

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*

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

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Беляков Никита Андреевич

Официальные оппоненты:

Саммалъ Андрей Сергеевич

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет», кафедра механики материалов и геотехнологий, профессор;

Корчак Павел Анатольевич

кандидат технических наук, Кировский филиал акционерного общества «Апатит», отдел развития горно-геологических информационных систем, начальник отдела.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение науки федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук», г. Апатиты.

Защита диссертации состоится **22 сентября 2025 г. в 15:00** на заседании диссертационного совета ГУ.7 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1163.**

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

Автореферат разослан 22 июля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



АФАНАСЬЕВ
Павел Игоревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. Протодьяконов, В.С. Haimson, F.V. 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. Протодьяконовым, 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 керна 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 программы 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-Ги-прошахт», что подтверждается актом внедрения от 23.09.2024.

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 смещений 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, 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 статьи - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована актуальность, основная цель и идея, научная новизна и практическая значимость работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлена подробная характеристика горного массива апатит-нефелиновых руд месторождений Хибин; проведена оценка мирового опыта в определении естественного напряженного состояния горного массива; обоснован выбор метода оценки естественного напряженного состояния горного массива.

Во второй главе разработана методика определения естественного напряженного состояния горного массива апатит-нефелиновых руд месторождений Хибин, включающая проведение натурных и лабораторных испытаний, многовариантного численного моделирования и аналитического расчета; разработаны численные модели в пространственной постановке; получены зависимости радиальных смещений стенок измерительной скважины и деформаций исследуемого горного массива; представлена методика аналитического решения задачи определения главных напряжений и их ориентаций.

Третья глава посвящена учету трещиноватости горного массива при определении его естественного напряженного состояния; определены прочностные и деформационные свойства контактного взаимодействия, отражающего поведение трещиноватости, сопоставимой по размерам с измерительной скважиной.

В четвертой главе установлено влияние изменения температуры горных пород, возникающего при ведении буровых

работ, на радиальные смещения стенок измерительной скважины, которое описывается полиномиальным законом.

В заключении сформулированы основные научные и практические выводы по работе.

Основные результаты исследования изложены в следующих **защищаемых положениях**:

1. Прогноз естественного напряженного состояния горного массива должен быть основан на методе кольцевой разгрузки и измеренных с применением трехкомпонентного датчика радиальных смещений контура скважины, обработка которых должна выполняться с применением закономерностей между смещениями, деформациями и напряжениями, установленными в результате многовариантного численного моделирования в пространственной постановке.

В диссертационной работе естественное напряженное состояние рассматривалось на примере горного массива апатит-нефелиновых руд месторождений Хибин. Известно, что на этих месторождениях существует гравитационно-тектоническое поле естественных напряжений, характерной особенностью которого является преобладание величин горизонтальных компонент напряжений над вертикальными.

Предложенный в работе метод определения естественного напряженного состояния горного массива основан на кольцевой разгрузке с применением трехкомпонентного датчика смещений и включает в себя следующие этапы: натурные испытания, целью которых является измерение смещений стенок измерительной скважины, формируемых в результате разгрузки кольцевой щелью, и отбор кернового материала; лабораторные испытания кернового материала для определения деформационно-прочностных свойств; многовариантное 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. Схема метода представлена на рисунке 1.

Метод кольцевой разгрузки – одна из вариаций метода полной разгрузки, позволяющего исследовать параметры упругого восстановления элемента горного массива при искусственном нарушении его связи с окружающим массивом. Трехкомпонентный датчик (рисунок 2) – 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 измерительной скважине), в которой проводятся измерения.

Обработка результатов натурных и лабораторных испытаний выполняется на основе многовариантного численного моделирования. На рисунке 3 представлена расчетная схема примерной численной модели, которая предусматривает: формирование естественного напряжённого состояния во вмещающем массиве; создание горной выработки, измерительной скважины и кольцевой разгрузочной щели. Естественное напряженное состояние вмещающего горного массива формируется путем задания главных компонент тензора напряжений (T_σ). При моделировании изменяются коэффициент бокового давления ($\lambda_1=0,5$; $\lambda_2=1$; $\lambda_3=2$; $\lambda_4=3$) и угол поворота главных напряжений ($\theta_1=0^\circ$; ... $\theta_{10}=90^\circ$, 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. Результатом численного моделирования являются закономерности, представленные на рисунках 4 и 5. При увеличении коэффициента бокового давления и угла поворота главных напряжений значения радиальных смещений стенок измерительной скважины, линейных и угловых деформаций горного массива также увеличиваются. Закономерности смещений и деформаций устанавливаются в

рамках модели линейно-деформируемого тела, так как в основе метода кольцевой разгрузки лежит процесс упругого восстановления после обуривания разгрузочной щелью. Следовательно, компоненты напряжений определяются на основании полученных компонент деформаций по закону Гука. Далее решается характеристическое (кубическое) уравнение напряженного состояния, корнями которого являются главные напряжения, и определяется их пространственная ориентация (рисунок 6).

