохромы распределения продольных смещений U_y в окрестности горизонтальной разгрузочной щели, м

Для анализа влияния соотношения компонент напряжений на параметры деформации стенок щели по результатам многовариантного моделирования был составлен график распределения смещений в перпендикулярном к плоскости щели направлении (для горизонтальной щели – это вертикальные смещения U_y) (рисунок 2.31).

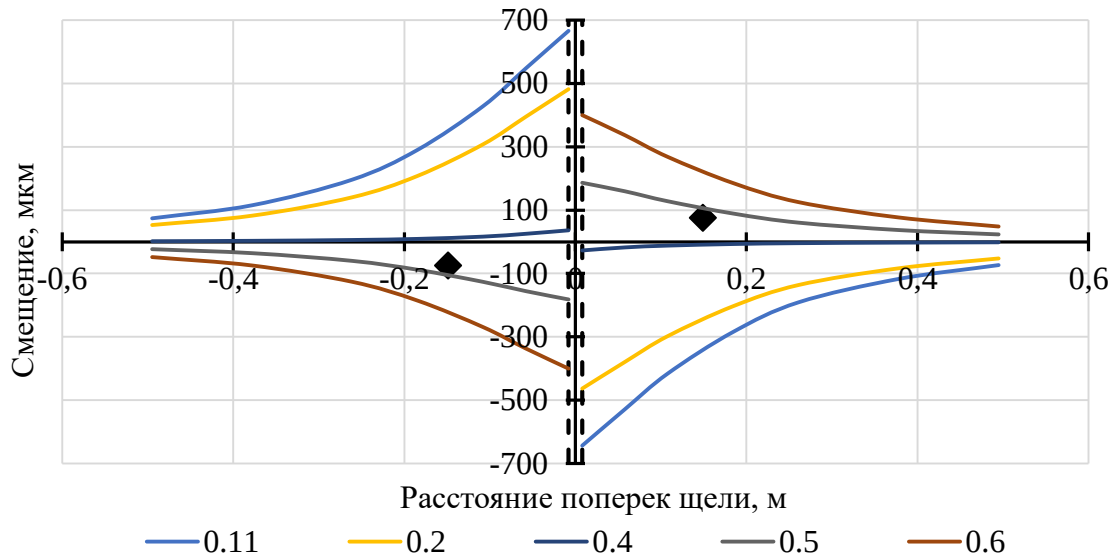


Рисунок 2.31 – Закономерности распределения смещений в окрестности разгрузочной щели при различных соотношениях компонент естественного поля напряжений

Черным ромбом отмечены усредненные смещения стенок горизонтальной разгрузочной щели, измеренные в результате натурных испытаний (0,15 мм). Черным пунктиром обозначены границы разгрузочной щели. Для обеспечения такого смещения на модели необходимо естественное поле напряжений с соотношением $\frac{\sigma_3}{\sigma_1} = 0,47$.

Проведенное исследование деформирования вертикальных и горизонтальных разгрузочных щелей демонстрирует, что соотношение между компонентами естественных напряжений составило 1:0,60:0,47, что соответствует $\sigma_1 = 35$ МПа; $\sigma_2 = 21$ МПа; $\sigma_3 = 16,45$ МПа. Однако, параметры естественного напряженного состояния горного массива с применением методом щелевой разгрузки были определены с существенным допущением, а именно расчетное наибольшее главное напряжение приравнивалось к исходному наибольшему главному напряжению.

В результате параметры естественного напряженного состояния горного массива, рассчитанные по рассматриваемым методам, выступают в качестве исходных данных для геомеханического прогноза напряженно-деформированного состояния горного массива вблизи выработки. Сравнение полученных результатов с характерными разрушениями, которые регистрируются в подземных условиях, позволило сделать вывод о том, что разработанный метод демонстрирует наибольшее сходство с реальными условиями по сравнению с методом щелевой разгрузки.

2.7 Выводы по Главе 2

Глава посвящена описанию и реализации разработанного метода определения естественного напряженного состояния горного массива апатит-нефелиновых месторождений Хибин. Представленный метод является усовершенствованной вариацией метода полной разгрузки и включает в себя: натурные испытания с применением трехкомпонентного датчика смещений, при помощи которого определяются полные тензоры деформаций и напряжений горного массива по двум ортогональным измерительным скважинам; лабораторные испытания для определения прочностных и деформационных свойств горного массива; численное моделирование, отражающее этапность проведения натурных испытаний, с целью получения зависимостей радиальных смещений стенок измерительной скважины от деформаций горного массива; аналитический расчет естественного напряженного состояния горного массива – главных напряжений и их ориентации.

В ходе исследования были получены следующие результаты:

1. Разработана методика проведения натурных испытаний с применением трехкомпонентного датчика смещений. Осуществлена ее реализация в условиях скальных горных массивов месторождений Хибин и измерены радиальные смещения стенок измерительной скважины.
2. Определены деформационно-прочностные свойства керна материала. На основании корреляционных зависимостей и поправочных коэффициентов, учитывающих структурные особенности и масштабный эффект, были получены эквивалентные параметры горного массива.
3. Определены закономерности изменения радиальных смещений стенок измерительной скважины и деформаций горного массива в результате многовариантного численного моделирования в пространственной постановке.
4. Установлено, что при увеличении коэффициента бокового давления, радиальные смещения стенок измерительной скважины и деформации горного массива монотонно увеличиваются по закону близкому к линейному. Аналогичная закономерность наблюдается при увеличении угла поворота главных напряжений.
5. Горная выработка оказывает существенное влияние на определяемые параметры естественного напряженного состояния горного массива. В зоне ее влияния главные напряжения примерно в 2 раза превышают значения, определенные за ее пределом.
6. Определено, что размер зоны влияния горной выработки зависит от размеров ее поперечного сечения и составляет половину пролета. Для повышения достоверности определяемого естественного напряженного состояния горного массива натурные испытания необходимо проводить за пределом этой зоны.

ГЛАВА 3 УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ТРЕЩИНОВАТОСТИ ГОРНОГО МАССИВА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЕГО ЕСТЕСТВЕННОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТОДОМ КОЛЬЦЕВОЙ РАЗГРУЗКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ДАТЧИКА СМЕЩЕНИЙ

3.1 Характеристики скального массива

Апатит-нефелиновое месторождение Хибин – скальный массив, который подвергается значительному видоизменению в результате процессов, происходивших в течение его формирования, а также при строительстве и эксплуатации подземных сооружений. В отличие от иных типов горных массивов, он имеет ряд особенностей, определяющих его механическое состояние, среди которых выделяются: трещиноватость, слоистость, блочность, сланцеватость, напряженное состояние и т.д. Совокупное влияние перечисленных параметров приводит к тому, что процессы, протекающие в скальном горном массиве, который является неоднородной дискретной анизотропной средой, имеют нелинейный характер.

С.Н. Чернышев под скальным массивом понимал геологическое тело, состоящие из скальных грунтов, взаимодействующие с сооружением [54]. Исследования скальных массивов, которые сложены крупными и прочными породами и имеют различные нарушения (трещиноватость, раздробленность и т.д.), продемонстрировали значительное количество неопределенностей, связанных с определением механических свойств. Также на их поведение существенное влияние оказывает естественное (тектоническое) напряженное состояние и гидрогеологический режим.

Структурно-геомеханическая характеристика скального массива определяется как комплексная система, включающая: структурные параметры - пространственную организацию геологических тел (элементы залегания, морфология и т.д.); состояние массива, характеризующее совокупностью факторов (трещиноватость, степень выветрелости по стандартным шкалам, водонасыщенность, карстовые проявления и т.д.), которые совместно определяют его деформационно-прочностные свойства и устойчивость. Данная система описывается через интегральные показатели (индекс качества пород RQD, коэффициент трещиноватости) и учитывает как макроструктурные особенности, так и микроструктурные изменения пород, обусловленные тектоническими, гипергенными и гидротермальными процессами. [35,48,51].

При рассмотрении скального массива и его взаимодействия с инженерными сооружениями особое внимание следует уделять трещиноватости (нарушению сплошности), сигнализирующей о наличии трещин. Трещина представляет собой разрыв сложной формы в скальной породе, заполненный минеральным образованием, жидкостью или газом. Основная

особенность трещин заключается в преобладании продольного размера над поперечным (длина кратно больше ширины). В процессе их изучения был выделен ряд классификаций по различным признакам:

1. **по происхождению:** первичные – результат расплава при формировании горной породы; тектонические – результат перемещения земной коры; гипергенные – результат взаимодействия скальной породы с атмосферой и гидросферой.

2. **по степени открытия:** скрытые – тонкие трещины, едва заметны при осмотре; закрытые – трещины с плотно сжатыми стенками, видны при осмотре; открытые – трещины имеют заполненные материалом, жидкостью, либо газом полости раскрытия.

3. **по форме стенок:** трещина отрыва – поверхность стенки трещины представляет собой бугры (округлая форма); трещины скола – поверхность стенки трещины представляет собой уступы (угловая форма); трещины скольжения – поверхность стенки трещины представляет собой борозды.

4. **по абсолютной ширине** (таблица 3.1).

5. **по абсолютной длине** (таблица 3.2).

Таблица 3.1 – Классификация трещин по абсолютной ширине [54,58]

Ширина трещины, см	Уровни				
	По Л.И. Нейштадту	По Е.С. Ромму	По Ж. Феррану и В. Тенозу	По В.Н. Жиленкову	Рекомендуемые
10 ⁴	Очень крупные трещины	Макротрещины	Макротрещины	Крупные трещины	Зоны дробления разрывов
10 ³					Щели (зияющие или заполненные)
10 ²					
10 ¹	Крупные трещины			Трещины	Средние трещины
1	Средние трещины				
10 ⁻¹	Мелкие трещины				
10 ⁻²	Тонкие трещины	Микротрещины	Тонкие трещины	Мелкие трещины	Узкие трещины
10 ⁻³			Микротрещины		Капилляры
10 ⁻⁴					
10 ⁻⁵					
10 ⁻⁶					

Таблица 3.2 – Классификация трещин по абсолютной длине [36,54]

Протяженность трещин, см	Уровни					
	По Мюллеру	По М.В. Рацу и С.Н. Чернышеву	По В.Н. Жиленкову	По Н.С. Красиловой	Рекомендуемые	
10 ⁸	Нарушения	Крупные тектонические разрывы	Разломы I и II порядка	Мегатрещины (разрывные нарушения)	Крупные тектонические разрывы	
10 ⁷		Разрывы	Разломы III порядка		Разрывы	
10 ⁶						
10 ⁵						
10 ⁴	Гигантские трещины	Макротрещины (трещины)	Крупные трещины	Макротрещины (мезотрещины)	Длинные трещины	
10 ³	Крупные трещины		Трещины		Средние трещины	
10 ²	Мелкие трещины		-		Микротрещины	Короткие трещины
10 ¹						
1	Скрытые трещины	Микротрещины		Ультратрещины		Микротрещины
10 ⁻¹						
10 ⁻²						
10 ⁻³						
10 ⁻⁴		Дефекты кристаллической решетки				

Таким образом, исследование скального массива напрямую связано с исследованием влияния трещиноватости на процессы, непрерывно протекающие в нем. При определении естественного напряженного состояния горного массива в рамках разработанного метода, также необходимо учитывать влияние трещиноватости. В диссертационной работе принимались во внимание два масштабных уровня трещиноватости горного массива: трещиноватость, размер которой кратно меньше измерительной скважины (микроструктурная трещиноватость) и трещиноватость, сопоставимая по размерам с измерительной скважиной.

3.2 Учет влияния микроструктурной трещиноватости

При определении естественного напряженного состояния горного массива в рамках разработанного метода, трещиноватость, размер которой кратно меньше измерительной скважины (микроструктурная трещиноватость), учитывается посредством использования эффективных свойств квазисплошной среды. С целью определения этих свойств существуют различные системы оценки горного массива (рейтинговые классификации):

1. индекс определения качества горных пород (*RQD*);

2. геомеханическая классификация породного массива Бартон (рейтинговая система Q);
3. геомеханическая классификация породного массива Бениявского (рейтинговая система RMR);
4. геологический индекс прочности массива (GSI).

3.2.1 Индекс определения качества горны пород (RQD)

Индекс определения качества горной породы (RQD) был разработан с целью исследования горного массива при проведении натурных испытаний по состоянию кернового материала [63,79,109]. Измерения производятся вдоль центральной оси неповрежденного кернового материала, длина которых превышает 10 сантиметров (рисунок 3.1). Искусственные разрывы, вызванные буровыми работами, при расчете не учитываются.

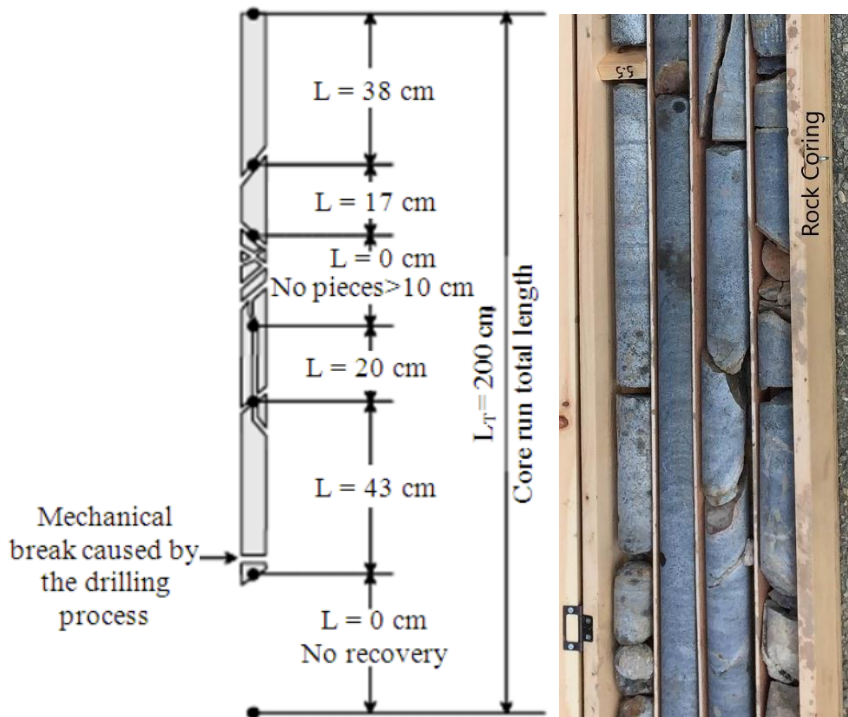


Рисунок 3.1 – Определение качества горных пород (RQD) [79]

Общее представление индекса определения качества горных пород описывается зависимостью (3.1):

$$RQD = \frac{\sum \text{длина ненарушенных кусков} > 10 \text{ см}}{\text{общая длина кернового материала}} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

После подставления значений, указанных на рисунке 3.1, определяемый параметр имеет вид (3.2):

$$RQD = \frac{L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6}{L_T} \cdot 100\% = \frac{38 + 17 + 0 + 20 + 43 + 0}{200} \cdot 100\% = 59\% \quad (3.2)$$

Научным сообществом были установлены критерии качества горного массива, взаимосвязанные с численным значением индекса RQD , представленные в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Соответствие между индексом RQD и качеством горной породы [79]

Величина индекса RQD , %	Качество горной породы
< 25	Очень плохое
25-50	Плохое
50-75	Среднее
75-90	Хорошее
90-100	Отличное

С увеличением индекса RQD улучшается качество горной породы. Простота и высокая скорость исполнения операций при использовании данного подхода, а также низкая стоимость и малая трудоемкость, предопределяют его частое использование. Помимо этого, индекс определения качества горной породы (RQD) является одним из компонентов в других рейтинговых классификациях [79].

3.2.2 Геомеханическая классификация породного массива Бартон (рейтинговая система Q)

Геомеханическая классификация породного массива Бартон была разработана с целью определения параметров крепления тоннелей, пройденных в скальных массивах [68,69,70]. Проведенный анализ более 200 случаев деформации горных выработок позволил установить статистически значимую корреляцию между индексом качества породного массива Q и типом применяемой постоянной крепи: $Q=0,001$ соответствует крайне неблагоприятным геомеханическим условиям, характеризующимся критически низкой устойчивостью породного обнажения; $Q=1000$ отражает исключительно благоприятные условия с предельно высокой устойчивостью массива.

Параметр Q определяется на основании 6 параметров структурной нарушенности породного массива и описывается зависимостью (3.3):

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}, \quad (3.3)$$

где RQD – параметр качества горной породы по состоянию керна; J_n – параметр количества систем трещин; J_r – параметр шероховатости трещины; J_a – параметр сцепления поверхностей трещин; J_w – параметр, учитывающий обводнение массива; SRF (Stress Reduction Factor) – параметр, учитывающий действующие напряжения.

Зависимость (3.3) характеризует следующие параметры: $\frac{RQD}{J_n}$ – интенсивность трещиноватости (при уменьшении систем трещин качества породного массива улучшается); $\frac{J_r}{J_a}$ – силы трения по контакту между трещинами (увеличение данного параметра соответствует

улучшению качества породного массива); $\frac{J_w}{SRF}$ – давление воды в трещинах и естественное напряженное состояние горного массива (уменьшение давление воды при благоприятном естественном напряженном состоянии приводит к улучшению качества породного массива).

Результаты проведенных исследований [69] позволили разработать классификационную шкалу оценки состояния породного массива на основе геомеханического индекса Q (таблица 3.4). Таблица 3.4 – Зависимость между значениями геомеханического индекса Q и состоянием породного массива [69]

Величина параметра Q	Состояние породного массива
400 – 1000	Невероятно хорошее
100 – 400	Экстремально хорошее
40 – 100	Очень хорошее
10 – 40	Хорошее
4 – 10	Среднее
1 – 4	Плохое
0,1 – 1	Очень плохое
0,01 – 0,1	Экстремально плохое
0,001 – 0,01	Невероятно плохое

Таким образом, геомеханическая классификация породного массива Бартон (рейтинговая система Q) позволяет оценить состояние породного массива и дать рекомендации по креплению выработок.

3.2.3 Геомеханическая классификация породного массива Бениявского (рейтинговая система RMR)

Геомеханическая классификация породного массива Бениявского (рейтинговая система RMR) была разработана с целью определения структурной нарушенности породного массива и описывается зависимостью (3.4) [73,74,96]:

$$RMR = J_{A1} + J_{A2} + J_{A3} + J_{A4} + J_{A5} + J_B + J_T, \quad (3.4)$$

где J_{A1} – параметр, зависящий от прочности породы в условиях одноосного сжатия прочности породы; J_{A2} – параметр, зависящий от качества горной породы по состоянию керна; J_{A3} – параметр, зависящий от расстояния между трещинами; J_{A4} – параметр, зависящий от качества контакта по трещинам; J_{A5} – параметр, зависящий от обводненности трещин; J_B – параметр, зависящий от направления трещиноватости; J_T – параметр, зависящий от времени существования горной выработки.

Параметр RMR совершенствуется и видоизменяется, устанавливается степень влияния его составляющих (наибольшее влияние оказывают показатели J_{A3} и J_{A4}).

Анализ методов геомеханической классификации позволяет заключить, что система RMR (Rock Mass Rating), разработанная Бениявским, представляет собой наиболее репрезентативный

и эффективный инструмент для комплексной оценки структурной нарушенности породных массивов без значительных затрат на натурные испытания.

3.2.4 Геологический индекс прочности массива (*GSI*)

Геологический индекс прочности массива (*GSI*) был разработан с целью определения механического поведения горного массива с учетом структурных нарушенностей и степени трещиноватости [83,86,103]. Данный параметр определяется в результате визуального осмотра исследуемого массива опытным геологом и последующего сопоставления со специальной диаграммой (графиками Хока) (рисунок 3.2) [83].

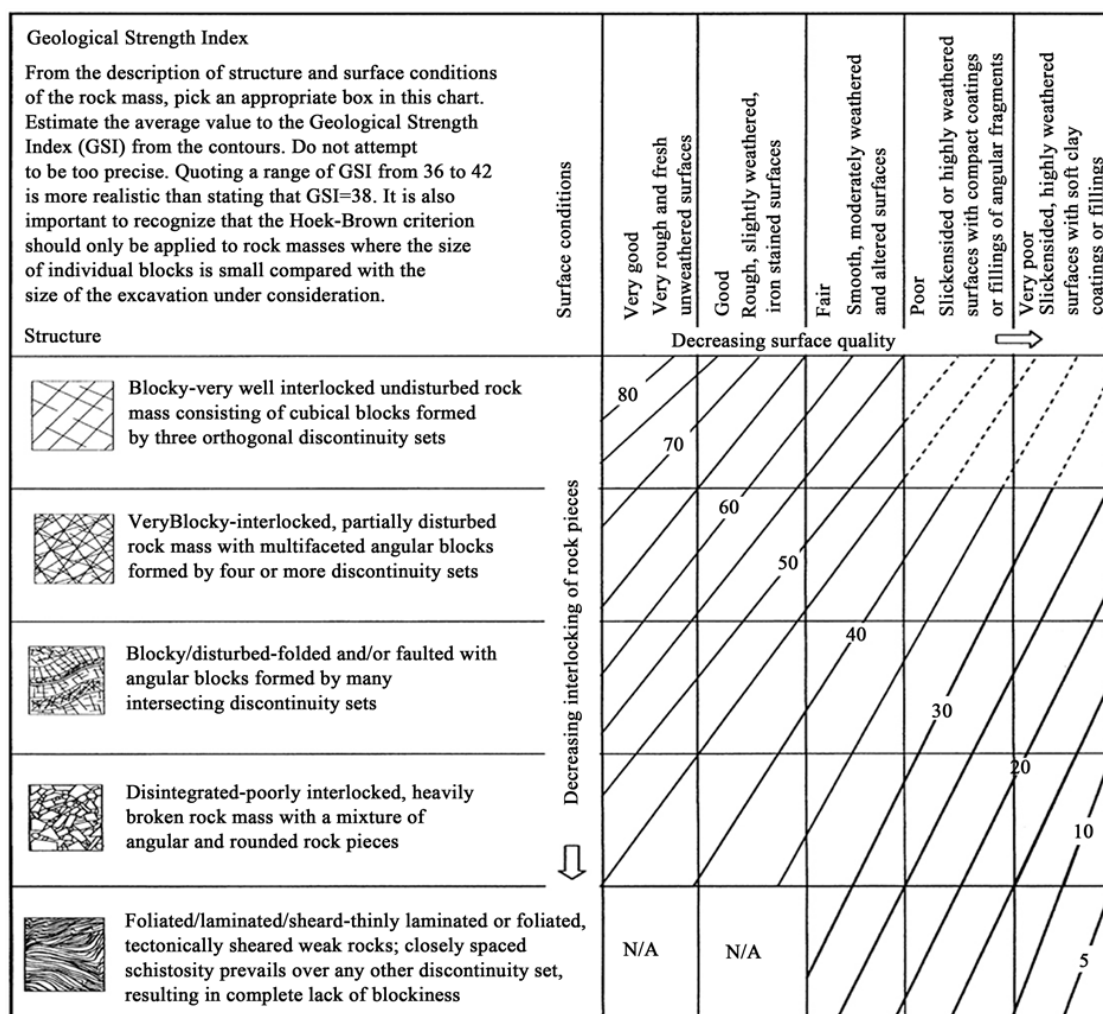


Рисунок 3.2 – Графики Хока для сопоставления индекса *GSI* и состояния горного массива [83]

Параметр *GSI* можно определить на основании критерия Бениавского [83] и показателя качества горной породы по состоянию керна (*RQD*) (3.5):

$$GSI = 1,5 \cdot J_{Cound89} + \frac{RQD}{2}, \quad (3.5)$$

где $J_{Cound89}$ – рейтинг горной породы [83].

Помимо этого, параметр *GSI* выражается с помощью рейтинга Бартона (3.6) [86]:

$$GSI = \frac{52 \cdot \frac{J_r}{J_a}}{1 + \frac{J_r}{J_a}} + \frac{RQD}{2} \quad (3.6)$$

Таким образом, геологический индекс прочности массива (GSI) связывает механическое поведение горного массива с его геологическим строением. Особенное значение данный параметр имеет для трещиноватых и неоднородных пород, где стандартные лабораторные испытания дают завышенные значения прочности.

Необходимо отметить, что системы оценки горного массива (рейтинговые классификации), рассмотренные в данном разделе, не могут быть использованы как обособленные подходы и должны являться частью комплексной методики по определению состояния горного массива.

3.2.5 Определение эффективных свойств квазисплошной среды

Под эффективными свойствами квазисплошной среды в рамках разработанного метода понимаются прочностные и деформационные свойства горного массива (модуль упругости E_m , коэффициент Пуассона ν_m , предел прочности при одноосном сжатии σ_m), определенные с учетом его состояния. В таблице 3.5 приведены математические выражения исследуемых эффективных свойств.

Таблица 3.5 – Формулы вычисления эффективных свойств [93,102]

№	Критерий	Математическое выражение	
1	Nicholson and Bieniawski [94]	$E_m = 0,01 \cdot E_i \cdot (0,0028 \cdot RMR^2 + 0,9 \cdot e^{\frac{RMR}{22,83}})$	(3.7)
2	Mitri и др.[92]	$E_m = E_i \cdot \left[0,5 \cdot \left(1 - \left(\cos \frac{\pi \cdot RMR}{100} \right) \right) \right]$	(3.8)
3	Carvalho [76]	$E_m = E_i \cdot s^{0,25}, s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3 \cdot D}\right)$	(3.9)
4	Hoek and Diederichs [85]	$E_m = E_i \cdot \left(0,02 + \frac{1 - 0,5 \cdot D}{1 + e^{\left(\frac{(60+15 \cdot D - GSI)}{11}\right)}} \right)$	(3.10)
5	Yudhbir и др. [108]	$\sigma_m = \sigma_i \cdot e^{\left(\frac{7,65 \cdot (RMR-100)}{100}\right)}$	(3.11)
6	Bhasin and Grimstad [71]	$\sigma_m = \frac{\sigma_i \cdot 7 \cdot \gamma}{100} \cdot Q^{\frac{1}{3}}$	(3.12)
7	Hoek и др. [84]	$\sigma_m = \sigma_i \cdot s^a, s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3 \cdot D}\right)$ $a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot \left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right)$	(3.13)
8	Aydan и др. [66]	$\nu_m = \nu_i \cdot \left(2,5 - 1,5 \cdot \left(\frac{RMR}{RMR + (100 - RMR)} \right) \right)$	(3.14)
9	Vásárhelyi [105]	$\nu_m = -0,002 \cdot GSI + \nu_i + 0,2$	(3.15)
10		$\nu_m = -0,017 \cdot \ln Q + \nu_i + 0,12$	(3.16)

С целью повышения достоверности определяемых эффективных свойств, в расчет принимались выражения, включающие свойства kernового материала (раздел 2.4). Результаты, отражающие изменение эффективных свойств при различном состоянии горного массива (качестве), полученные по математическим выражениям (таблица 3.5), представлены на рисунках 3.3-3.5.

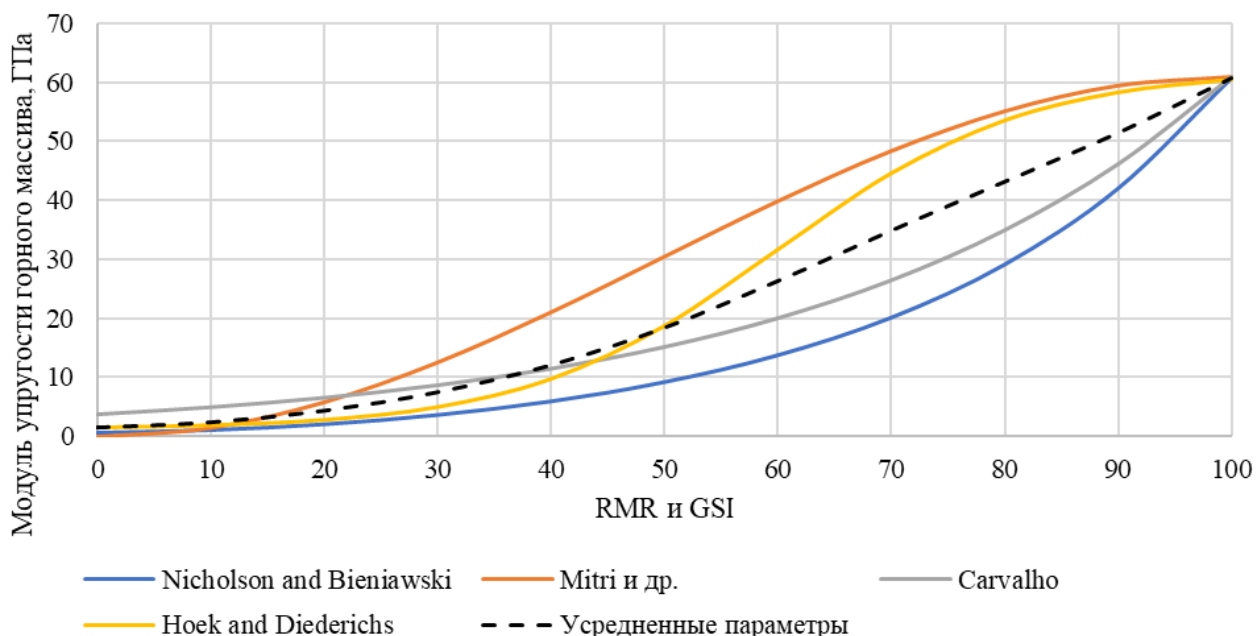


Рисунок 3.3 – Закономерности изменения модуля упругости горного массива при различных параметрах RMR и GSI

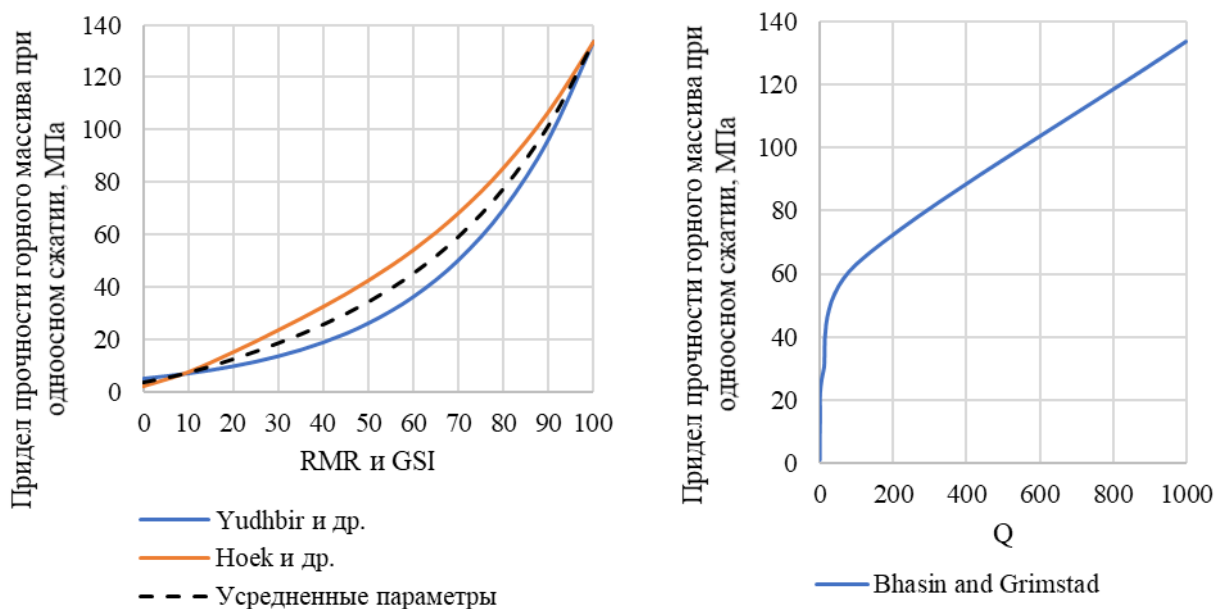


Рисунок 3.4 – Закономерности изменения предела прочности горного массива на одноосное сжатие при различных параметрах RMR , GSI и Q

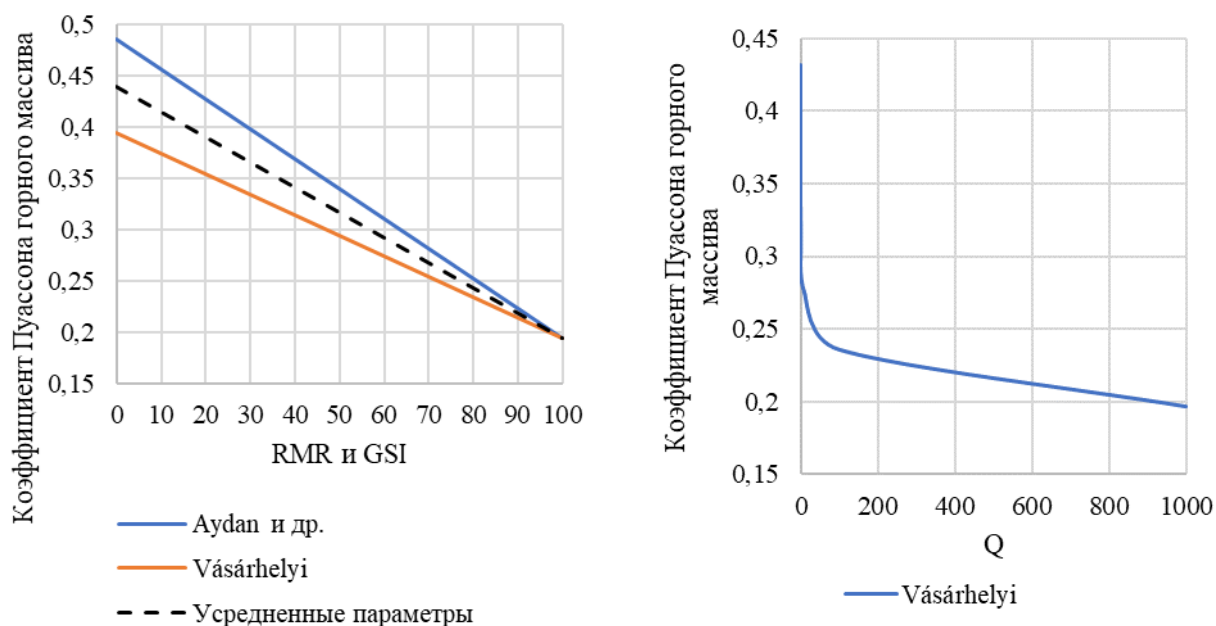


Рисунок 3.5 – Закономерности изменения коэффициента Пуассона горного массива при различных параметрах RMR , GSI и Q

Установлено, что при увеличении параметров RMR и GSI , которые отражают улучшение качества породного массива, модуль упругости горного массива также увеличивается. Аналогичный закон распределение получен для предела прочности горного массива на одноосное сжатие. Коэффициент Пуассона увеличивается при уменьшении параметров качества породного массива. Полученные закономерности подтверждаются результатами, которые отражены в работах зарубежных авторов [69,74,86].

Таким образом, проведенное исследование позволило определить прочностные и деформационные свойства (эффективные свойства) горного массива с учетом его состояния и структурной нарушенности.

3.3 Учет влияния трещиноватости, сопоставимой по размерам с измерительной скважиной

Для учета трещиноватости, сопоставимой по размерам с измерительной скважиной, при определении естественного напряженного состояния горного массива следует использовать многовариантное численное моделирование, где в качестве изменяемого параметра выступает пространственная ориентация трещины. В представленном методе рассматривались три варианта угла наклона трещин $\theta_{тр}=0, 45^\circ, -45^\circ$ (0 – трещина, ортогональна продольной оси измерительной скважины; положительное направление угла наклона трещины соответствует направлению против движения часовой стрелки, отрицательное – по движению часовой стрелке). Для решения поставленной задачи были разработаны пространственные численные модели в программном комплексе Abaqus CAE, которые

предусматривают: формирование естественного напряженного состояния во вмещающем массиве; создание измерительной скважины и кольцевой разгрузочной щели, а также наличие трещины с различной ориентацией относительно продольной оси измерительной скважины. Размеры численной модели: $1,5 \times 1,5 \times 4$ м, что обусловлено необходимостью исключения влияния граничных условий (не менее пяти диаметров измерительной скважины). Геометрические параметры измерительной скважины представлены в разделе 2.1.1, а протяженность обустройства составляет 3 м, что обусловлено необходимостью исключения влияния забоя измерительной скважины на исследуемые параметры. Трещина расположена на расстоянии 1,5 от устья измерительной скважины относительно ее продольной оси. Расчетная схема разработанных моделей представлена на рисунке 3.6. Необходимо отметить, что в качестве исходных данных для численного моделирования принимаются свойства ненарушенной горной породы, которые определяются в результате лабораторных испытаний кернового материала (таблица 3.6).

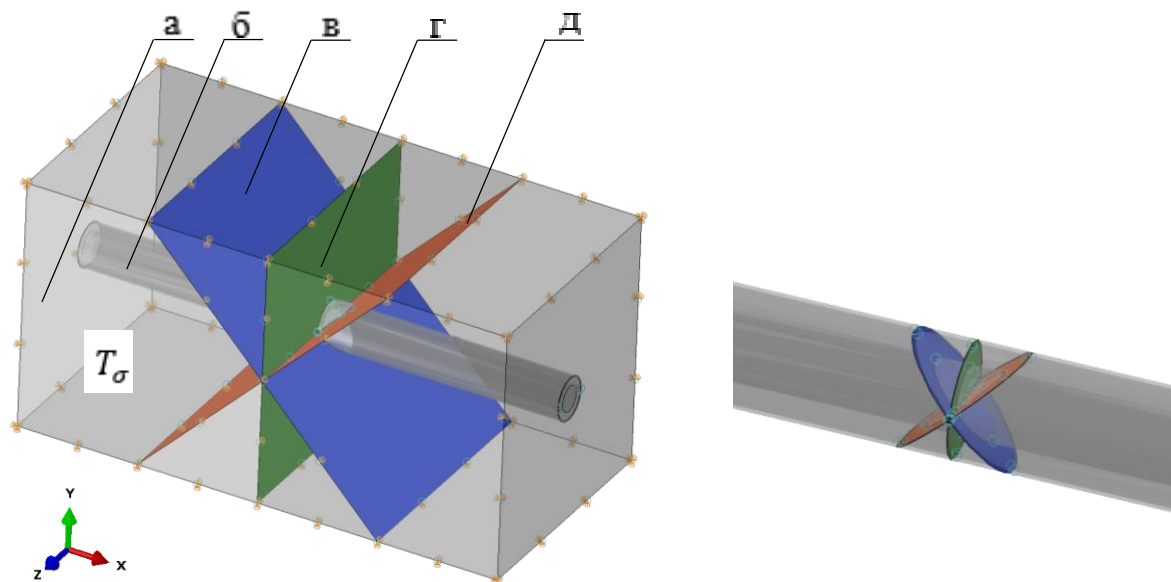


Рисунок 3.6 – Расчетная схема разработанных численных моделей: а – горный массив; б – измерительная скважина; в – трещина (угол наклона 45°); г – трещина (угол наклона 0°); д – трещина (угол наклона -45°)

Таблица 3.6 – Свойства ненарушенной горной породы

Удельный вес, МН/м ³	Модуль упругости ненарушенного горного массива, ГПа	Коэффициент Пуассона
0,0306	60,86	0,22

В качестве исходного напряженного состояния горного массива принимаются прогнозные напряжения для условий рудников КФ АО «Апатит»: $\sigma_1 = 35$ МПа; $\sigma_2 = 19,25$ МПа; $\sigma_3 = 5,8$ МПа [57].

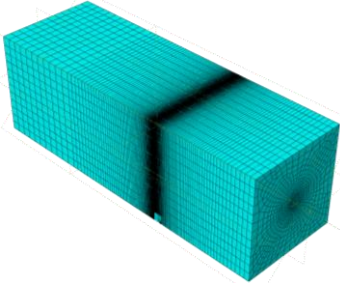
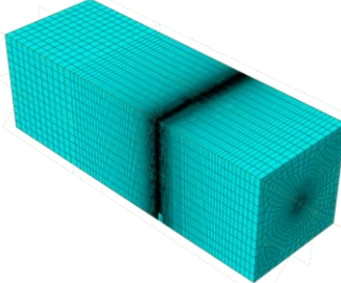
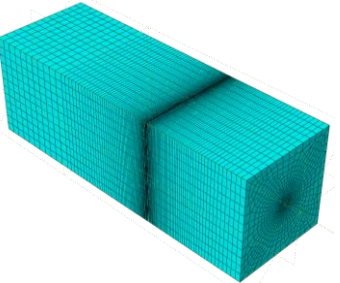
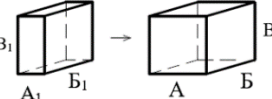
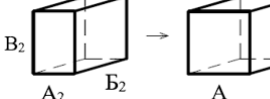
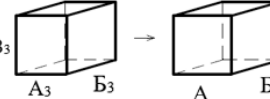
При исследовании влияния угла наклона трещины на изменение радиальных смещений стенок измерительной скважины, было использовано два подхода о представлении трещины: в виде прослойки сплошного материала между контактными блоками и в явной форме контактного взаимодействия между ними.

3.3.1 Представление трещины в виде прослойки сплошного материала между контактными блоками

Для применимости разработанного метода определения естественного напряженного состояния горного массива, при исследовании данного подхода, трещина рассматривалась в виде прослойки, заполненной сплошным материалом, эффективные упругие характеристики которого ниже упругих характеристик исследуемого массива. В противном случае, проведение натурных испытаний не представляется возможным из-за откалывания измерительной скважины в процессе обуривания [13].

Изучение влияния трещины, сопоставимой по размеру с измерительной скважиной, на основании численного моделирования методом конечных элементов на начальном этапе требовало определения размера конечного элемента. Были рассмотрены три варианта размерности конечно-элементной сетки, представленные в таблице 3.7. Трещина ортогональна продольной оси измерительной скважины.

Таблица 3.7 – Размеры конечного элемента

Графическое изображение модели			
Диапазон размеров конечного элемента	Величина элемента №1  $A_1=0,0005$ м $A=0,15$ м $B_1=0,25$ м $B=0,25$ м $V_1=0,25$ м $V=0,25$ м	Величина элемента №2  $A_2=0,001$ м $A=0,15$ м $B_2=0,25$ м $B=0,25$ м $V_2=0,25$ м $V=0,25$ м	Величина элемента №3  $A_3=0,01$ м $A=0,15$ м $B_3=0,25$ м $B=0,25$ м $V_3=0,25$ м $V=0,25$ м

Результаты проведенного исследования представлены на рисунке 3.7.

Уменьшение размера конечного элемента не влияет на изменение относительных радиальных смещений стенок измерительной скважины. Максимальное расхождение между конечным элементом наибольшего размера и конечным элементом наименьшего размера составило 2%. Это определило минимальный размер конечного элемента: $0,1 \times 0,25 \times 0,25$ м.

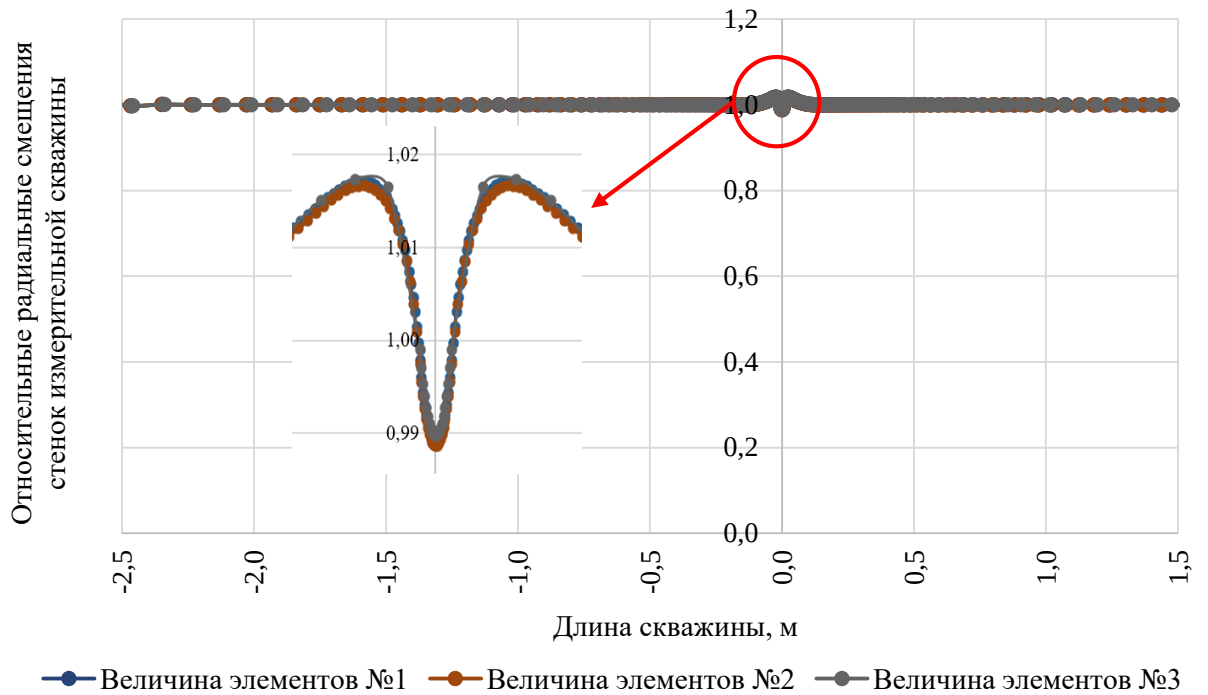


Рисунок 3.7 – Закономерности изменения относительных радиальных смещений стенок измерительной скважины и размеров конечных элементов

Результаты многовариантного численного моделирования представлены на рисунке 3.8.

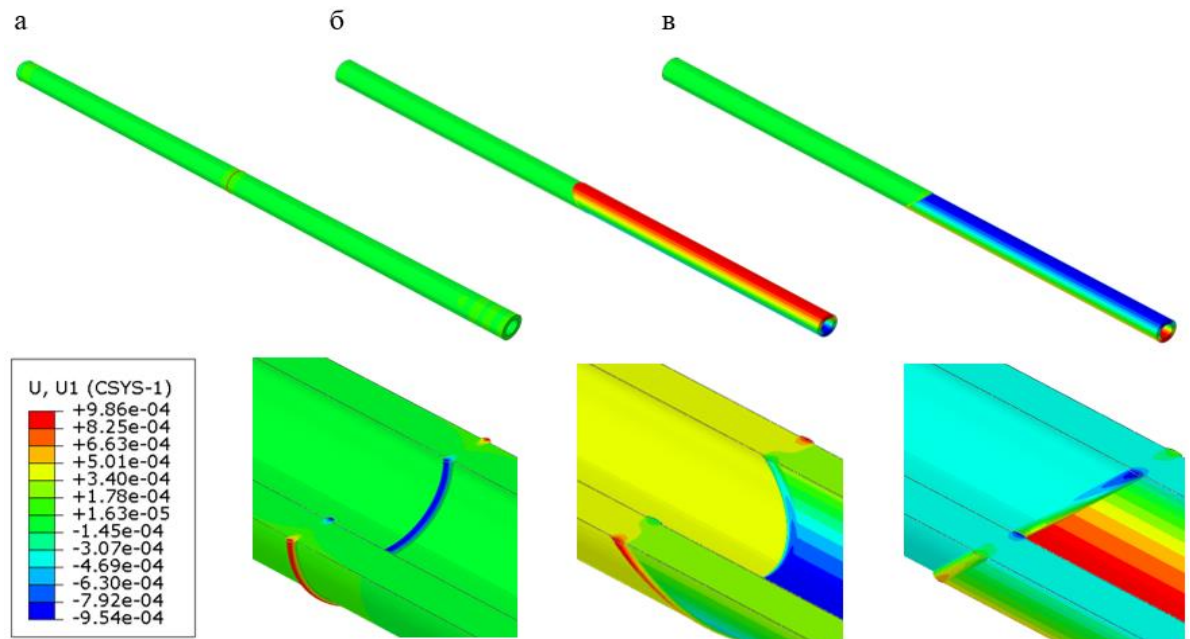


Рисунок 3.8 – Эпюры изменения радиальных смещений стенок измерительной скважины при различных углах наклона трещины: а – угол наклона 0°; б – угол наклона 45°; в – угол наклона -45°

Трещина, представленная в виде прослойки сплошного материала, эффективные упругие характеристики которого ниже упругих характеристик исследуемого массива, разгружается в большей степени в результате кольцевого обрушения. Данное поведение

характерно для всех углов наклона трещина, для которых проводились расчеты. Однако, проведенные натурные испытания продемонстрировали противоположные результаты (рисунки 3.9-3.11), где сплошной материал с меньшими упругими характеристиками разгружается в меньшей степени.

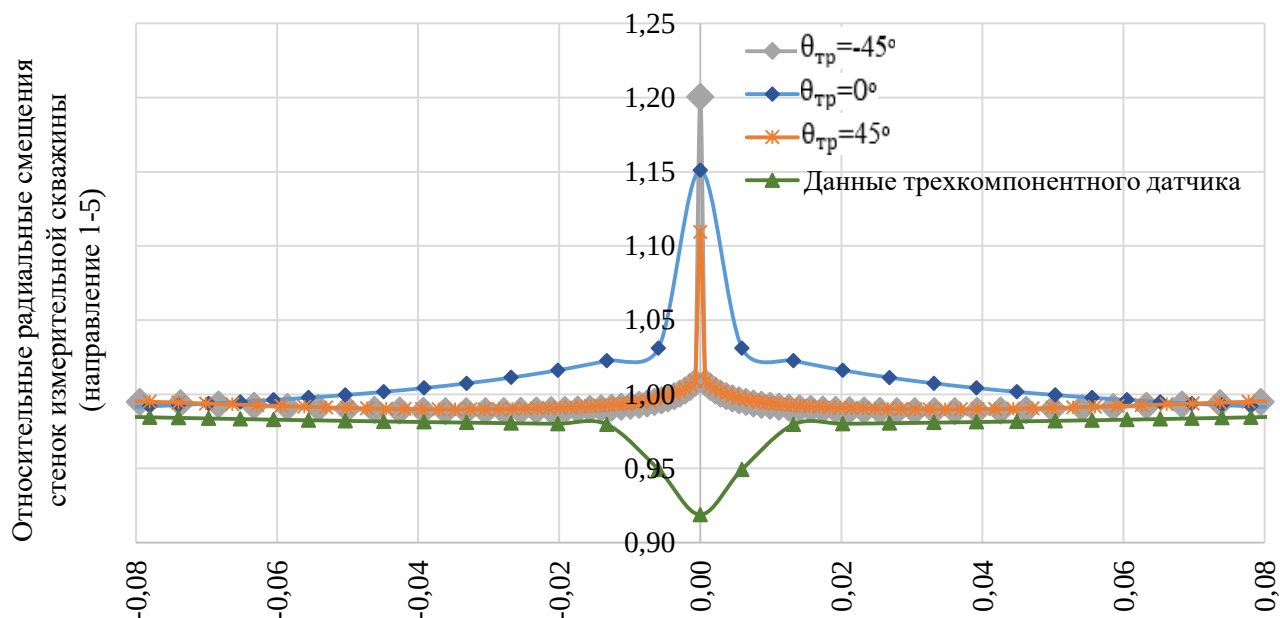


Рисунок 3.9 – Закономерности изменения относительных радиальных смещений стенок измерительной скважины (направление 1-5): $\theta_{тр}$ – угол наклона трещины

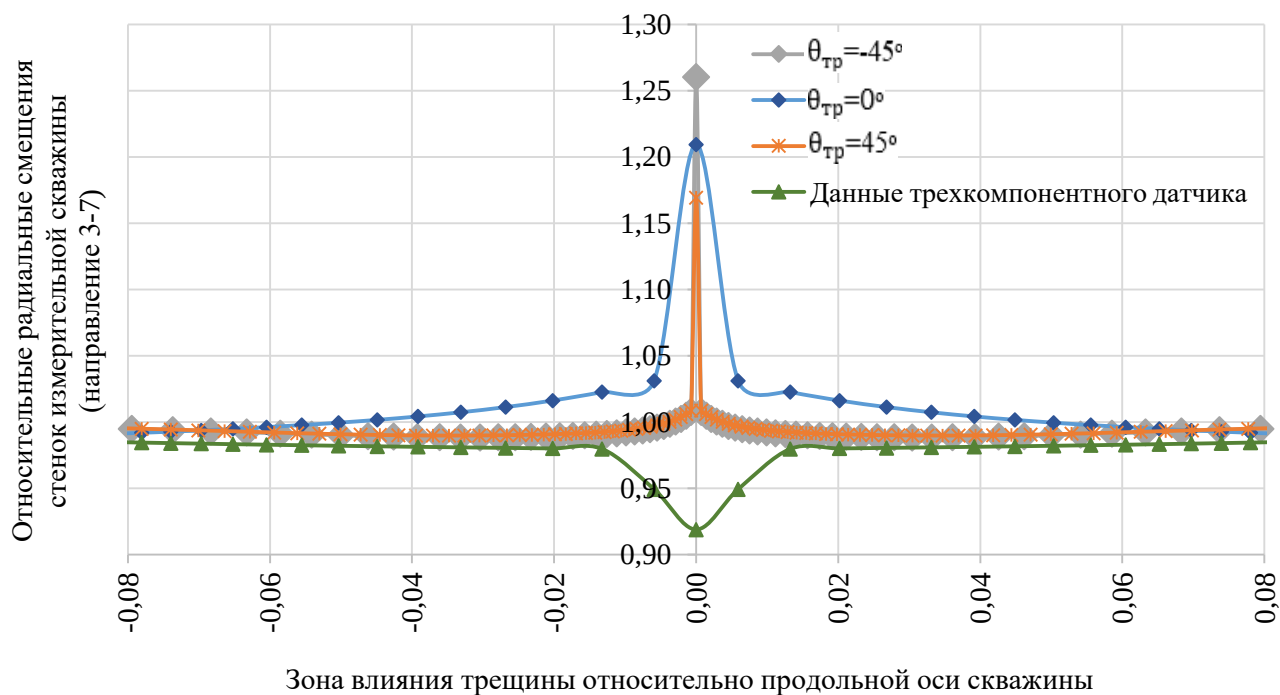


Рисунок 3.10 – Закономерности изменения относительных радиальных смещений стенок измерительной скважины (направление 3-7): $\theta_{тр}$ – угол наклона трещины

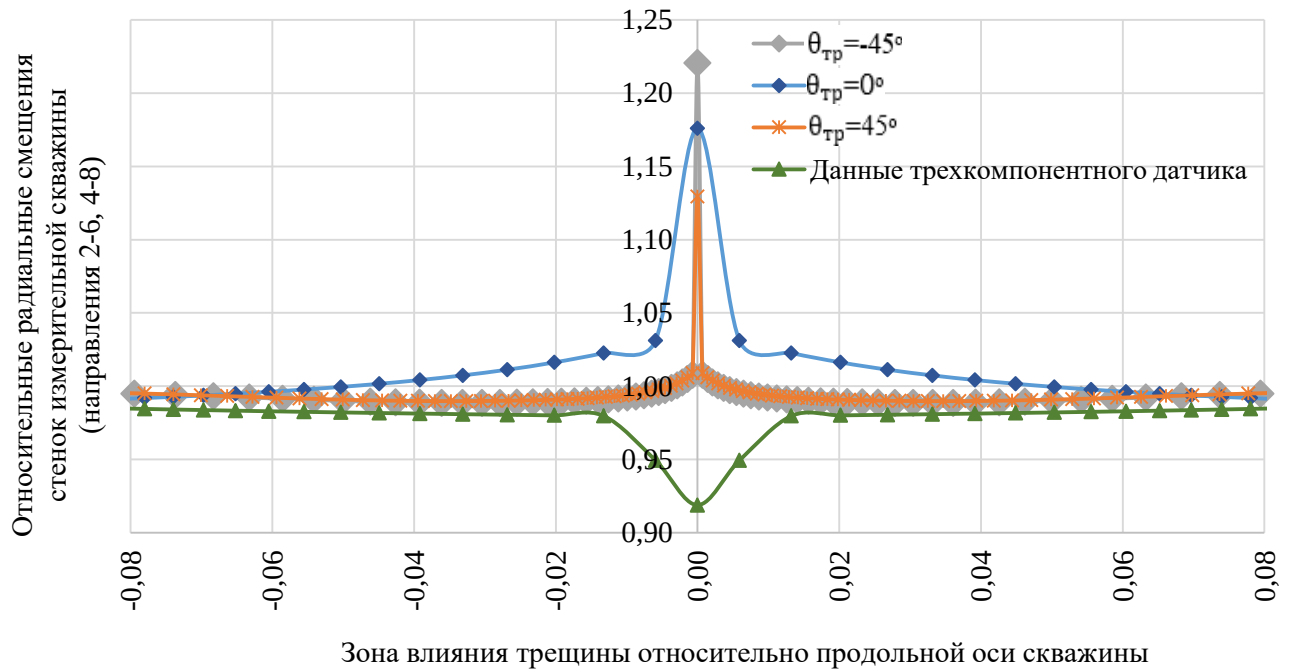


Рисунок 3.11 – Закономерности изменения относительных радиальных смещений стенок измерительной скважины (направления 2-6,4-8): $\theta_{тр}$ – угол наклона трещины

Наибольшие относительные радиальные смещения стенок измерительной скважины наблюдаются по измерительному направлению 3-7, наименьшие – по измерительному направлению 1-5. Это характеризует преобладание горизонтальных компонент естественного напряженного состояния над вертикальными. По всем измерительным направлениям наибольшие относительные радиальные смещения стенок измерительной скважины наблюдаются при угле наклона трещины -45° , что является самой неблагоприятной ситуацией для выполнения натурных испытаний.

Таким образом, изначальное предположение о представлении трещины в виде прослойки сплошного материала между контактными блоками при разработке численной модели не соответствует действительности. При проведении натурных испытаний в процессе кольцевого обуривания измерительной скважины трещина, заполненная сплошным материалом, упругие характеристики которой меньше аналогичных параметров горного массива, разгружается в большей степени. Результаты многовариантного численного моделирования не отражают описанного поведения трещины.

3.3.2 Представление трещины в явной форме контактного взаимодействия между структурными блоками

Ключевым аспектом при моделировании трещины в явной форме контактного взаимодействия между структурными блоками является достоверное определение его прочностных и деформационных свойств, а именно коэффициентом трения (k_{fr}); нормальной

жесткостью контакта (k_{nn}); касательной жесткостью контакта в двух ортогональных направлениях (k_{ss} и k_{tt}); нормальной прочностью контакта (m_{nn}); сдвиговой прочностью контакта в двух ортогональных направлениях (m_{ss} и m_{tt}).

Методика определения прочностных и деформационных свойств контактного взаимодействия заключается в следующем:

1. Проведение лабораторных испытаний кернового материала при срезе со сжатием, результатом которых являются величины нормального сжимающего напряжения σ_θ и предела прочности при срезе τ_θ ;
2. Численное моделирование, отражающее проведение лабораторных испытаний, с целью определения прочностных и деформационных свойств контактного взаимодействия в ненарушенной горной породе;
3. Определение минимально необходимых прочностных и деформационных свойств контактного взаимодействия, отражающих отсутствие откалывания керна при обуривании, на основании численного моделирования, учитывающего формирование измерительной скважины и кольцевой разгрузочной щели, гравитационную составляющую нагрузки и вращательное воздействие бурового оборудования.

Реализация разработанной методики осуществляется в условиях скальных горных массивов месторождений Хибин. Буровое оборудование имеет вращательный момент $M_{вр}$ равный 120 Н·м.

Лабораторные испытания кернового материала при срезе со сжатием были выполнены в соответствии с методикой, указанной в ГОСТ [20]. Рудо-породные образцы изготавливались с учетом требований стандартов на методы испытаний, их размеры составляли 40 мм (в диаметре), 45 мм (в высоту), площадь плоскости среза 1800 мм². Для каждого угла наклона было подготовлено девять образцов мм² (рисунок 3.12).



Рисунок 3.12 – Образцы кернового материала для проведения испытаний при срезе со сжатием

В качестве лабораторного оборудования применялась сервогидравлическая испытательная система MTS 816 (MTS, США) со сменными разъемными матрицами для установки образцов под углами наклона $\theta_{обр} = 25^\circ, 35^\circ, 45^\circ$ (рисунок 3.13).



Рисунок 3.13 – Разъемные матрицы для установки образцов

Нормальное сжимающее напряжения σ_θ вычисляется по формуле (3.7):

$$\sigma_\theta = \frac{10 \cdot P_{раз}}{S} \cdot \sin \theta_{обр} \quad (3.17)$$

Предел прочности при срезе τ_θ вычисляется по формуле (3.8):

$$\sigma_\theta = \frac{10 \cdot P_{раз}}{S} \cdot \cos \theta_{обр} \quad (3.18)$$

Результаты проведенных лабораторных испытаний представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Результаты лабораторных испытаний кернового материала при срезе со сжатием

Угол наклона разъемной матрицы, град	Разрушающая сила, кН	Нормальное сжимающее напряжение, МПа	Предел прочности породы при срезе, МПа	Фото образцов после лабораторных испытаний
25	85,48	20,07	43,04	
35	172,95	55,12	78,71	

Продолжение таблицы 3.8

Угол наклона разъемной матрицы, град	Разрушающая сила, кН	Нормальное сжимающее напряжение, МПа	Предел прочности породы при срезе, МПа	Фото образцов после лабораторных испытаний
45	363,17	142,67	142,67	

Определение прочностных и деформационных свойств контактного взаимодействия ненарушенной горной породы выполнялось на основе **численного моделирования**. Разработанные модели (рисунок 3.14) представляют собой рудо-породный образец цилиндрической формы, состоящий из двух отдельных частей, соединенных между собой контактным взаимодействием. Размеры модели соответствуют размерам образцов, использованных в лабораторных испытаниях. Исходные свойства для численного моделирования указаны в таблице 3.6.

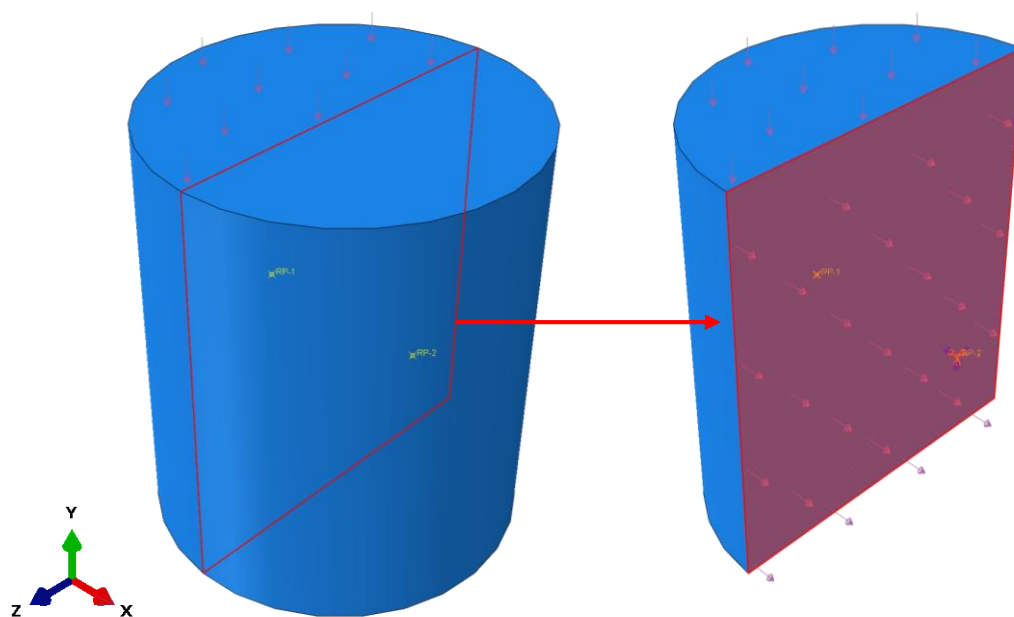


Рисунок 3.14 – Разработанная численная модель для определение прочностных и деформационных свойств контактного взаимодействия ненарушенной горной породы

В горизонтальном направлении (относительно оси абсцисс) формируется нагружение, соответствующие нормальному сжимающему напряжению, определенному по результатам лабораторных испытаний. В вертикальном направлении (относительно оси ординат) формируется нагружение, кратно превышающее предел прочности ненарушенной горной породы в срезе. Граничные условия в численной модели отражают условия закрепления рудо-породного образца при проведении лабораторных испытаний, т.е. части, к которой

прикладывается нагрузки, запрещается только вращение (перемещения по всем направлениям разрешены), у второй части запреты, как на перемещения, так и на вращения по всем направлениям, отсутствуют. Все граничные условия приложены к референсным точкам, которые, в свою очередь, связаны с геометрией разработанной модели.

В результате численного моделирования (рисунок 3.15) определяется сила реакции опоры в референсной точке, связанной с частью модели, в которой запрещены все перемещения.

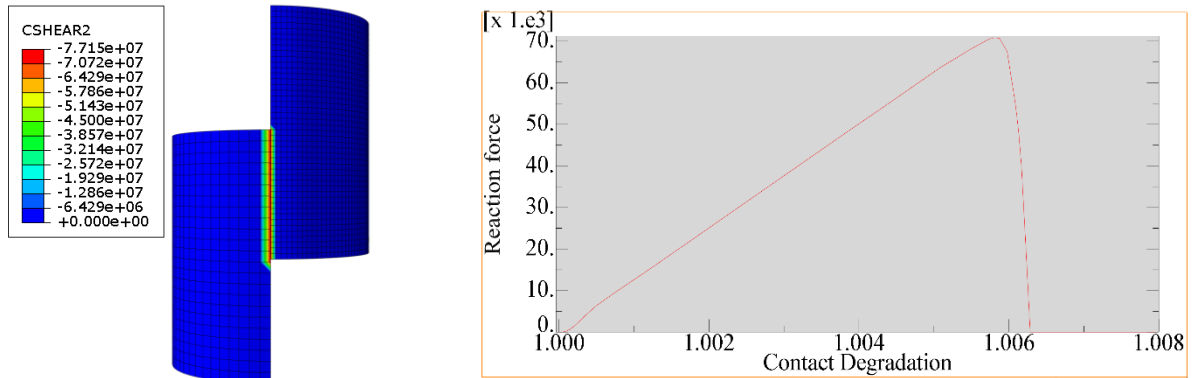


Рисунок 3.15 – Результаты численного моделирования контактного взаимодействия в рудо-породном образце

Зная площадь контакта между частями модели, решается обратная задача и определяется предел прочности при срезе для конкретных прочностных и деформационных свойств контактного взаимодействия. Расчеты продолжаются до момента, когда набор прочностных и деформационных свойств контактного взаимодействия не обеспечит требуемый предел прочности породы при срезе для трех углов наклона разъемной матрицы (рисунок 3.16).

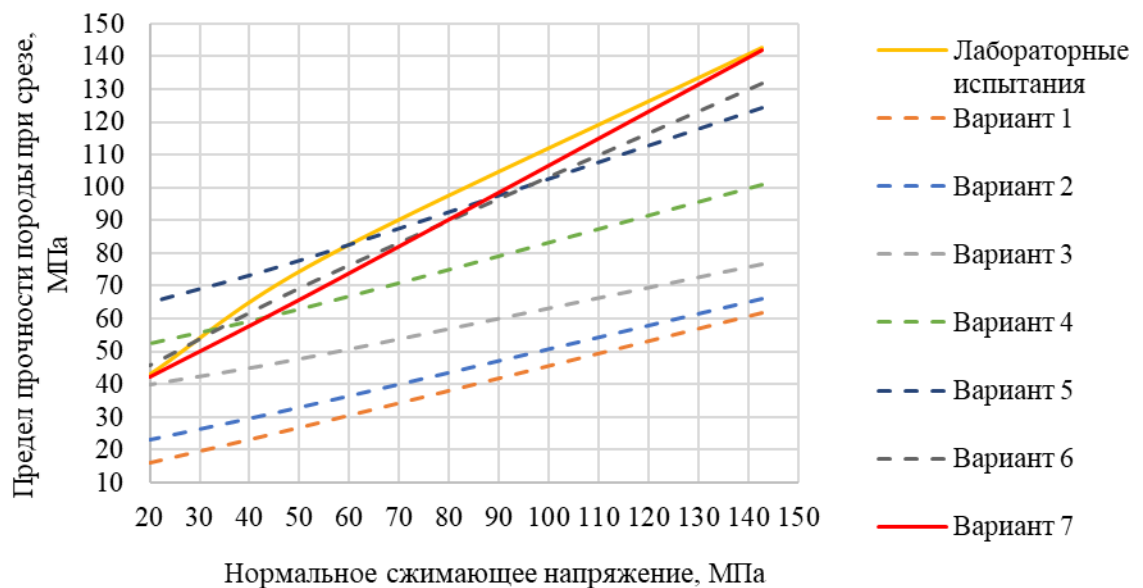


Рисунок 3.16 – Графическое представление подбора прочностных и деформационных свойств контактного взаимодействия ненарушенной горной породы

После проведения лабораторных испытаний и численного моделирования были определены прочностные и деформационные свойства контактного взаимодействия ненарушенной горной породы (выделены жирным) (таблица 3.9). Также в данной таблице представлены и иные варианты подбора.

Таблица 3.9 – Варианты прочностных и деформационных свойств контактного взаимодействия ненарушенной горной породы, участвующие в подборе

№ варианта	k_{fr}	$k_{nn}, \frac{\text{МПа}}{\text{мм}}$	$k_{ss} = k_{tt}, \frac{\text{МПа}}{\text{мм}}$	$m_{nn}, \text{МПа}$	$m_{ss} = m_{tt}, \text{МПа}$
1	0,3	1	20	1857	10
2	0,3	6,11	20	1857	18,57
3	0,3	10	20	1857	40
4	0,3	91,1	2000	1857	45
5	0,75	6,11	20	1857	40
6	0,85	6,11	20	1857	40
7	0,95	9,5	9,35	1857	38

В результате подбора прочностных и деформационных свойств контактного взаимодействия ненарушенной горной породы было установлено следующее:

1. Увеличение коэффициента трения между поверхностями контактного взаимодействия в большей степени способствует увеличению предела прочности породы при срезе;
2. Увеличение нормальной жесткости контакта в меньшей степени способствует увеличению предела прочности породы при срезе;
3. Касательная жесткость контакта в двух ортогональных направлениях, нормальная прочность контакта и сдвиговая прочность контакта в двух ортогональных направлениях не оказывают влияния на изменение предела прочности породы при срезе.

Заключительным этапом разработанной методики является **определение минимально необходимых прочностных и деформационных свойств контактного взаимодействия**, отражающих отсутствие откалывания керна при обурировании. Для этого численная модель, подробно описанная в разделе 3.3, дорабатывается путем добавления гравитационной составляющей нагрузки и вращательного воздействия бурового оборудования. В качестве прочностных и деформационных свойств контактного взаимодействия используются свойства, определенные на предыдущих этапах.

Исследование состояния контактного взаимодействия при моделировании обурирования измерительной скважины выполняется на основании касательных напряжений и смещений сдвига по контакту. Результаты численного моделирования представлены на рисунке 3.17.

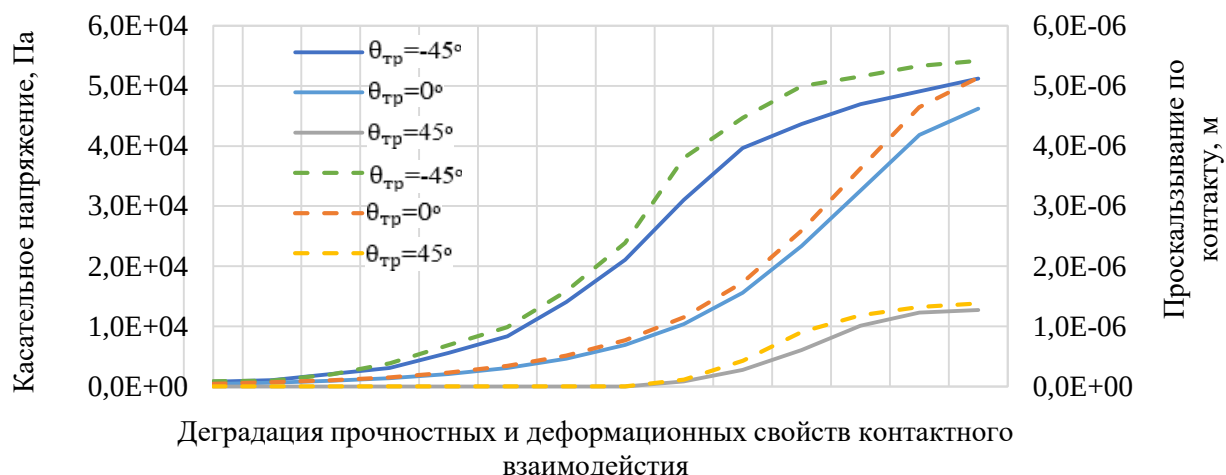


Рисунок 3.17 – Закономерности изменения касательных напряжений и величины проскальзывания по контакту в ненарушенной горной породе: $\theta_{тр}$ – угол наклона трещины

Касательные напряжения (сплошная линия) и смещения сдвига по контакту (штриховая линия) для рассматриваемых вариантов пространственной ориентации трещины увеличиваются в процессе обуривания измерительной скважины, не достигая максимального значения. Это указывает на необходимость снижения прочностных и деформационных свойств контактного взаимодействия, определенных в результате лабораторных испытаний для принятых горно-геологических условий.

Изучение состояния контактного взаимодействия продемонстрировало, что его разрушение происходит вследствие сдвига рудо-породного цилиндра в результате вращательного воздействия бурового оборудования, что подтверждается данными натурных испытаний. Определяющим фактором является предельное значение касательного напряжения по контакту, результаты исследования которого представлены на рисунках 3.18-3.20.

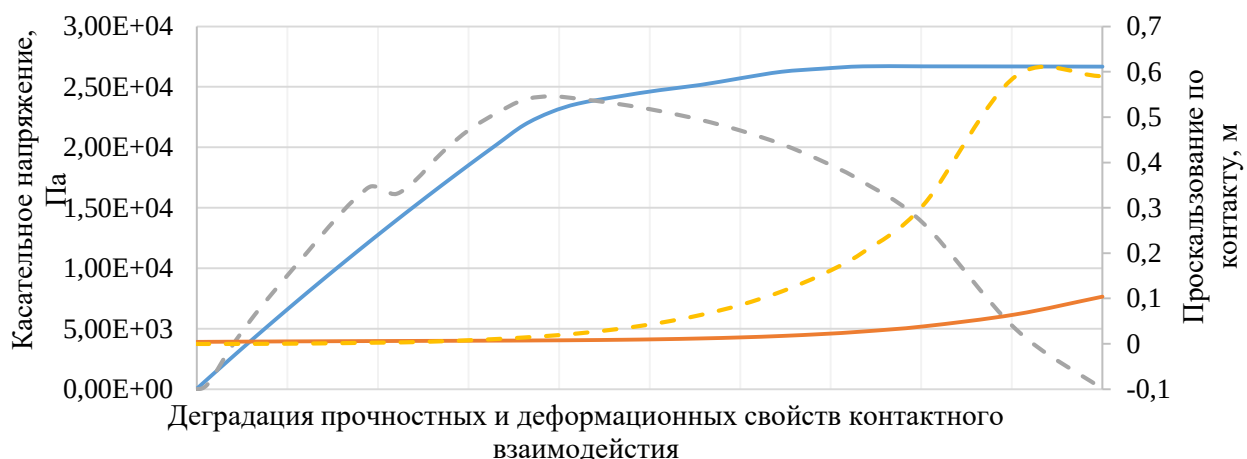


Рисунок 3.18 – Закономерности изменения касательных напряжений и величины проскальзывания по контакту (угол наклона трещины 0), учитывающий предельное значение напряжения сдвига

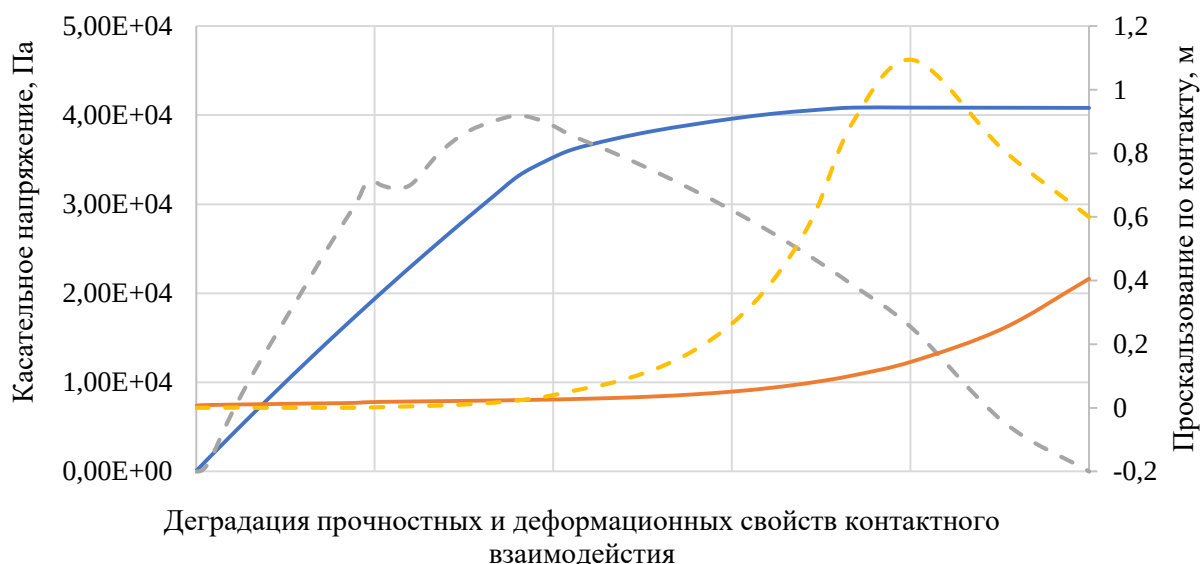


Рисунок 3.19 – Закономерности изменения касательных напряжений и величины проскальзывания по контакту (угол наклона трещины -45°), учитывающий предельное значение напряжения сдвига

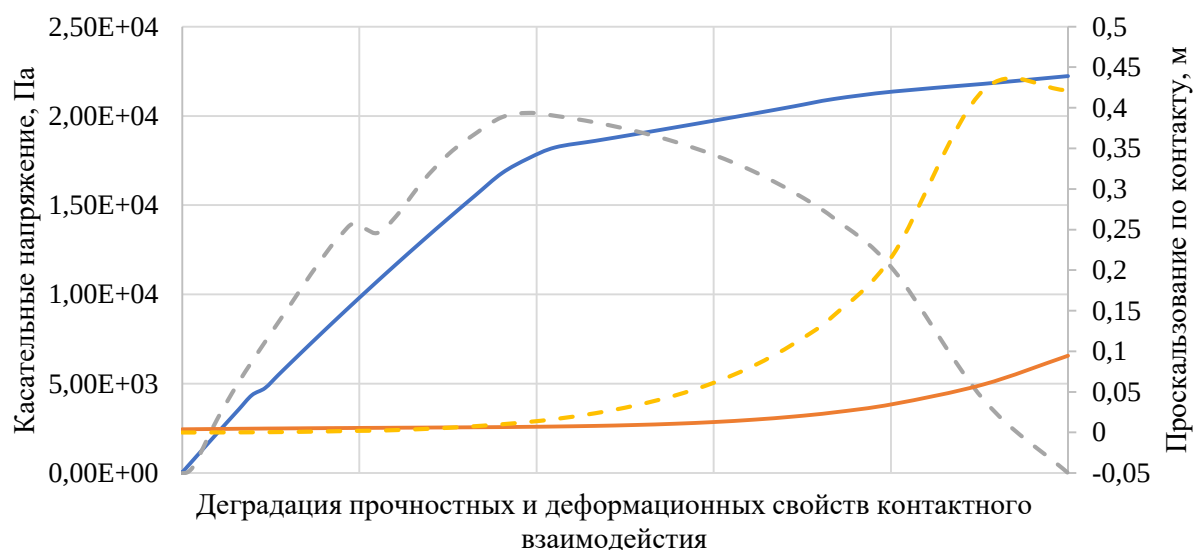


Рисунок 3.20 – Закономерности изменения касательных напряжений и величины проскальзывания по контакту (угол наклона трещины 45°), учитывающий предельное значение напряжения сдвига

Как можно заметить, варианты, где отсутствует ограничение по максимальному касательному напряжению (сплошная линия), демонстрируют совместный характер поведения контактного взаимодействия, в то время как с наличием ограничения (пунктирная линия) происходит разрушение по контакту. Наибольшие значения касательного напряжения и проскальзывания по контакту получено при угле наклона трещины -45° , это свидетельствует о том, что данная ориентация трещины является самой неблагоприятной для выполнения натурных испытаний.

Обобщение минимально необходимых прочностных и деформационных свойств контактного взаимодействия, отражающих отсутствие откалывания керна в результате вращательного воздействия принятого бурового оборудования, представлено в таблице 3.10. При иных параметрах бурового оборудования, определение минимально необходимых свойств контактного взаимодействия следует выполнять заново по описанной методике.

Таблица 3.10 – Прочностные и деформационные свойства контактного взаимодействия при различной ориентации трещины

Угол наклона трещины – -45°					
k_{fr}	$k_{nn}, \frac{\text{МПа}}{\text{мм}}$	$k_{ss} = k_{tt}, \frac{\text{МПа}}{\text{мм}}$	$m_{nn}, \text{МПа}$	$m_{ss} = m_{tt}, \text{МПа}$	$S_{st}^*, \text{МПа}$
0,95	9,5	9,35	13,8	0,27	-
0,95	9,5	9,35	27,3	0,54	0,54
Угол наклона трещины – 0°					
0,95	9,5	9,35	5,3	0,11	-
0,95	9,5	9,35	13,8	0,27	0,27
Угол наклона трещины – 45°					
0,95	9,5	9,35	3,1	0,06	-
0,95	9,5	9,35	5,3	0,11	0,11

* - предельная величина напряжения сдвига, предшествующая разупрочнению контакта.

Анализируя полученные результаты, установлено, что при изменении угла наклона трещины от -45° до 45° , прочностные свойства контактного взаимодействия монотонно снижаются по закону, близкому к линейному (рисунки 3.21, 3.22).

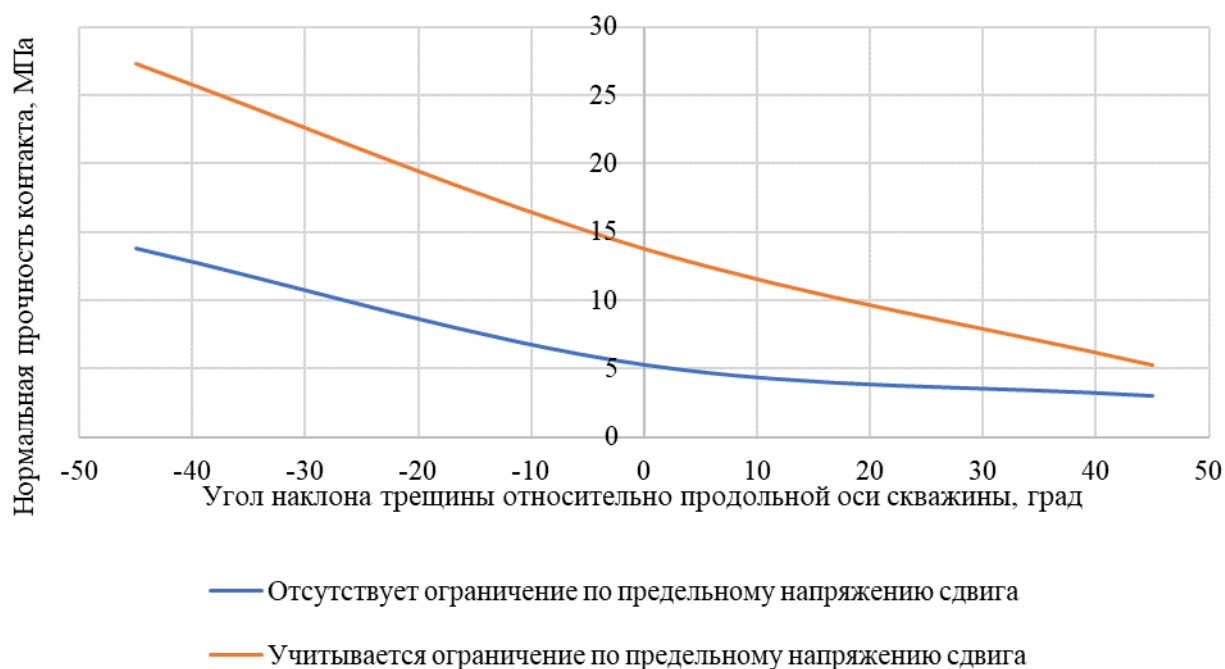


Рисунок 3.21 – Закономерности изменения нормальной прочности контактного взаимодействия

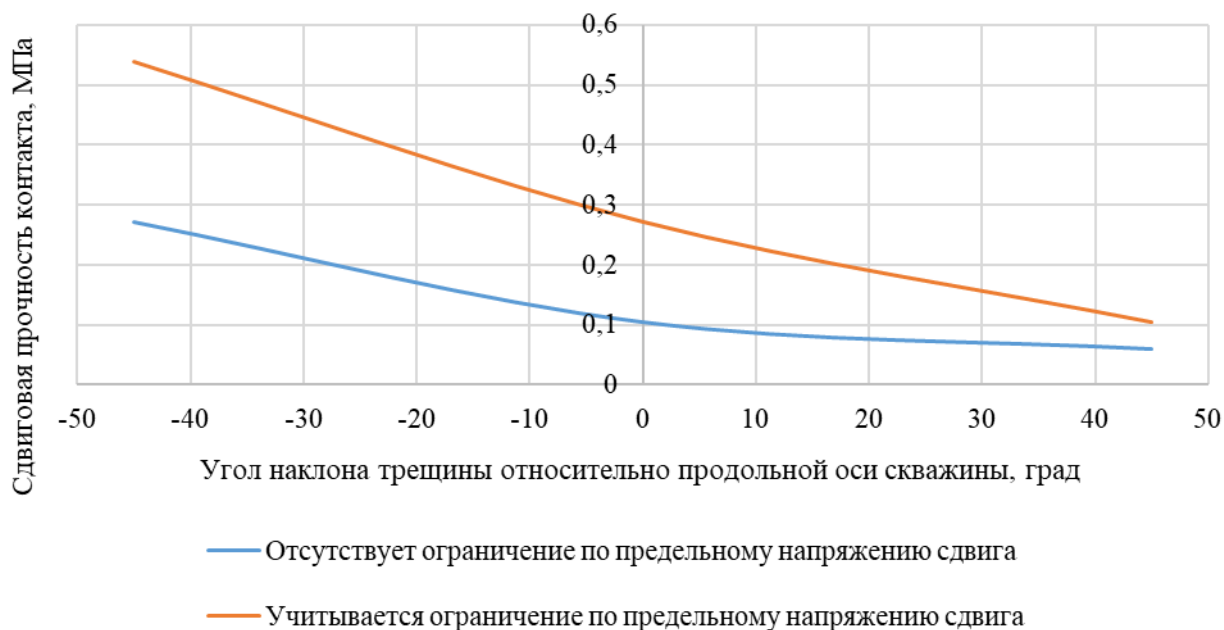


Рисунок 3.22 – Закономерности изменения сдвиговой прочности контактного взаимодействия

3.4 Выводы по Главе 3

Исследования, проводимые в рамках третьей главы, посвящены учету трещиноватости горного массива при определении его естественного напряженного состояния. Во внимание принимались два масштабных уровня трещиноватости горного массива: трещиноватость, размер которой кратно меньше измерительной скважины (микроструктурная трещиноватость) и трещиноватость, сопоставимая по размерам с измерительной скважиной. В результате исследования было определено следующее:

1. Микроструктурную трещиноватость следует учитывать посредством использования коэффициентов структурной нарушенности на прочностные и деформационные свойства горного массива.
2. Определены закономерности изменения прочностных и деформационных свойств горного массива (эффективные свойства) с учетом его состояния и структурной нарушенности.
3. Представление трещиноватости, сопоставимой по размерам с измерительной скважиной в виде прослойки сплошного материала между контактными блоками, модели не соответствует действительности. При разгрузке горного массива в процессе кольцевого обуривания при проведении натурных испытаний трещина, заполненная сплошным материалом, упругие характеристики которой меньше аналогичных параметров горного массива, разгружается в меньшей степени. Результаты многовариантного численного моделирования не отражают описанного поведения трещины.

4. Трещиноватость, сопоставимая по размерам с измерительной скважиной, должна учитываться в явной форме контактного взаимодействия между структурными блоками, описанного прочностными и деформационными свойствами по разработанной методике.

5. Наибольшие прочностные и деформационные свойства контактного взаимодействия соответствуют углу наклона трещины -45° , следовательно, данная ориентация трещины является самой неблагоприятной для выполнения натурных испытаний.

6. Установлено, что разрушение контактного взаимодействия происходит вследствие сдвига рудо-породного цилиндра в результате вращательного воздействия бурового оборудования, что подтверждается данными натурных испытаний, а определяющим фактором является предельное значение касательного напряжения по контакту.

7. Определены прочностные и деформационные свойства контактного взаимодействия для рассмотренных пространственных ориентаций трещин и принятого бурового оборудования (вращательный момент $M_{вр}$ равный 120 Н·м).

ГЛАВА 4 УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРНЫХ ПОРОД НА ИЗМЕНЕНИЕ ДИАМЕТРА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СКВАЖИНЫ ПРИ КОЛЬЦЕВОМ ОБУРИВАНИИ

4.1 Особенности решения сопряженной термомеханической задачи

Изменение температурного режима работы горного массива характерно для различных технологических процессов: проходческие и очистные работы, буровые работы, движение подземного транспорта, вентиляция и т.д. Горные породы характеризуются выраженной температурной зависимостью физико-механических характеристик и, как следствие, особенностями деформационно-прочностного поведения при термомеханическом воздействии [99].

При температурном воздействии геоматериалы проявляют выраженную деградацию механических характеристик, включая снижение модуля Юнга и прочностных параметров, что обусловлено формированием термически индуцированной микротрещиноватости. Термофизические свойства при этом демонстрируют неоднозначную динамику: наблюдается увеличение температурного коэффициента линейного расширения и удельной теплоемкости при одновременном уменьшении теплопроводности. Учет указанных температурно-зависимых эффектов является критически важным при реализации численных подходов [88].

Термомеханическое моделирование представляет собой важнейший инструмент для анализа сложных процессов, где тепловые и механические явления взаимосвязаны. Теоретической основой таких расчетов служит система связанных дифференциальных уравнений, включающая модифицированное уравнение теплопроводности с учетом механического тепловыделения, уравнения движения сплошной среды и термомеханические соотношения, описывающие взаимное влияние температурных и деформационных полей. Особую сложность представляет учет нелинейных эффектов, таких как температурная зависимость свойств материалов, фазовые превращения и контактные взаимодействия, что требует разработки специальных математических моделей и численных алгоритмов [99,106].

Для решения термомеханических задач применяются различные численные методы, каждый из которых обладает специфическими преимуществами. Метод конечных элементов доминирует в задачах со сложной геометрией, предлагая широкие возможности для адаптации сеток и уточнения решения в зонах высоких градиентов. Метод конечных разностей демонстрирует эффективность при моделировании процессов с интенсивной конвекцией и фазовыми переходами. Особое внимание в последние годы уделяется разработке гибридных методов, сочетающих преимущества различных подходов, а также внедрению изogeометрического анализа, позволяющего точнее описывать сложные геометрии. Алгоритмическая реализация может варьироваться от полностью связанных подходов,

обеспечивающих высокую точность, до последовательных схем, более экономичных с вычислительной точки зрения [82].

Ключевым аспектом достоверного моделирования является учет специфических физических эффектов. Температурно-зависимые свойства материалов требуют применения сложных материальных моделей, часто основанных на экспериментальных данных. Особую сложность представляют задачи с фазовыми превращениями, где необходимо учитывать латентное тепло и изменение механических характеристик. Контактные термомеханические задачи требуют специальных алгоритмов для описания теплопередачи через границы раздела, включая учет контактного термического сопротивления и его зависимости от механического давления. Эти особенности существенно усложняют вычислительные процедуры и требуют разработки специализированных численных алгоритмов. Верификация численных моделей представляют собой обязательный этап исследований. Он включает сравнение с аналитическими решениями канонических задач, а также сопоставление с экспериментальными данными. Особое внимание уделяется анализу сходимости решений по пространственной дискретизации и временному шагу, а также исследованию чувствительности к параметрам численных схем и материальных моделей. Современные подходы к верификации часто включают методы анализа неопределенности и количественной оценки погрешностей, что особенно важно для ответственных инженерных расчетов [106].

Перспективы развития численного моделирования термомеханических процессов связаны с несколькими ключевыми направлениями:

1. Разработка более точных многомасштабных моделей, позволяющих учитывать микроструктурные эффекты.
2. Активное внедрение методов машинного обучения для ускорения расчетов и параметрической оптимизации.
3. Использование возможностей суперкомпьютеров для решения сверхсложных задач в реальном масштабе времени.

Особый интерес представляет интеграция термомеханических моделей в цифровые двойники сложных технических систем, что открывает новые возможности для прогнозного анализа и оптимизации технологических процессов в различных отраслях промышленности.

В диссертационной работе численное моделирование термомеханических процессов реализовано в программном комплексе Abaqus CAE и базируется на последовательном подходе, объединяющем анализ теплопередачи и механического поведения. На первом этапе осуществляется формулировка полностью связанной задачи (fully coupled thermal-stress analysis), где система уравнений включает: уравнение теплопроводности с учетом механической диссипации, уравнения равновесия с температурными напряжениями, а также определяющие

соотношения, связывающие тепловые и механические поля. Особое внимание уделяется корректному заданию температурно-зависимых свойств материалов.

4.2 Описание методики по учету влияния изменения температуры

Разработанный метод определения естественного напряженного состояния горного массива сопровождается выполнением большого количества буровых работ. Наиболее значимым процессом при проведении натурных испытаний является обустройство измерительной скважины кольцевой разгрузочной щелью. В этот момент площадь соприкосновения полый буровой коронки с рудо-породным цилиндром, где установлен трехкомпонентный датчик смещений, максимальна, что способствует увеличению температуры горного массива за счет повышенного трения. При выполнении натурных испытаний было установлено, что максимальная температура в момент обустройства достигает 60°C . С целью учета данного фактора и повышения достоверности определения естественного напряженного состояния горного массива необходимо учитывать влияние термомеханических параметров на изменение диаметра измерительной скважины [43]. В качестве термомеханических параметров приняты: теплопроводность горной породы (λ_T); удельная теплоемкость горной породы (C); температурный коэффициент линейного расширения (α_T); температура, возникающая в момент обустройства измерительной скважины ($T_{об}$).

Методика определения влияния температуры горных пород на изменение диаметра измерительной скважины заключается в следующем:

1. Проведение лабораторных испытаний кернового материала, результатом которых является температурный коэффициент линейного расширения горной породы (α_T);
2. Численное моделирование, целью которого является определение изменения диаметра измерительной скважины при различных термомеханических параметрах.

4.3 Лабораторные испытания кернового материала

Лабораторные испытания кернового материала были проведены с целью определения температурного коэффициента линейного расширения (α_T). Рудо-породные образцы изготавливались с учетом требований стандартов на методы испытаний, их размеры составляли 45-48 мм (в диаметре), 92-96 мм (в высоту). В качестве лабораторного оборудования использовались: тепловой шкаф, необходимый для нагрева рудо-породного образца до заданных температур и поддержания неизменного температурного режима; термометр, необходимый для фиксации температуры на начальном этапе испытаний; продольные деформометры, необходимые для определения изменения размеров образца (высоты) при нагреве.

Порядок проведения лабораторных испытаний:

1. Подготовка рудо-породных образцов к испытаниям (рисунок 4.1).

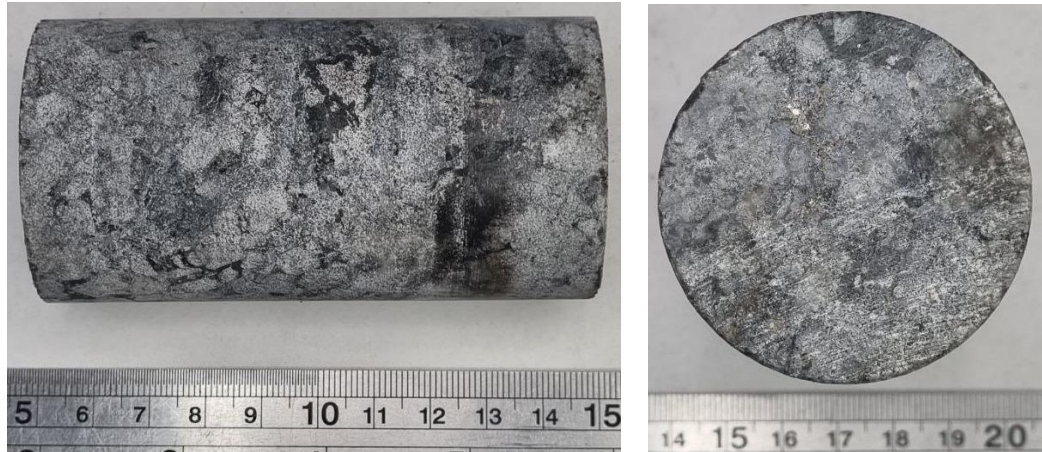


Рисунок 4.1 – Подготовка рудо-породных образцов

2. Установка продольных деформометров.
3. Фиксация температуры на начальном этапе испытаний, которая составила 24°C (комнатная температура).
4. Установка рудо-породных образцов в тепловой шкаф, который был предварительно разогрет до комнатной температуры.
5. Нагрев рудо-породных образцов до заданной температуры. На данном этапе было проведено стадийное испытание, суть которого заключается в поочередном нагреве и охлаждении рудо-породного образца. Всего было исследовано три стадии:
 - первая стадия – нагрев до 30°C и охлаждение до комнатной температуры;
 - вторая стадия – нагрев до 45°C и охлаждение до комнатной температуры;
 - третья стадия – нагрев до 60°C и охлаждение до комнатной температуры.

Необходимо отметить, что после нагрева рудо-породного образца до заданной температуры, установленный температурный режим поддерживался до тех пор, пока продольные деформации не прекращали изменяться (разница менее 5%).

6. Извлечение рудо-породного образца из теплового шкафа и его подготовка к следующему испытанию (всего было испытано шесть рудо-породных образцов).

Результаты проведенных лабораторных испытаний представлены в виде графика на рисунке 4.2.

Продольные деформации рудо-породного образца увеличиваются при увеличении нагрева, что свидетельствует о его расширении. Характер приращения продольных деформаций схож во всех испытаниях, подтверждая корректность их проведения. На основании полученных закономерностей были определены температурные коэффициенты линейного

расширения: $\alpha_{T1} = 9 \cdot 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$; $\alpha_{T2} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$; $\alpha_{T3} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$;
 $\alpha_{T4} = 1,14 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$; $\alpha_{T5} = 1,51 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$; $\alpha_{T6} = 1,82 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

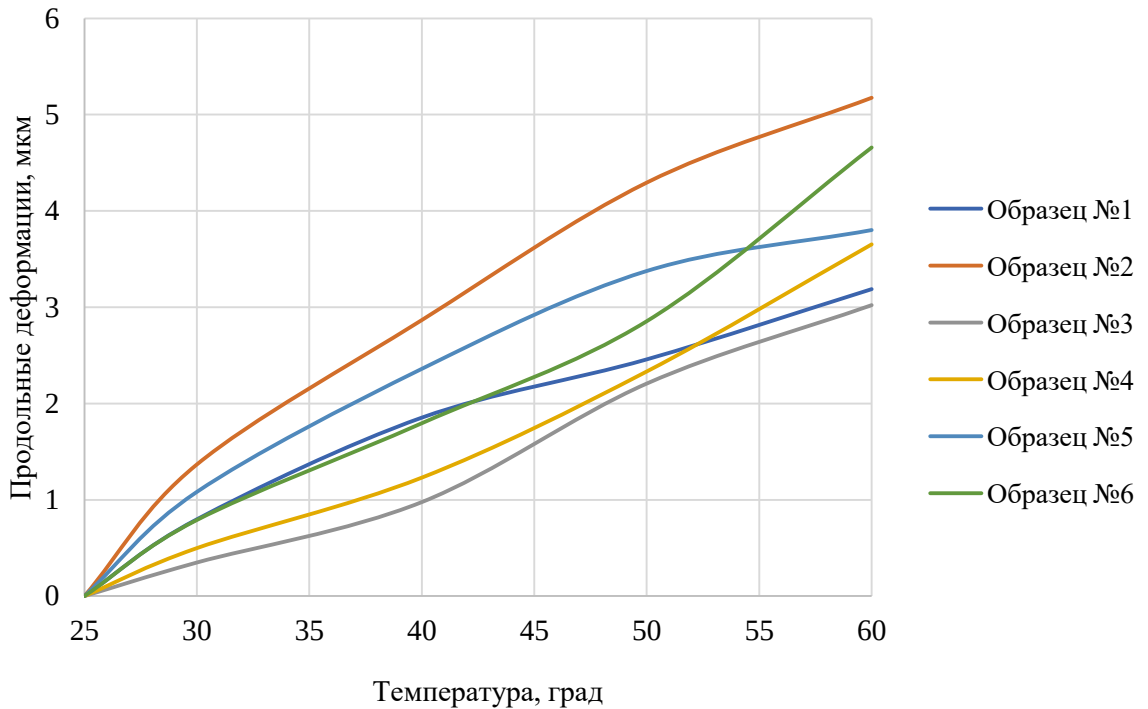


Рисунок 4.2 – Закономерности изменения продольных деформаций рудо-породного образца при нагреве

4.4 Численное моделирование с учетом различных термомеханических параметров горной породы

В рамках разработанного метода влияния термомеханических параметров изменение диаметра измерительной скважины учитывается на основании численного моделирования. Для этого решена сопряженная термомеханическая задача (термомеханический связанный анализ), где помимо напряженного состояния формировалось связанное с ним тепловое поле. Параметры напряженного состояния и упругие свойства горного массива, использованные при моделировании, описаны в разделе 2.4. Тепловое поле формировалось путем назначения температуры в узлах конечных-элементов, которая в начале расчета составляла 17°C (температура горного массива при установке трехкомпонентного датчика смещений). Температурный коэффициент линейного расширения был принят равным $2 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Диапазон изменяемых термомеханических параметров соответствует исследуемому литотипу: теплопроводность горной породы (λ_T) (от 0,5 до $2,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}} \cdot \text{K}$); удельная теплоемкость горной породы (C) (от 600 до $1400 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{K}$). Расчетная схема разработанных численных моделей представлена на рисунке 4.3.

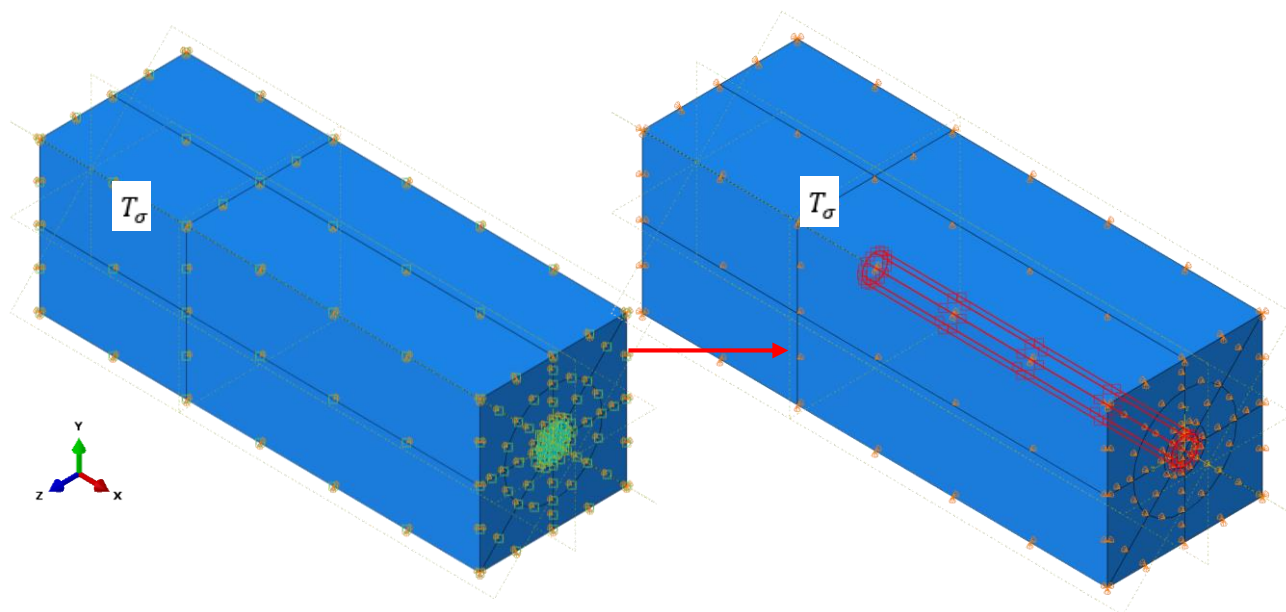


Рисунок 4.3 – Расчетная схема разработанных численных моделей

На этапе создания кольцевой разгрузочной щели на внешних стенках измерительной скважины формировалась температура от трения полый буровой коронки равная 60°C . Необходимо отметить, что время обурирования при проведении натурных испытаний составляет порядка 30 минут, что отражено при моделировании. Данная постановка позволяет отслеживать изменение температуры относительно обурирования измерительной скважины (рисунок 4.4).

На начальном этапе измерений температура на внутреннем контуре измерительной скважины равняется температуре окружающего горного массива, в связи с отсутствием контакта с буровым оборудованием. Первое отклонение температуры от исходного состояния было зафиксировано на 10 минуте и составило 3°C (увеличение на 15%). К 20 минуте температура на внутреннем контуре измерительной скважины составляла 35°C (увеличение на 43% по сравнению с предыдущим этапом). Конечная температура, соответствующая завершению обурирования измерительной скважины (30 минута), равнялась 48°C . Общее температурное приращение составило 31°C (76%).

Необходимо отметить, что для достижения состояния температурного равновесия (равенства температур на внешнем и внутреннем контурах измерительной скважины) для исследуемых термомеханических свойств горного массива продолжительность численного эксперимента должна составлять порядка 70 минут, что более чем в два раза превышает продолжительность обурирования при проведении натурных испытаний и не отражает реальное поведение горного массива.

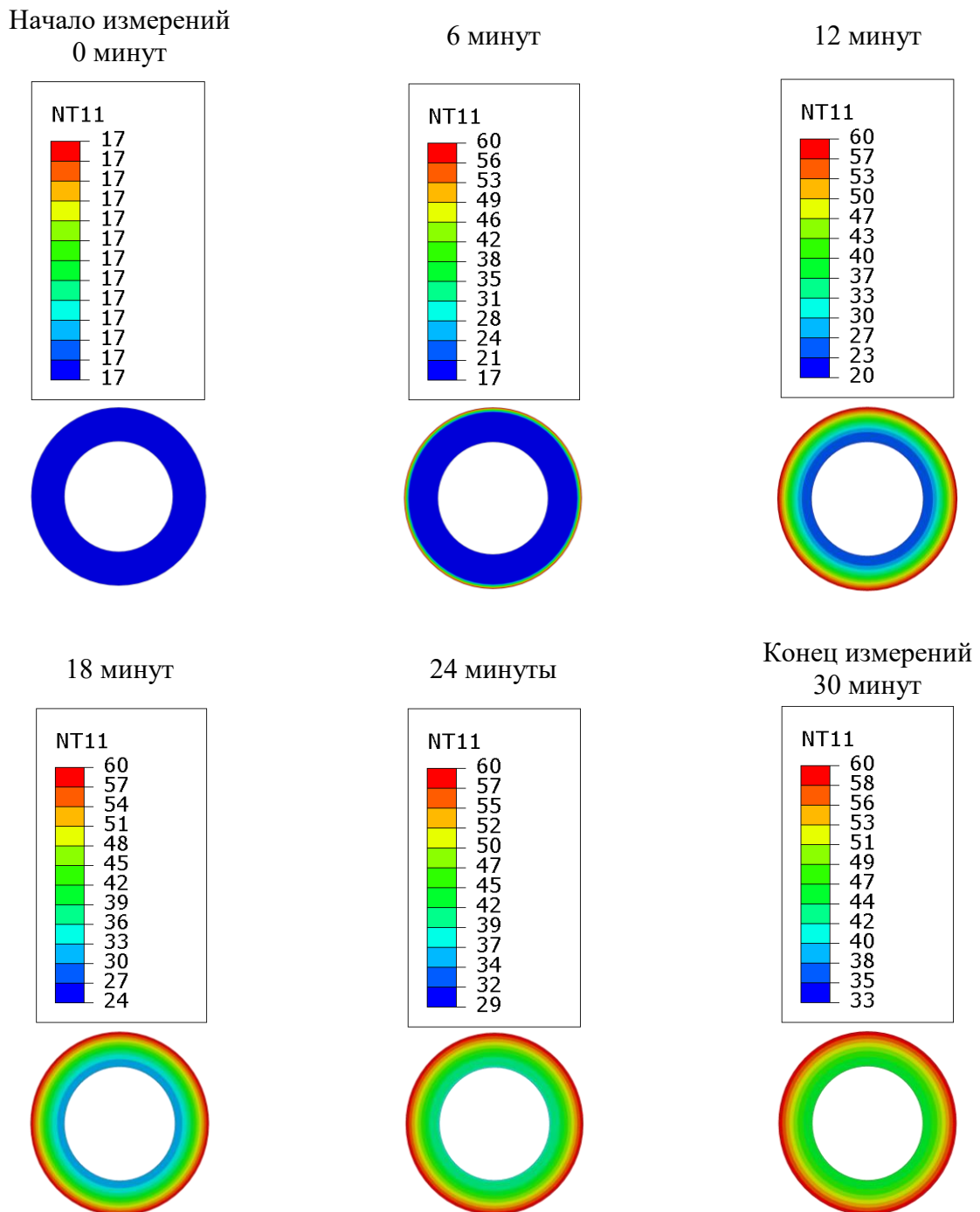
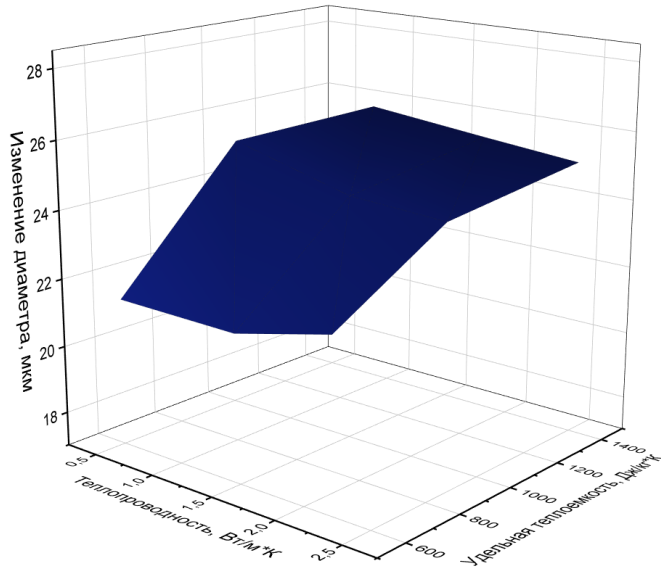


Рисунок 4.4 – Распределение температуры от поверхности соприкосновения с полый буровой коронкой к внутренней поверхности измерительной скважины

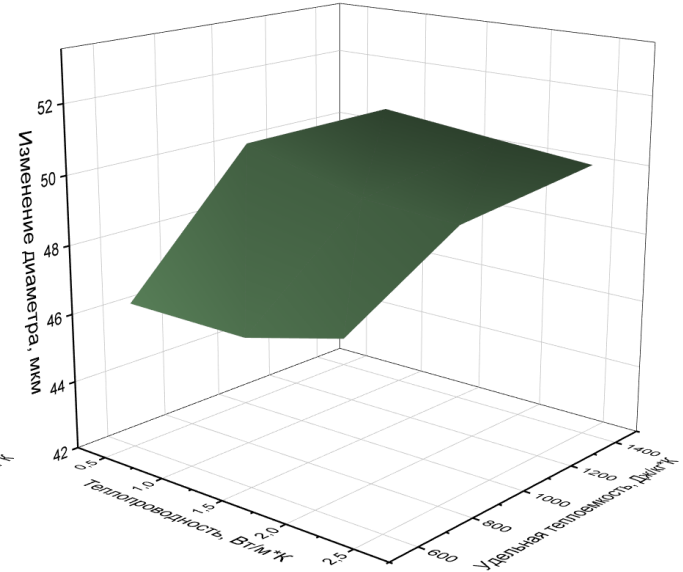
Результате численного моделирования представлены на рисунке 4.5.

Выявлено, что при увеличении теплопроводности горного массива диаметр измерительной скважины увеличивается с большей интенсивностью, а при увеличении удельной теплоемкости горного массива – с меньшей.

а



б



в

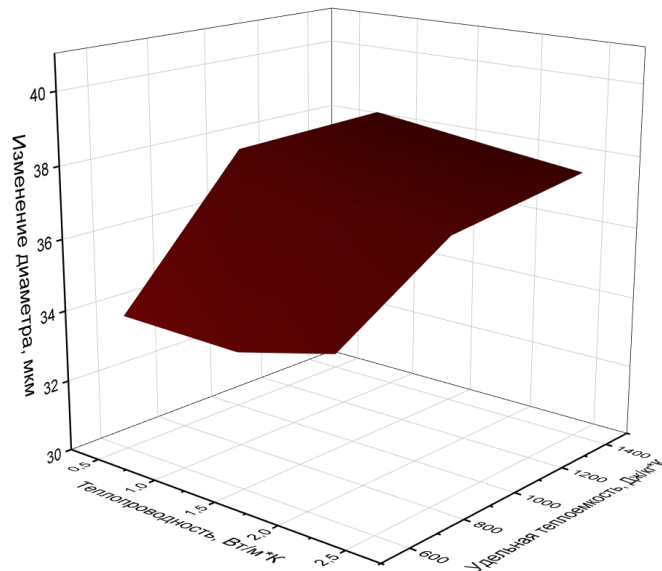


Рисунок 4.5 – Поверхности, отражающие изменение диаметра измерительной скважины, при различных термомеханических параметрах: а – направление 1-5; б – направление 3-7;

в – направления 2-6, 4-8

Изменения диаметра измерительной скважины z определено на основании многовариантного численного моделирования и описывается полиномиальной зависимостью (4.1):

$$z = z_0 + a \cdot \lambda_T - b \cdot C - c \cdot \lambda_T^2 + d \cdot C^2, \quad (4.1)$$

где z_0 – коэффициент, отражающий изменение диаметра измерительной скважины в различных направлениях; a, b, c, d – коэффициенты, аппроксимации полиномиальной зависимости; λ_T – теплопроводность горной породы, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; C – удельная теплоемкость горной породы, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Коэффициент корреляции результатов многовариантного численного моделирования и значений, рассчитанных по полиномиальной зависимости (4.1), составляет 0,997 (рисунок 4.6), что говорит о высокой достоверности аппроксимации.

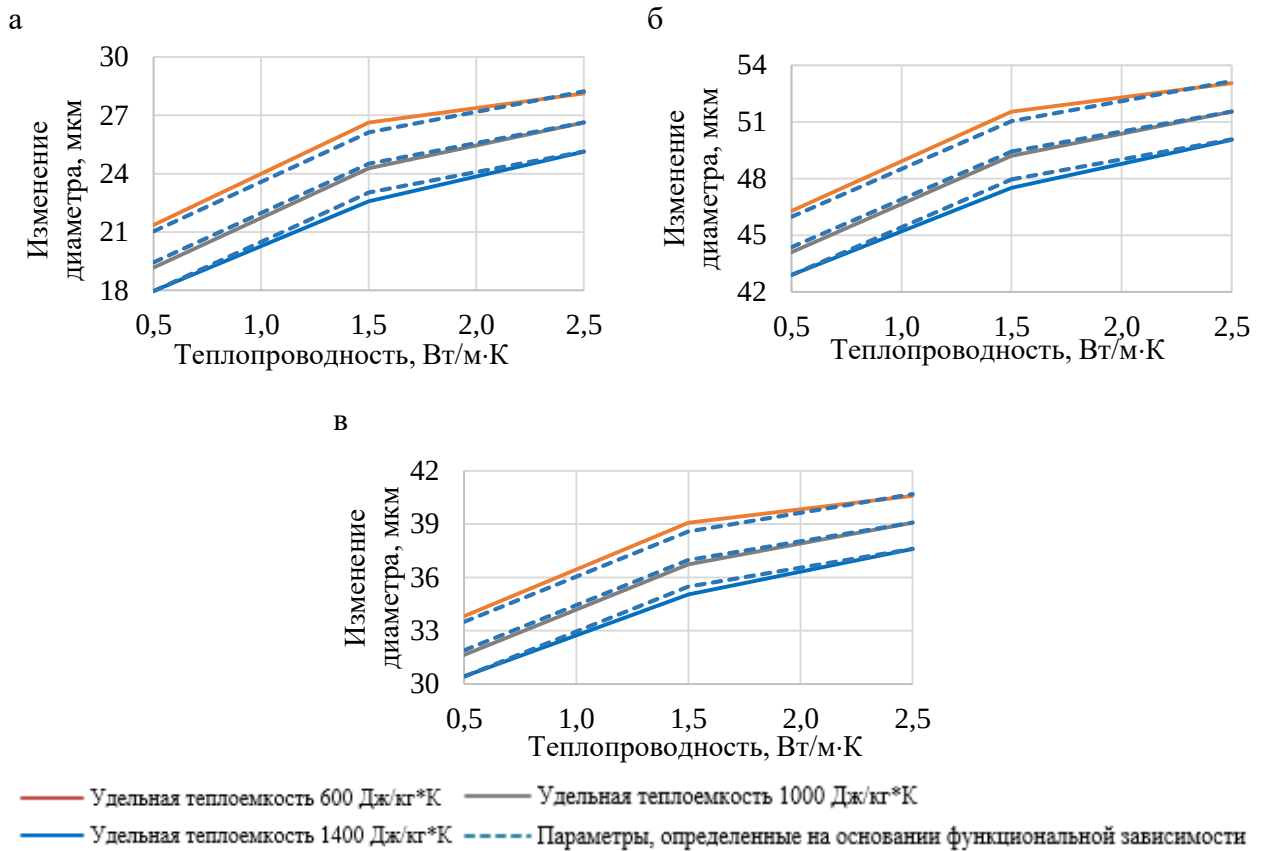


Рисунок 4.6 – Закономерности, отражающие расхождение предложенной полигональной закономерности с результатами многовариантного численного моделирования: а – направление 1-5; б – направление 3-7; в – направления 2-6, 4-8

Выявленная полиномиальная зависимость (4.1) справедлива для опорных параметров: температурный коэффициент линейного расширения, равный $2 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; температура, возникающая в момент обруивания измерительной скважины, равная 60°C . С целью учета иных значений были проведены дополнительные исследования и определены: коэффициент, отражающий изменение температурного коэффициента линейного расширения (K_1) (рисунок 4.7); коэффициент, отражающий изменение температуры, возникающей в момент обруивания измерительной скважины (K_2) (рисунок 4.8).

Диаметр измерительной скважины увеличивается при увеличении температурного коэффициента линейного расширения, подчиняясь линейному закону. Аналогичное поведение наблюдается при увеличении температуры, возникающей в момент обруивания измерительной скважины.

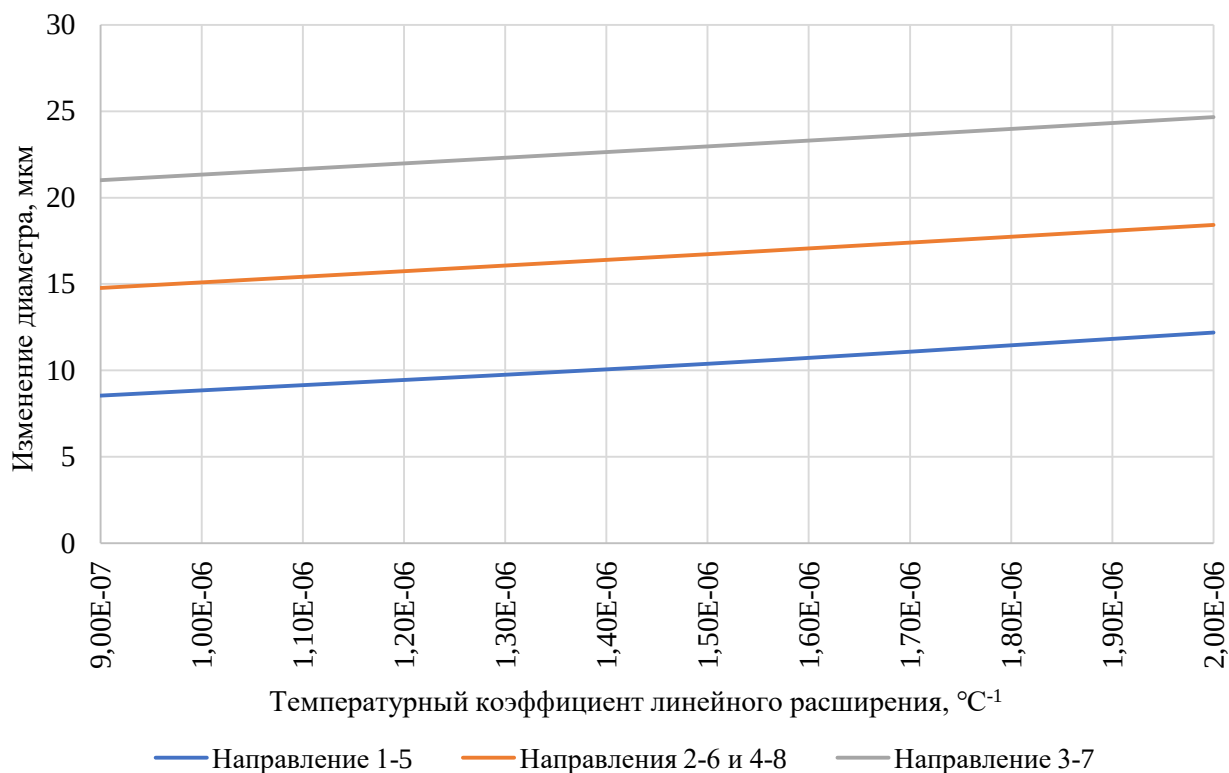


Рисунок 4.7 – Закономерности изменения диаметра измерительной скважины и температурного коэффициента линейного расширения ($T_{06} = 60^{\circ}\text{C}$)

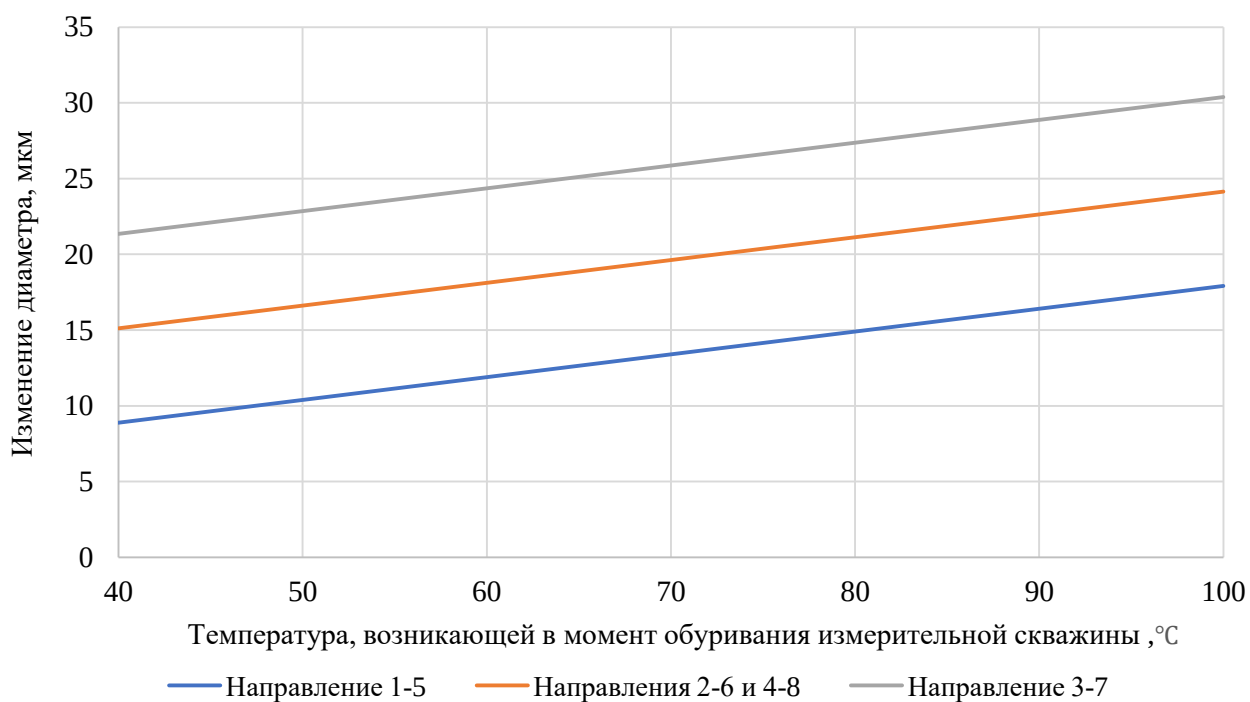


Рисунок 4.8 – Закономерности изменения диаметра измерительной скважины и температуры, возникающей в момент обуривания измерительной скважины ($\alpha_T = 2 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)

На основании полученных закономерностей и полиномиальной зависимости (4.1) были получены соотношения (4.2) и (4.3) для определения коэффициентов K_1 и K_2 :

$$K_1 = \frac{z}{3 \cdot 10^6 \cdot a_1 + b_1}, \quad (4.2)$$

$$K_2 = \frac{z}{0,1505 \cdot a_2 + b_2}, \quad (4.3)$$

где a_1 – температурный коэффициент линейного расширения, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; a_2 – температура, возникающая в момент обуривания измерительной скважины, $^{\circ}\text{C}$; b_1, b_2 – коэффициенты, отражающие изменение диаметра измерительной скважины в различных направлениях.

Влияние изменения температуры горных пород, возникающего при ведении буровых работ, на изменение диаметра измерительной скважины (радиальные смещения стенок) описывается полиномиальным законом вида (4.4):

$$z = (z_0 + a \cdot \lambda_T - b \cdot C - c \cdot \lambda_T^2 + d \cdot C^2) \cdot K_1 \cdot K_2 \quad (4.4)$$

Полученные коэффициенты для представленных зависимостей сведены в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Коэффициенты зависимостей

№	Обозначение	Значение		
		Измерительное направление		
		1-5	3-7	2-6,4-8
Коэффициенты, зависящие от направления				
1	z_0	20,03	44,94	32,48
2	b_1	5,45	18,01	11,78
3	b_2	2,87	15,33	9,09
Коэффициенты аппроксимации				
4	a	8,03		
5	b	0,005		
6	c	1,48		
7	d	$3,71 \cdot 10^{-7}$		

В результате проведенных исследований установлено, что изменение температуры при обуривании измерительной скважины вызывает увеличение ее диаметра на 13-29% относительно варианта, где изменение температуры не учитывалось, что приводит к завышению определяемых главных напряжений. В разделе 2.4 представлены результаты разработанного метода определения естественного напряженного состояния, где изменение температуры при обуривании измерительной скважины не учитывалось: $\sigma_1 = 47,1$ МПа; $\sigma_2 = 27,9$ МПа; $\sigma_3 = 9,9$ МПа. При ее учете значения главных напряжений составили: $\sigma_1 = 44,1$ МПа; $\sigma_2 = 25,3$ МПа; $\sigma_3 = 8,6$ МПа. Необходимо отметить, что изменение температуры не влияет на ориентацию главных напряжений, так как приращение радиального смещения стенок измерительной скважины происходит равномерно по всем измерительным направлениям.

4.5 Выводы по Главе 4

Четвертая глава диссертационной работы посвящена учету изменения температуры, которое возникает в результате обурирования измерительной скважины на радиальные смещения ее стенок. Проведенные исследования, основанные на лабораторных испытаниях и численном моделировании, позволили сделать следующие выводы:

1. При выполнении натурных испытаний следует измерять температуру на всем протяжении процесса обурирования и последующего измерения с применением трехкомпонентного датчика смещений.
2. Увеличение теплопроводности горного массива способствует более интенсивному увеличению диаметра измерительной скважины, а увеличение удельной теплоемкости горного массива – менее интенсивному.
3. Влияние изменения температуры горных пород, возникающее при ведении буровых работ, на изменение диаметра измерительной скважины (радиальные смещения стенок) описывается полиномиальным законом вида (4.4).
4. При увеличении температурного коэффициента линейного расширения диаметр измерительной скважины также увеличивается по линейному закону. Аналогичное поведение наблюдается при увеличении температуры, возникающей в момент обурирования измерительной скважины.
5. Изменение температуры при обурировании измерительной скважины вызывает увеличение ее диаметра на 13-29% относительно варианта, где изменение температуры не учитывалось, что приводит к завышению определяемых главных напряжений.
6. Радиальные смещения стенок измерительной скважины, которые реализуются в результате увеличения температуры при обурировании измерительной скважины, оказывают влияние только на величину определяемых главных напряжений, а ориентация остается неизменной. Такое поведение связано с равномерным приращением радиальных смещений стенок измерительной скважины по всем измерительным направлениям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации содержится решение актуальной задачи геомеханики, а именно – определение естественного напряженного состояния горного массива, основанного на выполнении натурных измерений методом кольцевой разгрузки с использованием трехкомпонентного датчика смещений с последующей их обработкой с применением многовариантного численного моделирования в пространственной постановке, учитывающем анизотропность горного массива и температурный фактор.

Повышение достоверности определения естественного напряженного состояния горного массива достигается за счет:

1. Применения методики, включающей в себя проведение натурных и лабораторных испытаний, многовариантного численного моделирования, аналитического решения;
2. Учета трещиноватости горного массива, сопоставимую по размерам с измерительной скважины, в форме явного контактного взаимодействия;
3. Учета влияния температуры горного массива при его обурировании кольцевой разгрузочной щелью на изменение диаметра измерительной скважины.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Разработана методика определения естественного напряженного состояния горного массива апатит-нефелиновых руд месторождений Хибин, учитывающая натурные и лабораторные испытания, численное моделирования и аналитическое решение.
2. Получены зависимости изменения радиальных смещений стенок измерительной скважины и деформаций горного массива в зоне влияния горной выработки и за ее пределом.
3. При определении естественного напряженного состояния горного массива трещиноватость, сопоставимая по размерам с измерительной скважиной, должна учитываться в форме явного контактного взаимодействия.
4. Установлены зависимости влияния пространственной ориентации трещиноватости, сопоставимой по размерам с измерительной скважиной, на деформационно-прочностные параметры контактного взаимодействия, отражающего ее поведение.
5. Установлена полиномиальная зависимость изменения диаметра измерительной скважины, возникающего в результате изменения температурного режима горного массива при обурировании кольцевой разгрузочной щелью.

Применение предложенной в диссертационной работе методики позволит повысить достоверность определения естественного напряженного состояния и тем самым в целом

положительно повлияет на качество всех геомеханических расчетов, выполняемых при подземной разработке месторождений полезных ископаемых.

Перспективным направлением в данной области является автоматизация процесса обработки данных натурных испытаний, а также определение изменения параметров естественного напряженного состояния по данным деформационного мониторинга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев, Д. В. Херстовская статистика временной зависимости электромагнитной эмиссии при нагружении горных пород / Алексеев Д.В. и др. // ФТПРПИ. – 1993. – № 5. – С. 27 – 30.
2. Анцыферов, М.С. Сейсмоакустические исследования в угольных шахтах: монография / М.С. Анцыферов, Л.Г. Константинова, Л.Б. Переверзев. – М.: Издво АН СССР, 1980. – 132 с.
3. Бабелло, В.А. Оценка состояния горного массива на основе анализа горно-геологической обстановки и моделирования его напряженности / В.А. Бабелло, А.В. Бейдин, В.А. Овсейчук, С.В. Смолич // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 12. – С. 41–54. DOI:10.25018/0236-1493-2019-12-0-41-54.
4. Баженова, Е. А. Выделение тектонически нарушенных зон в пределах рудного месторождения по комплексу геофизических методов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – №5. – С. 67–83. DOI:10.25018/0236_1493_2022_5_0_67.
5. Барковский, В.М. Состояние и перспективы развития метода полной разгрузки / В.М. Барковский // В сб.: Измерение напряжений в массиве горных пород. Ч.1. – 1976. – С. 27 – 32.
6. Барышников, В. Д. Способ натурного определения упругих свойств горных пород в методе параллельных скважин / В. Д. Барышников, М.В. Курленя, С.Н. Попов и др. // ФТПРПИ. — 1982. – №1. – С. 18 – 23.
7. Батдорф, С.Б. Математическая теория пластичности, основанная на концепции скольжения / С.Б. Батдорф, Б. Будянский // Механика. – 1961. – № 1(171). – С. 16-21.
8. Бауков, Ю.Н. Горная геофизика. Геоконтроль неидеальных и неоднородных сред акустическими методами: учебное пособие / Ю.Н. Бауков – М.: Издательство МГГУ, 1999. – Ч.2. – 166 с.
9. Белоусов, В.В. Состояние и перспективы развития подземной разработки глубокозалегающих месторождений апатит-нефелиновых руд Хибинского массива / В.В. Белоусов, А.Ю. Абрашитов, А.Н. Сахаров // ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ, 2014, №10, С. 25-28.
10. Беляков, Н.А. Методика обработки данных полевых испытаний по оценке естественного напряженного состояния горного массива методом кольцевой разгрузки / Н.А. Беляков, К.В. Морозов, **И.А. Емельянов** // ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ. – 2023. – №5. – С. 89–96. DOI:10.17580/gzh.2023.05.13.
11. Беляков, Н.А. Методика оценки напряженного состояния горного массива многокомпонентным датчиком смещений методом overcoring / Н.А. Беляков, **И.А. Емельянов** //

Известия Уральского государственного горного университета. – 2023. – № 1(69). – С. 31-38. DOI 10.21440/2307-2091-2023-1-31-38.

12. Беляков, Н.А. Развитие подхода к обработке результатов измерений напряженного состояния методом кольцевой разгрузки / Н.А. Беляков, **И.А. Емельянов** // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2022. – №2. – С. 192-207. DOI 10.46689/2218-5194-2022-2-1-192-207.

13. Беляков, Н.А. Учет трещиноватости породного массива при определении его естественного напряженного состояния методом кольцевой разгрузки с применением многокомпонентного датчика смещений / Н.А. Беляков, **И.А. Емельянов** // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 12-1. – С. 145–164. DOI:10.25018/0236_1493_2024_121_0_145.

14. Влох, Н.П. Совершенствование метода щелевой разгрузки / Н.П. Влох, А.В. Зубков, Ю.Г. Феклистов // Диагностика напряженного состояния породных массивов: Сборник научных трудов. – 1980. – С. 30 – 35.

15. Гзовский, М.В. Соотношения между тектоническими разрывами и напряжениями в земной коре // Разведка и охрана недр. – 1956. - № 11. – С. 7-22.

16. Гинтов, О.Б. Некоторые закономерности разломообразования и методика морфокинематического анализа сколовых разломов / О.Б. Гинтов, В.М. Исая // Геофиз. Журн. – 1984а. – Т. 6. – № 3. – С. 3-10.

17. Горбунов, Г.И. Минеральные месторождения Кольского полуострова / Г.И. Горбунов, И.В. Бельков, С.И. Макиевский. – Л.: Наука, 1981. – 272 с.

18. ГОСТ 21153.2-84. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. Rocks. Methods for determination of axial compression strength : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по Управлению качеством продукции и стандартам от 19.06.84 № 1973 : введен взамен ГОСТ 21153.2-75 : дата введения 1986-07-01 / разработан и внесен Министерством угольной промышленности СССР.

19. ГОСТ 28985-91. Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии. Rocks. Method for determination of deformation characteristics under uniaxial compression : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 24.04.91 № 563 : введен впервые : дата введения 1992-07-01 / разработан и внесен Министерством угольной промышленности СССР, Академией наук СССР, Министерством геологии СССР, Академией

наук УССР, Министерством по производству минеральных удобрений, Государственным комитетом СССР по народному образованию.

20. ГОСТ 28985-91. Породы горные. Метод определения предела прочности при срезе со сжатием. Rocks. Method for the determination of cut strength limit : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 15.03.88 № 563 : введен взамен ГОСТ 21153.5-75 : дата введения 1989-07-01 / разработан и внесен Министерством угольной промышленности СССР, Академией наук СССР, Министерством геологии СССР, Академией наук УССР, Академией наук Кирг.ССР, Министерством высшего и среднего специального образования СССР.

21. Гулин, А.Ю. О характере зависимости показаний нейтронного каротажа от пористости пород / А.Ю. Гулин // «Прикладная геофизика». – 1973. – вып.72. – С. 204 – 214.

22. Гущенко, О.И. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений // Поля напряжений в литосфере. – М.: Наука. – 1979. – С. 7-25.

23. Данилович, В.Н. Метод поясов в исследовании трещиноватости, связанной с разрывными смещениями. – Иркутск.: Ирк. Полтех. ин-т. – 1961. – 47 с.

24. Зубков, А.В. Деформационные методы определения напряженного состояния пород на объектах недропользования / А.В Зубков, Ю.Г. Феклистов, Я.И. Липин, С.В. Худяков, Р.В. Криницын // Проблемы недропользования. – 2016. – № 4. – С. 41-49.

25. Каспарьян, Э.В. Напряженно-деформированное состояние массива пород Хибинских месторождений и задачи геомеханического районирования / Э.В. Каспарьян, Ю.В. Федотова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 5. – С. 97-107.

26. Катков, Т. А. Исследование горного давления с применением фотоупругих элементов: монография / Т.А. Катков. – М: Наука, 1978. – 130 с.

27. Корсакова, О.Р. Блочное строение Кольского полуострова: морфологическое районирование, геоэкологическая устойчивость в условиях природных систем (на примере горных массивов Хибин и Ловозеро) / О.Р. Корсакова, В.В. Колька, С.Н. Савченко // Вестник МГТУ, 12(3), 478-491. – 2009.

28. 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.

29. Курленя, М.В. Скважинные геофизические методы диагностики и контроля напряженно-деформированного состояния массивов горных пород / М.В. Курленя, В.Н. Опарин // монография. – Новосибирск: Наука, 1999. – 219 с.
30. Маринин, А. Структурные парагенезы и тектонические напряжения южной части Хибинского массива / А. Маринин, Л. Сим, Д. Жиров, И. Бондарь // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2018. – 15. – 239-241. 10.31241/FNS.2018.15.059
31. Методы и результаты изучения сейсмотектонических деформаций [Текст] / С.Л. Юнга. – М.: Наука, 1990. – 190 с.
32. Методы и результаты изучения сейсмотектонических деформаций [Текст] / С.Л. Юнга. – М.: Наука, 1990. – 190 с.
33. Механика землетрясений [Текст] / К. Касахара. – М.: Мир, 1985. – 126 с.
34. Механика очага тектонического землетрясения [Текст] / Б.В. Костров. – М.: Наука, 1975. – 176 с.
35. Мюллер, Л. Инженерная геология. Механика скальных массивов / Мюллер Л. Мир, 1971. – 255 с.
36. Неоднородность горных пород и их физические свойства [Текст] / М.В. Рац. – М.: Наука, 1968.
37. Никитин, Л.В. Методы теоретического определения тектонических деформаций и напряжений в сейсмических областях // Изв. АН СССР Физика Земли. – 1997. – С. 124-127.
38. Николаев, П.Н. Методика тектонодинамического анализа. – М.: Недра. – 1992. – 294 с.
39. Онохин, Ф.М. Особенности структуры Хибинского массива и апатито-нефелиновых месторождений. – Л.: Наука, 1975. – 106 с.
40. Опарин, В.Н. Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки параметры, воздействие на объекты недропользования: монография / В.Н. Опарин, А.Д. Сашурин, Г.И. Кулаков, А.В. Леонтьев, Л.А. Назаров и др.; отв. ред. М.Д. Новопашин. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 449 с.
41. Основы тектонофизики [Текст] / М.В. Гзовский. – М.: Наука, 1975. – 1535 с.
42. Парфенов, В.Д. Анализ напряженного состояния в ангидридовых тектонитах // ДАН СССР. – 1981. – Т. 260. - № 3. – С. 695-698.
43. Петрунин, Г.И. Теплофизические свойства вещества земли (часть 1): учебное пособие / Г.И. Петрунин, В.Г. Попов // М.: Физический факультет МГУ. – 2011. – 68 с
44. Расцветаев, Л.М. Выявление парагенетических семейств тектонических дизъюнктивов как метод палеогеомеханического анализа полей напряжений и деформаций

земной коры // Поля напряжений и деформаций в земной коре. – М.: Наука. – 1987. – С. 171-181.

45. Ребецкий, Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов. Научное издание. – М.: ИКЦ «Академкнига». – 2007. – 406 с. ISBN 978-5-94628-200-0.

46. Ржевский, В.В. Эмиссионные эффекты "памяти" в горных породах / В.В. Ржевский, В.С. Ямщиков, В.Л. Шкуратник // Доклады АН СССР. – 1983. – Т. 273. – № 5. – С.1094 – 1097.

47. Ривкин, И.Д. Звукометрический метод наблюдения проявления горного давления на шахтах Криворожского бассейна [Текст] / И.Д. Ривкин, В.П. Запольский, П.А. Богданов. – Москва: Металлургиздат. – 1956. – 188 с.

48. Руппенейт, К.В. Деформируемость массивов трещиноватых горных пород. К.В. Руппенейт. – М.: «Недра», 1975. – 223 с.

49. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023666261 Российская федерация. Программа для расчета значений и ориентаций главных напряжений горного массива. Заявка № 2023665188: заявл. 20.07.2023: опубл. 27.07.2023 / Н.А. Беляков, **И.А. Емельянов**; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 35 Кб.

50. Сим, Л.А. некоторые особенности полей напряжений в зонах разломов (по геологическим и сейсмологическим данным) // Поля напряжений и деформаций в земной коре. – М.: Наука. – 1987. – С. 151-158.

51. Скальные основания гидротехнических сооружений [Текст] / С.Б. Ухов. – М.: Энергия, 1975.

52. Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок [Текст] / И. А. Турчанинов [и др.]. – Л.: Наука, 1978. – 256 с.

53. Техника экспериментального определения напряжений в осадочных породах. / Отв. ред. Е.И. Шемякин. – Новосибирск: изд. «Наука», 1975. – 150 с.

54. Трещины горных пород [Текст] / С.Н. Чернышев. – М.: Наука, 1985.

55. Трумбачев, В.Ф. Измерение напряжений и деформаций методом фотоупругих покрытий: монография / В.Ф. Трумбачев, Г.А. Катков. – М.: Наука, 1966. – 115 с.

56. Турчанинов, И.А. Тектонические напряжения и устойчивость горных выработок / И.А. Турчанинов, Г.А. Марков, В.И. Иванов, А.А. Козырев – Л.: Наука. – 1978. – 256 с.

57. Указания по безопасному ведению горных работ на Хинганском месторождении, опасном по горным ударам [Текст] / И. Ю. Рассказов [и др.]. – Хабаровск : ИГД ДВО РАН, 2004. – 53 с.
58. Фильтрационные свойства трещиноватых горных пород [Текст] / Е.С. Ромм. – М.: Недра, 1966.
59. Шкуратник, В.Л. Горная геофизика. Ультразвуковые методы: учебное пособие / В.Л. Шкуратник. – М.: МГИ, 1990. – 104 с.
60. Шкуратник, В.Л. Исследование влияния напряжений на скорость распространения упругих волн в окрестности эллиптической горной выработки / В.Л. Шкуратник, Г.В. Данилов // ФТПРПИ. – 2005. – №3. – С. 3 – 10.
61. Шкуратник, В.Л. Методы определения напряжённо-деформированного состояния массива горных пород: научно-образовательный курс / В.Л. Шкуратник, П.В. Николенко. – М.: МГГУ, 2012. – 112 с.
62. Ямщиков, В.С. Измерение напряжений в массиве горных пород на основе эмиссионных эффектов памяти / В.С. Ямщиков, В.Л. Шкуратник, К.Г. Лыков // ФТПРПИ. – 1990. – № 2. – С. 23 – 28.
63. A'ssim, A.J. Most used rock mass classifications for underground opening / A.J A'ssim, Z.Y. Xing // Am. J. Engg. & Applied Sci. – 2010. – Т. 3. – №. 2. – С. 403-411.
64. Angelier, J. Tectonic analysis of fault slip data sets // Geopg. Res. – 1984. - № 89. – P. 5835-5848.
65. Arthaud, F. Methode de determination graphique des directions de raccouissement, d'allogement et intermediar d'une population de failles // Bul. Soc. geol. Fr. – 1969. – V. 7. – P. 729-737.
66. Aydan, Ö. The squeezing potential of rocks around tunnels; theory and prediction / Ö. Aydan, T. Akagi, T. Kawamoto // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 1993. – № 26. – P. 137-63.
67. Baker, W.E. Construction and evaluation of a three-dimensional strain rosette / W.E. Baker, R.C. Dove // Exp. Mech. – 1963. – Т. 3. – № 9. – С. 201–206.
68. Barton, N. Engineering classification of rock masses for the design of rock support / N. Barton, R. Lien, K. Lunde //Rock Mechanics. – 1974. – Volume 6. – P. 189-236.
69. Barton, N. Rock mass classification and tunnel reinforcement selection using the Q-system / N. Barton // Rock Classification Systems for Engineering Purposes. – ASTM International, 1988.
70. Barton, N. Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 2002. – Volume 39. – P. 185-216.

71. Bhasin, R. The use of stress-strength relationships in the assessment of tunnel stability // R. Bhasin, E. Grimstad // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 1996. – № 11. – P. 93-99. DOI:10.1016/0886-7798(95)00047-X.
72. Bieniawski, Z. The rock mass rating (RMR) system (geomechanics classification) in engineering practice / Z. Bieniawski // *Rock Classification Systems for Engineering Purposes*. – ASTM International, 1988.
73. Bieniawski, Z.T. Engineering classification of jointed rock masses / Z.T. Bieniawski // *Trans. S. African Instn. Civ. Engrs*. – 1973. – Volume 15(12). – P. 335 - 344.
74. Bieniawski, Z.T. Engineering rock mass classifications / Z.T. Bieniawski. – John Wiley and sons, 1989. – 252 p.
75. Bondar, I.V. Kinematics of minor disjunctive structures and tectonic stresses in the southern part of the Khibiny massif / I.V. Bondar, A.V. Marinin, L.A. Sim // *Russian Mining Industry*. – 2023. – № 1S. – P. 116–121. – DOI:10.30686/1609-9192-2023-S1-116-12.
76. Carvalho, J. Estimation of Rock Mass Modulus // *Open Journal of Geology*. – 2004.
77. Chen, J. A level set immersed finite element method for parabolic problems on surfaces with moving interfaces / J. Chen, X. Xiao, X. Feng, D. Sheen // *Journal of Computational Physics*. – 2025. – Vol. 531. – P. 113939. – DOI: 10.1016/j.jcp.2025.113939.
78. Chen, W. Hydraulic fracturing simulation for heterogeneous granite by discrete element method / W. Chen, H. Konietzky, C. Liu, X. Tan // *Computers and Geotechnics*. – 2018. – V.95. – P. 1-15. DOI:10.1016/j.compgeo.2017.11.016.
79. Deere, D. The rock quality designation (RQD) index in practice / D. Deere // *Rock Classification Systems for Engineering Purposes*. – ASTM International, 1988.
80. Fairhurst, C. Stress estimation in rock: A brief history and review // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2003. T. 40. № 7–8. C. 957–973. DOI:10.1016/j.ijrmms.2003.07.002.
81. Figueiredo, B. Determination of the stress field in a mountainous granite rock mass // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* – 2014. – T. 72. – C. 37–48. DOI:10.1016/j.ijrmms. 2014.07.017.
82. Heuze, F. E. High-temperature mechanical, physical and thermal properties of granitic rocks – a review // *In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. – 1983. – V. 20. – №. 1. – P. 3-10.
83. Hoek, E. Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses: The case of the Athens Schist Formation / E. Hoek, P. Marinos, M. Benissi // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 1998. – T. 57. – C. 151–160. – DOI:10.1007/s100640050031.
84. Hoek, E. El criterio de rotura de Hoek-Brown–Edición / E. Hoek, C. Carranza-Torres, B. Corkum // *RocScience*. – 2002.

85. Hoek, E. Empirical estimation of rock mass modulus / E. Hoek, M.S. Diederichs // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* – 2006. – V. 43. – P. 203–215.
86. Hoek, E. Strength of rock and rock masses / E. Hoek // *International Society of Rock Mechanics News Journal.* – 1994. – T. 2. – C. 4–16.
87. Hudson, J.A. ISRM suggested methods for rock stress estimation-part 1: Strategy for rock stress estimation / J.A. Hudson, F.H. Cornet, R. Christiansson // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* – 2003. – T. 40. № 7–8. – C. 991–998. DOI:10.1016/j.ijrmms.2003.07.011.
88. Kant, M.A. A theory on thermal spalling of rocks with a focus on thermal spallation drilling / M.A. Kant, E. Rossi, C. Madonna, D. Höser, P. Rudolf von Rohr // *J. Geophys. Res. Solid Earth.* – 2017. – V. 122. – P. 1805–1815. DOI:10.1002/2016JB013800.
89. Kozyrev, A.A. Analysis of rock burst realization conditions in the Rasvumchorrskiy mine of “Apatit” JSC in 14.02.2012 / A.A. Kozyrev, I.E. Semenova, A.V. Zemtsovskiy // *Mining Informational and Analytical Bulletin.* – 2013. – № 4. – P. 28–33. (In Russ.).
90. Kremenetskaya, E.O. Induced Seismicity in the Khibiny Massif (Kola Peninsula) / E.O. Kremenetskaya, V.M. Trjapitsin, H.K. Gupta, R.K. Chadha // *Induced Seismicity.* – 1995. – P. 29–37. – DOI:10.1007/978-3-0348-9238-4_3.
91. Liu, J. 3D geomechanical modeling and numerical simulation of in-situ stress fields in shale reservoirs: A case study of the lower Cambrian Niutitang formation in the Cen’gong block, South China // *Tectonophysics.* – 2017. – T. 712–713. – C. 663–683. DOI:10.1016/j.tecto.2017.06.030.
92. Mitri, H.S. Finite element modeling of cable bolted stopes in hard rock ground mines / H.S. Mitri, R. Edrissi, J. Henning // *Presented at the SME annual meeting.* – 1994. – P. 94–116.
93. Narimani, S. Estimation of the Poisson's Ratio of the Rock Mass / S. Narimani, S.M. Davarpanah, B. Vásárhelyi // *Periodica Polytechnica Civil Engineering.* – 2024. – V. 68(1). – P. 274–288. 2024. DOI:10.3311/PPci.22689
94. Nicholson, G.A. A nonlinear deformation modulus based on rock mass classification / G.A. Nicholson, Z.T. Bieniawski // *Int. J. Min. Geol. Eng.* – 1990. – V. 8. – P. 181–202.
95. Petr, W. Determination of stress state in rock mass using strain gauge probes CCBO // *Procedia Eng.* – 2016. – T. 149. № June. – C. 544–552. DOI:10.1016/j.proeng.2016.06.703.
96. Pratt H. R. The effect of specimen size on the mechanical properties of unjointed diorite / H.R. Pratt, A. D. Black, W. S. Brown, W. F. Brace // *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.* 9, 1972. P. 513–529.
97. Pudov, E. Estimation of impact of rock conditions on the conveyor workings geometry by means of geophysical methods / E. Pudov, E. Kuzin, A. Efremkov // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* – 2020. – T. 939. – № 1. DOI:10.1088/1757-899X/939/1/012063.

98. Qin, QH. Boundary Element Method / QH. Qin, J. Yang // Special Topics in the Theory of Piezoelectricity. – 2009. – P. 137-168. DOI:10.1007/978-0-387-89498-0_5.
99. Saksala, T. Numerical modeling of thermo-mechanical failure processes in granitic rock with polygonal finite elements // Int J Numer Anal Methods Geomech. – 2021. – V.45. – P. 1900-1919. DOI:10.1002/nag.3247.
100. Scelsi, G. A step-by-step analytical procedure to estimate the in-situ stress state from borehole data // J. Pet. Sci. Eng. – 2019. – T. 176. – № August. – C. 994–1007. DOI:10.1016/j.petrol.2019.01.100.
101. Seryakov, V. M. Stress Determination in Rock Mass with Regard to Sequence of Deep-Level Cut-and-Fill // J. Min. Sci. – 2021. – T. 57. – № 6. – C. 894–900. DOI:10.1134/S1062739121060028.
102. Shen, J. A comparative study for empirical equations in estimating deformation modulus of rock masses / J. Shen, M. Karakus, C. Xu //Tunn. Undergr. Sp. Technol. – 2012. – T. 32. – C. 245-250. DOI:10.1016/j.tust.2012.07.004.
103. Singh, B. Rock mass classification: a practical approach in civil engineering / B. Singh, R. K. Geol. – Amsterdam : Elsevier Science, 1999. – 282 p.
104. Sołowski, WT. Chapter Two - Material point method: Overview and challenges ahead // Advances in Applied Mechanics. – 2021. – V. 54. – P. 113-204. DOI:10.1016/bs.aams.2020.12.002.
105. Vásárhelyi, B. Estimation of the Poisson's Rate of the Intact Rock in the Function of the Rigidity / B. Vásárhelyi, B.A. Lógó // Periodica Polytechnica Civil Engineering. – 2019. – №. 63(4). – P. 1030–1037. DOI:10.3311/PPci.14946.
106. Yang, Sheng-Qi. An experimental investigation on thermal damage and failure mechanical behavior of granite after exposure to different high temperature treatments / Sheng-Qi Yang, P.G. Ranjith, Hong-Wen Jing, Wen-Ling Tian, Yang Ju // Geothermics. – 2017. – V. 65. – P. 180-197. DOI:10.1016/j.geothermics.2016.09.008.
107. Yoshikawa, S. A new method for estimation of the crustal stress from cored rock samples: laboratory study in the case of uniaxial compression / S. Yoshikawa, K. Mogi // Tectonophysics. – 1981. – Vol. 74. – №. 3/4. – P. 323 – 339.
108. Yudhbir, F. An empirical failure criterion for rock masses / F. Yudhbir, W. Lemanza, F. Prinzl // Proceedings of the 5th Congress of the International Society for Rock Mechanics. – 1983. – P. B1-B8.
109. Zhang, L. Determination and applications of rock quality designation (RQD) / L. Zhang // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2016. – T. 8. – № 3. – C. 389–397.
110. Zhou, PB. Finite Difference Method // Numerical Analysis of Electromagnetic Fields. – 1993. – P. 63-94. DOI:10.1007/978-3-642-50319-1_3.

ПРИЛОЖЕНИЕ А**Акт о внедрении результатов кандидатской диссертации****Утверждаю**Директор по проектированию
горных работ

ООО «СПб-Гипрошахт»

 Д.В. Климов

Дата «23» сентября 2024 г.

**АКТ**

о внедрении результатов кандидатской диссертации

Емельянова Ивана Андреевичапо научной специальности 2.8.6 – Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика.

Комиссия в составе:

Председатель:

Донской Владимир Алексеевич – главный инженер проектов

Члены комиссии:

1. Мирончук Дмитрий Петрович – начальник центра гидрогеомеханики и шахтного строительства;
2. Степанов Евгений Сергеевич – начальник горного отдела.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Развитие метода полной разгрузки для определения естественного напряженного состояния горных массивов апатит-нефелиновых месторождений Хибин», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, использованы в деятельности ООО «СПб-Гипрошахт» при разработке проекта проведения подземных горных работ на рудных месторождениях в виде комплексного метода оценки горно-тектонического естественного поля напряжений горного массива.

Использование указанных результатов позволяет повысить точность определения параметров горно-тектонического естественного поля напряжений горного массива, а именно величины и ориентации главных напряжений, путем выполнения следующих работ:

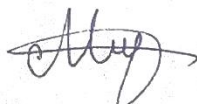
- исследование функциональных зависимостей радиальных смещений стенок измерительной скважины от линейных и угловых деформаций, полученных в ходе проведения полевых и лабораторных испытаний и численного моделирования;
- учет нарушенности горного массива, представленного в форме контактного взаимодействия;
- выявление влияния температурного фактора, вызванного буровыми работами в ходе проведения полевых испытаний.

Председатель комиссии

Главный инженер проектов



Донской В.А.

Члены комиссии:Начальник центра
гидрогеомеханики и
шахтного строительства

Мирончук Д.П.

Начальник горного отдела



Степанов Е.С.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023666261

**Программа для расчета значений и ориентаций главных
напряжений горного массива**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Емельянов Иван Андреевич (RU), Беляков Никита
Андреевич (RU)*



Заявка № 2023665188

Дата поступления 20 июля 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 27 июля 2023 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**RU2023666261**

**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ**

Номер регистрации (свидетельства): 2023666261 Дата регистрации: 27.07.2023 Номер и дата поступления заявки: 2023665188 20.07.2023 Дата публикации и номер бюллетеня: 27.07.2023 Бюл. № 8 Контактные реквизиты: нет	Автор(ы): Емельянов Иван Андреевич (RU), Беляков Никита Андреевич (RU) Правообладатель(и): федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (RU)
---	--

Название программы для ЭВМ:

Программа для расчета значений и ориентаций главных напряжений горного массива

Реферат:

Основное предназначение программы – расчет главных напряжений в горном массиве и их ориентаций. Программа является одним из наиболее значимых компонентов комплексной методики по оценке естественного напряженного состояния горного массива. В основу программы входят многовариантное численное моделирование и аналитический подход. Позволяет автоматизировать процесс получения значений и ориентаций главных напряжений горного массива. Область применения: геомеханика, подземное строительство, компьютерное моделирование. Реализованы следующие функции: ввод исходных данных (деформационно-прочностные свойства kernового материала, значения смещений стенок исследовательской скважины); расчет линейных и угловых деформаций; расчет нормальных и касательных напряжений; расчет главных напряжений; расчет направляющих косинусов главных напряжений.

Язык программирования: Python

Объем программы для ЭВМ: 35 КБ

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Продольный разрез Хибинских месторождений

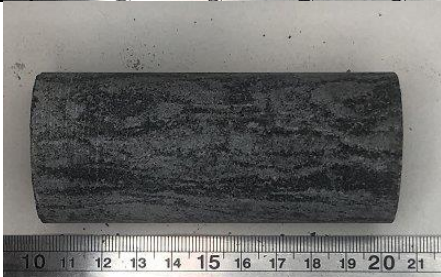
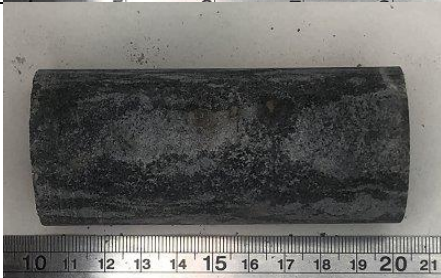


Рисунок В.1 – Продольный разрез Хибинских месторождений [9]

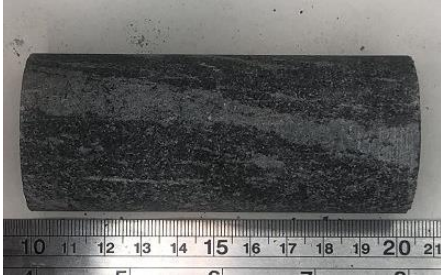
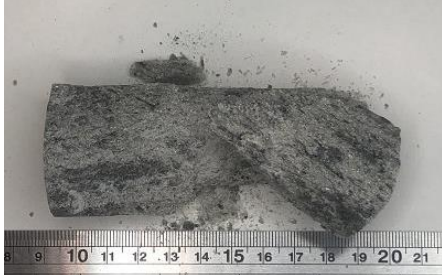
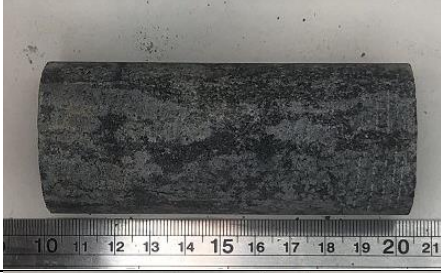
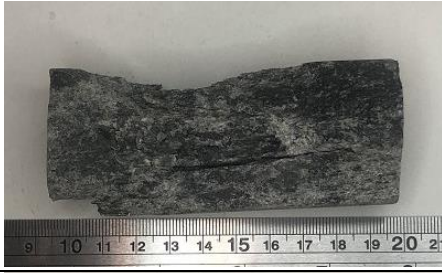
ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Фотографии образцов до и после лабораторных испытаний

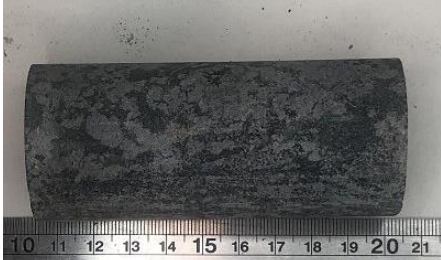
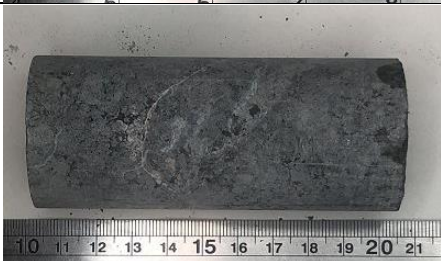
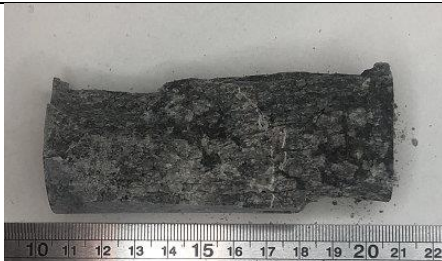
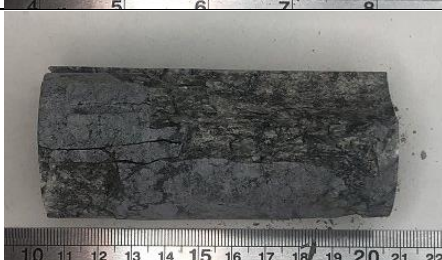
Таблица Г.1 – Фотографии образцов до и после лабораторных испытаний

№	Фотографии до лабораторных испытаний		Фотографии после лабораторных испытаний	
1-1(схема а)				
1-2(схема а)				
2-1(схема а)				

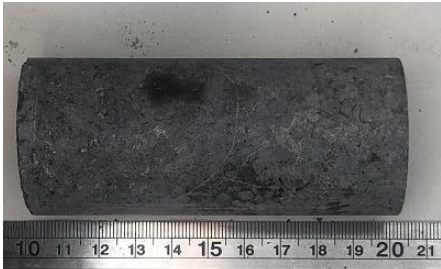
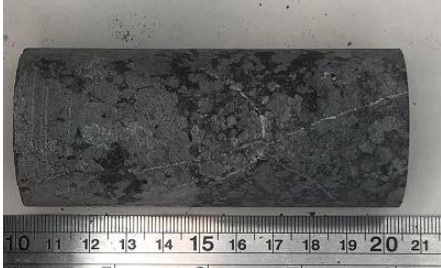
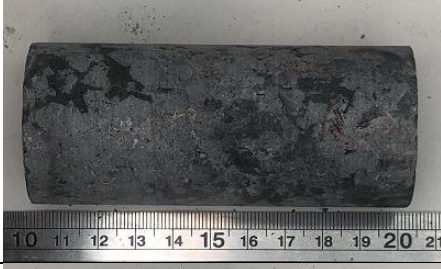
Продолжение таблицы Г.1

№	Фотографии до лабораторных испытаний		Фотографии после лабораторных испытаний	
2-2(схема а)				
3-1(схема а)				
3-2(схема а)				
4-1(схема а)				

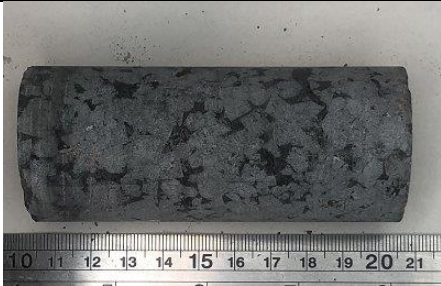
Продолжение таблицы Г.1

№	Фотографии до лабораторных испытаний		Фотографии после лабораторных испытаний	
4-2(схема а)				
1-1(схема б)				
1-2(схема б)				
2-1(схема б)				

Продолжение таблицы Г.1

№	Фотографии до лабораторных испытаний		Фотографии после лабораторных испытаний	
2-2(схема б)		 A dark, cylindrical sample of material, approximately 20 cm long, resting on a ruler. The surface is dark and slightly textured.		 The same sample after testing, showing a significant longitudinal crack and some surface deformation. The ruler below it shows a different scale (4-22 cm).
3-1(схема б)		 A dark, cylindrical sample of material, approximately 20 cm long, resting on a ruler. The surface is dark and slightly textured.		 The sample after testing, showing a deep, jagged longitudinal crack. The ruler below it shows a different scale (4-22 cm).
3-2(схема б)		 A dark, cylindrical sample of material, approximately 20 cm long, resting on a ruler. The surface is dark and slightly textured.		 The sample after testing, showing a significant longitudinal crack and some surface deformation. The ruler below it shows a different scale (4-22 cm).
4-1(схема б)		 A dark, cylindrical sample of material, approximately 20 cm long, resting on a ruler. The surface is dark and slightly textured.		 The sample after testing, showing a significant longitudinal crack and some surface deformation. The ruler below it shows a different scale (4-22 cm).

Продолжение таблицы Г.1

№	Фотографии до лабораторных испытаний	Фотографии после лабораторных испытаний
4-2(схема б)		

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Варианты напряженного состояния, использованные при численном моделировании

Таблица Д.1 – Варианты напряженного состояния, использованные при численном моделировании

Касательное напряжение, действующее в плоскости 1-3 τ_{1-3} , МПа	Касательное напряжение, действующее в плоскости 2-3 τ_{2-3} , МПа	Касательное напряжение, действующее в плоскости 1-2 τ_{1-2} , МПа	Минимальное главное напряжение σ_3 , МПа	Промежуточное главное напряжение σ_2 , МПа	Максимальное главное напряжение σ_1 , МПа	Угол поворота главных напряжений θ , град	Коэффициент бокового давления λ
Схема а							
0	0	0	9,625	19,25	35	0	0,5
0,8361	0	0	9,6983	19,1767	35	10	0,5
1,6463	0	0	9,9152	18,9598	35	20	0,5
2,4063	0	0	10,2700	18,6050	35	30	0,5
3,0929	0	0	10,7513	18,1237	35	40	0,5
3,6862	0	0	11,3446	17,5304	35	50	0,5
4,1675	0	0	12,0313	16,8438	35	60	0,5
4,5223	0	0	12,7912	16,0838	35	70	0,5
4,7392	0	0	13,6014	15,2736	35	80	0,5
4,8125	0	0	14,4375	14,4375	35	90	0,5
0	0	0	38,5	19,25	35	-	1
0	0	0	38,3535	19,25	35	0	2
1,6707	0	0	37,9196	19,3965	35	10	2
3,2926	0	0	37,2100	19,8304	35	20	2
4,8125	0	0	36,2475	20,5400	35	30	2
6,1873	0	0	35,0623	21,5025	35	40	2

Продолжение таблицы Д.1

Касательное напряжение, действующее в плоскости 1-3 τ_{1-3} , МПа										
0	7,3725	0	0	33,6875	35	22,6877				
	8,3350			32,1676		24,0625				
	9,0446			30,5457		25,5824				
	9,4785			28,875		27,2043				
	9,625			38,5		28,875				
0	0	0	0	57,75	35	19,25				
	3,3429			57,4569		19,5431				
	6,5838			56,5893		20,4107				
	9,6250			55,1714		21,8286				
	12,3732			53,2464		23,7536				
	14,7464			50,8732		26,1268				
	16,6714			48,1250		28,8750				
	18,0893			45,0838		31,9162				
	18,9569			41,8429		35,1571				
	19,25			38,5		38,5				
	Схема б									
	0			0		0	5,8	0	0,5	0
0,8361		10	9,6983							
1,6463		20	9,9152							
2,4063		30	10,2700							
3,0929		40	10,7513							

Продолжение таблицы Д.1

Касательное напряжение, действующее в плоскости 1-3 τ_{1-3} , МПа	Касательное напряжение, действующее в плоскости 2-3 τ_{2-3} , МПа	Касательное напряжение, действующее в плоскости 1-2 τ_{1-2} , МПа	Минимальное главное напряжение σ_3 , МПа	Промежуточное главное напряжение σ_2 , МПа	Максимальное главное напряжение σ_1 , МПа	Угол поворота главных напряжений θ , град	Коэффициент бокового давления λ
0,5	0	5,8	5,8	17,5304	11,3446	50	0,5
				16,8438	12,0313	60	
				16,0838	12,7912	70	
				15,2736	13,6014	80	
				14,4375	14,4375	90	
1	0	5,8	5,8	19,25	38,5	-	1
2	0	5,8	5,8	19,25	38,3535	0	2
				19,3965	37,9196	10	
				19,8304	37,2100	20	
				20,5400	36,2475	30	
				21,5025	35,0623	40	
				22,6877	33,6875	50	
				24,0625	32,1676	60	
				25,5824	30,5457	70	
				27,2043	28,875	80	
				28,875	38,5	90	
3	0	5,8	5,8	19,25	57,75	0	3
				19,5431	57,4569	10	
				20,4107	56,5893	20	
				21,8286	55,1714	30	
				23,7536	53,2464	40	

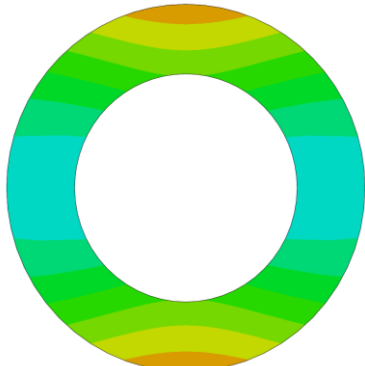
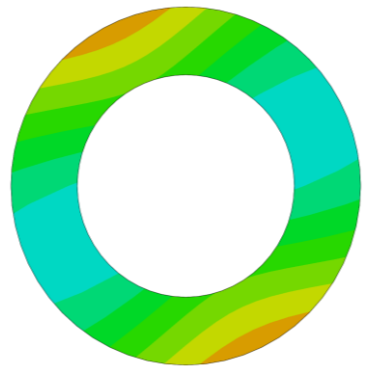
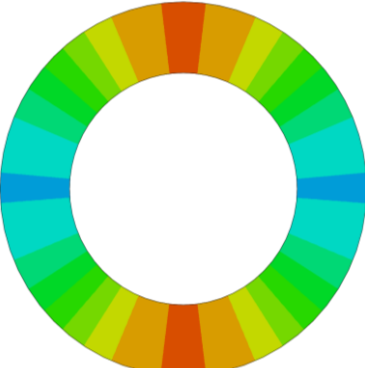
Продолжение таблицы Д.1

Касательное напряжение, действующее в плоскости 1-3 τ_{1-3} , МПа	0
Касательное напряжение, действующее в плоскости 2-3 τ_{2-3} , МПа	0
Касательное напряжение, действующее в плоскости 1-2 τ_{1-2} , МПа	14,7464 16,6714 18,0893 18,9569 19,25
Минимальное главное напряжение σ_3 , МПа	5,8
Промежуточное главное напряжение σ_2 , МПа	26,1268 28,8750 31,9162 35,1571 38,5
Максимальное главное напряжение σ_1 , МПа	50,8732 48,1250 45,0838 41,8429 38,5
Угол поворота главных напряжений θ , град	50 60 70 80 90
Коэффициент бокового давления λ	3

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Изохромы распределения радиальных смещений стенок измерительной скважины и деформаций горного массива

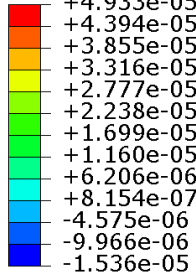
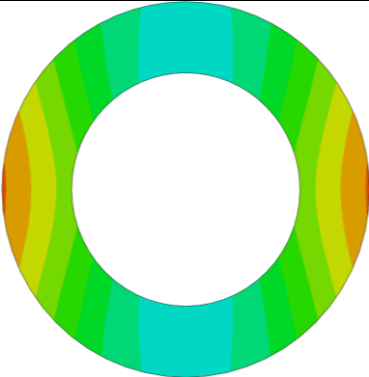
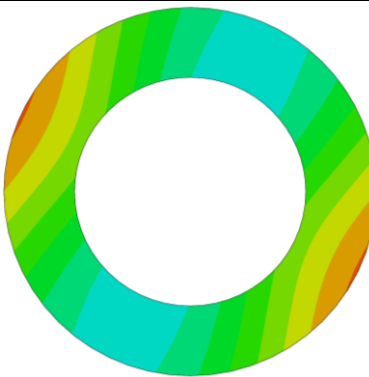
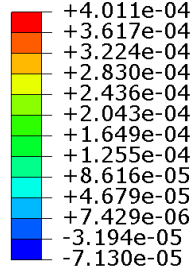
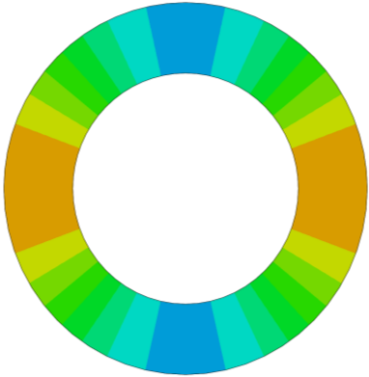
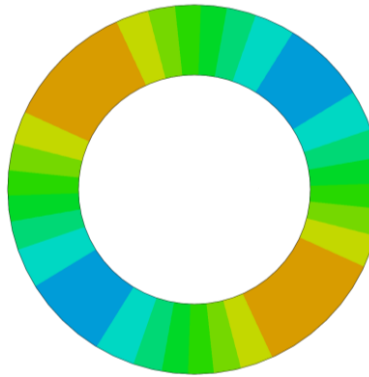
Таблица Е.1 – Изохромы распределения радиальных смещений стенок измерительной скважины и деформаций горного массива

Коэффициент бокового давления	Наименование параметра	Значения	Изохромы		
			Угол наклона главных напряжений 0 град	Угол наклона главных напряжений 50 град	Угол наклона главных напряжений 90 град
Схема а					
0,5	Радиальные смещения стенок измерительной скважины, м	U, U1 (UNDEF:CSYS-1) +2.617e-05 +2.334e-05 +2.052e-05 +1.769e-05 +1.487e-05 +1.204e-05 +9.215e-06 +6.390e-06 +3.564e-06 +7.380e-07 -2.088e-06 -4.913e-06 -7.739e-06			
	Деформации горного массива	E, E11 (UNDEF:CSYS-1) (Avg: 75%) +1.976e-04 +1.777e-04 +1.579e-04 +1.380e-04 +1.182e-04 +9.831e-05 +7.845e-05 +5.859e-05 +3.873e-05 +1.887e-05 -9.865e-07 -2.084e-05 -4.070e-05			

Продолжение таблицы Е.1

Коэффициент бокового давления	Наименование параметра	Значения	Изохроны		
			Угол наклона главных напряжений 0 град	Угол наклона главных напряжений 50 град	Угол наклона главных напряжений 90 град
1	Радиальные смещения стенок измерительной скважины, м	U, U1 (UNDEF:CSYS-1) +2.548e-05 +2.275e-05 +2.002e-05 +1.730e-05 +1.457e-05 +1.185e-05 +9.119e-06 +6.393e-06 +3.666e-06 +9.397e-07 -1.787e-06 -4.513e-06 -7.240e-06			
	Деформации горного массива	E, E11 (UNDEF:CSYS-1) (Avg: 75%) +1.492e-04 +1.331e-04 +1.171e-04 +1.011e-04 +8.501e-05 +6.896e-05 +5.291e-05 +3.687e-05 +2.082e-05 +4.773e-06 -1.127e-05 -2.732e-05 -4.337e-05			

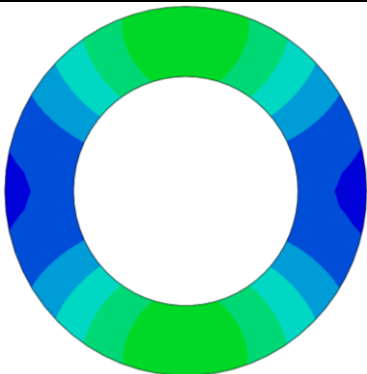
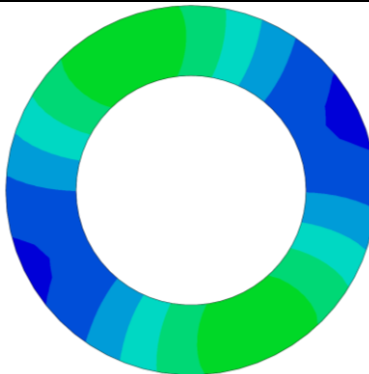
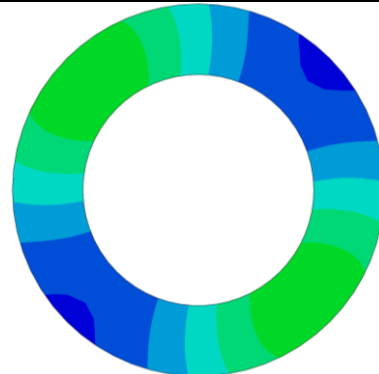
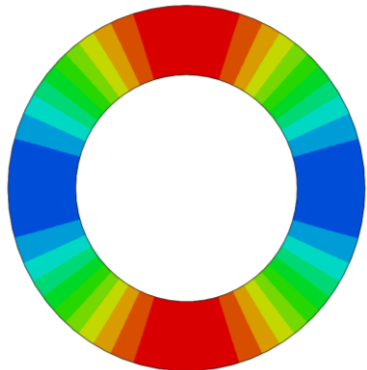
Продолжение таблицы Е.1

Коэффициент бокового давления	Наименование параметра	Значения	Изохромы		
			Угол наклона главных напряжений 0 град	Угол наклона главных напряжений 50 град	Угол наклона главных напряжений 90 град
2	Радиальные смещения стенок измерительной скважины, м	U, U1 (UNDEF:CSYS-1) 			
	Деформации горного массива	E, E11 (UNDEF:CSYS-1) (Avg: 75%) 			

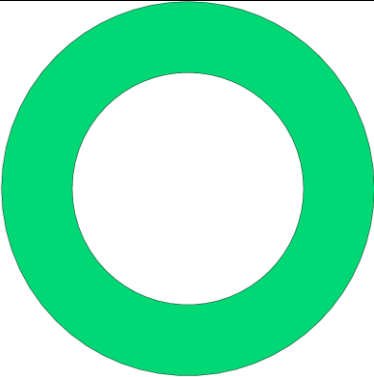
Продолжение таблицы Е.1

Коэффициент бокового давления	Наименование параметра	Значения	Изохромы		
			Угол наклона главных напряжений 0 град	Угол наклона главных напряжений 50 град	Угол наклона главных напряжений 90 град
3	Радиальные смещения стенок измерительной скважины, м	U, U1 (UNDEF:CSYS-1) +7.317e-05 +6.509e-05 +5.701e-05 +4.893e-05 +4.085e-05 +3.277e-05 +2.469e-05 +1.661e-05 +8.526e-06 +4.459e-07 -7.635e-06 -1.572e-05 -2.380e-05			
	Деформации горного массива	E, E11 (UNDEF:CSYS-1) (Avg: 75%) +6.635e-04 +5.999e-04 +5.364e-04 +4.728e-04 +4.092e-04 +3.457e-04 +2.821e-04 +2.185e-04 +1.549e-04 +9.136e-05 +2.779e-05 -3.578e-05 -9.935e-05			

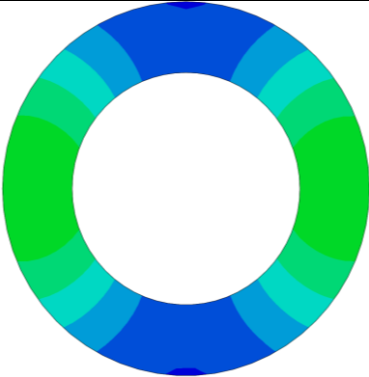
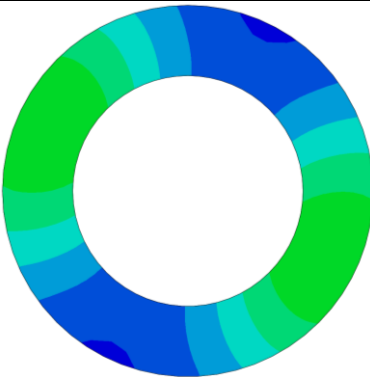
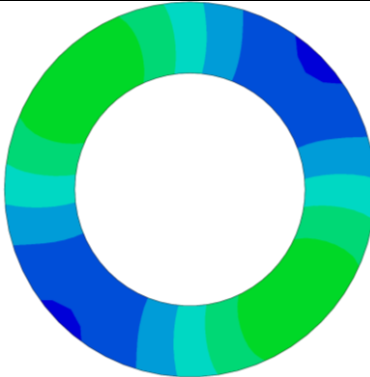
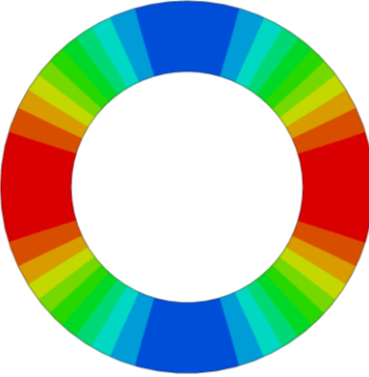
Продолжение таблицы Е.1

Коэффициент бокового давления	Наименование параметра	Значения	Изохромы		
			Угол наклона главных напряжений 0 град	Угол наклона главных напряжений 50 град	Угол наклона главных напряжений 90 град
Схема б					
0,5	Радиальные смещения стенок измерительной скважины, м	U, U1 (UNDEF:CSYS-1) +3.487e-05 +3.157e-05 +2.828e-05 +2.498e-05 +2.169e-05 +1.839e-05 +1.510e-05 +1.181e-05 +8.511e-06 +5.217e-06 +1.922e-06 -1.372e-06 -4.666e-06			
	Деформации горного массива	E, E11 (UNDEF:CSYS-1) (Avg: 75%) +1.591e-04 +1.458e-04 +1.325e-04 +1.193e-04 +1.060e-04 +9.275e-05 +7.948e-05 +6.621e-05 +5.294e-05 +3.968e-05 +2.641e-05 +1.314e-05 -1.246e-07			

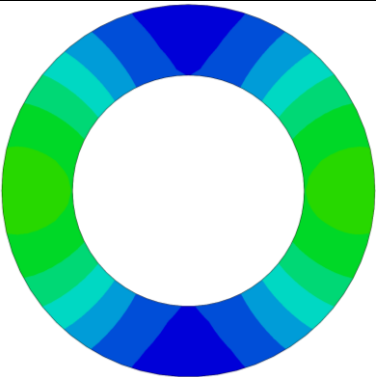
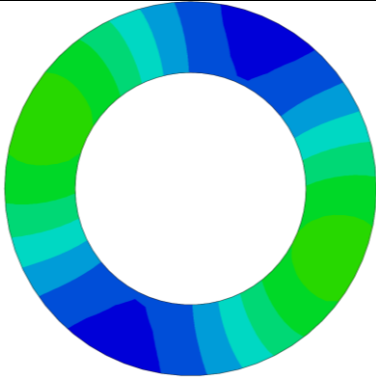
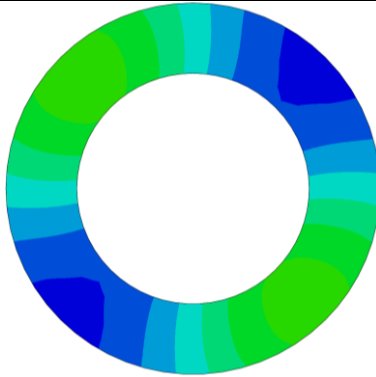
Продолжение таблицы Е.1

Коэффициент бокового давления	Наименование параметра	Значения	Изохроны		
			Угол наклона главных напряжений 0 град	Угол наклона главных напряжений 50 град	Угол наклона главных напряжений 90 град
1	Радиальные смещения стенок измерительной скважины, м	U, U1 (UNDEF:CSYS-1) +2.844e-05 +2.582e-05 +2.321e-05 +2.059e-05 +1.797e-05 +1.535e-05 +1.273e-05 +1.011e-05 +7.493e-06 +4.874e-06 +2.255e-06 -3.637e-07 -2.982e-06			
	Деформации горного массива	E, E11 (UNDEF:CSYS-1) (Avg: 75%) +1.173e-04 +1.095e-04 +1.017e-04 +9.387e-05 +8.606e-05 +7.826e-05 +7.045e-05 +6.264e-05 +5.483e-05 +4.702e-05 +3.921e-05 +3.141e-05 +2.360e-05			

Продолжение таблицы Е.1

Коэффициент бокового давления	Наименование параметра	Значения	Изохроны		
			Угол наклона главных напряжений 0 град	Угол наклона главных напряжений 50 град	Угол наклона главных напряжений 90 град
2	Радиальные смещения стенок измерительной скважины, м	U, U1 (UNDEF:CSYS-1) +6.939e-05 +6.280e-05 +5.621e-05 +4.962e-05 +4.303e-05 +3.644e-05 +2.985e-05 +2.326e-05 +1.667e-05 +1.008e-05 +3.485e-06 -3.105e-06 -9.695e-06			
	Деформации горного массива	E, E11 (UNDEF:CSYS-1) (Avg: 75%) +3.176e-04 +2.911e-04 +2.647e-04 +2.382e-04 +2.118e-04 +1.853e-04 +1.589e-04 +1.324e-04 +1.060e-04 +7.956e-05 +5.311e-05 +2.667e-05 +2.265e-07			

Продолжение таблицы Е.1

Коэффициент бокового давления	Наименование параметра	Значения	Изохромы		
			Угол наклона главных напряжений 0 град	Угол наклона главных напряжений 50 град	Угол наклона главных напряжений 90 град
3	Радиальные смещения стенок измерительной скважины, м	U, U1 (UNDEF:CSYS-1) +1.105e-04 +9.959e-05 +8.868e-05 +7.777e-05 +6.686e-05 +5.596e-05 +4.505e-05 +3.414e-05 +2.323e-05 +1.233e-05 +1.418e-06 -9.490e-06 -2.040e-05			
	Деформации горного массива	E, E11 (UNDEF:CSYS-1) (Avg: 75%) +5.194e-04 +4.710e-04 +4.226e-04 +3.741e-04 +3.257e-04 +2.773e-04 +2.288e-04 +1.804e-04 +1.320e-04 +8.354e-05 +3.511e-05 -1.332e-05 -6.176e-05	