При выполнении замеров радиальных смещений стенок измерительной скважины в зоне влияния горной выработки было выявлено их увеличение относительно радиальных смещений стенок измерительной скважины за пределом влияния горной выработки, что влечет за собой изменение величины и ориентации главных напряжений. На рисунке 7 представлены закономерности изменения радиальных смещений стенок измерительной скважины и линейных деформаций горного массива по длине измерительной скважины. Закон распространения аналогичен для всех измерительных направлений и углов поворота главных напряжений. Установлено, что зона влияния горной выработки составляет 2,65 м при пролете 5,3 м (типовое сечение в условиях рудников КФ АО «Апатит») и за ее пределами изменение радиальных смещений стенок измерительной скважины и линейных деформаций горного массива не превышает 5%. При иных размерах горной выработки зона ее влияния равна половине пролета. Натурные испытания следует выполнять за пределом этой зоны.

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.

Горный массив апатит-нефелиновых месторождений Хибин имеет неоднородное строение, что необходимо учитывать при определении его естественного напряженного состояния. В рамках разработанного метода 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.

Микроструктурную трещиноватость следует учитывать посредством использования коэффициентов структурной нарушенности на деформационные и прочностные свойства горного массива.

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). Расчетная схема разработанных моделей представлена на рисунке 8.

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.

Результатом исследования первого подхода являются закономерности изменения относительных радиальных смещений, представленные на рисунке 9. Полученные закономерности демонстрируют, что трещина, эффективные упругие характеристики которой ниже упругих характеристик исследуемого массива, разгружается в большей степени, что не соответствует деформированию горного массива при проведении натурных испытаний.

Второй подход основан на представлении нарушенности в явной форме контактного взаимодействия между структурными блоками, описанного деформационными и прочностными свойствами, 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 деформационно-прочностных 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 деформационно-прочностных свойств контактного взаимодействия в ненарушенной горной породе;

3. Определение минимально необходимых свойств контактного взаимодействия, отражающих отсутствие откалывания керна при обурировании, 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.

В таблице 1 представлены результаты лабораторных испытаний и численного моделирования ненарушенной горной породы.

Таблица 1 – Результаты проведенных лабораторных испытаний и численного моделирования ненарушенной горной породы

Лабораторные испытания				
Угол наклона разъемной матрицы, град			σ_θ , МПа	τ_θ , МПа
25			20,07	43,04
35			55,12	78,71
45			142,67	142,67
Численное моделирование				
k_{fr}	$k_{nn}, \frac{\text{МПа}}{\text{мм}}$	$k_{ss} = k_{tt}, \frac{\text{МПа}}{\text{мм}}$	m_{nn} , МПа	$m_{ss} = m_{tt}$, МПа
0,95	9,5	9,35	1857	38

На рисунке 10 представлены закономерности изменения касательных напряжений (сплошная линия) и величин смещений сдвига

по контакту (штриховая линия) для рассматриваемых вариантов пространственной ориентации трещины. Оба параметра увеличиваются в процессе обуривания измерительной скважины, не достигая максимального значения. Это указывает на необходимость снижения деформационно-прочностных свойств контактного взаимодействия для принятых горно-геологических условий и учета вращательного воздействия бурового оборудования.

Было установлено, что разрушение контактного взаимодействия может происходить 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 рисунке 11. 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. Аналогичные закономерности были получены для различных пространственных ориентаций трещины, их обобщение представлено в таблице 2.

Таблица 2 – Деформационно-прочностные свойства контактного взаимодействия при различной пространственной ориентации трещины

Угол наклона трещины – -45°					
k_{fr}	$k_{nn}, \frac{МПа}{мм}$	$k_{ss} = k_{tt}, \frac{МПа}{мм}$	$m_{nn}, МПа$	$m_{ss} = m_{tt}, МПа$	$S_{st}^*, МПа$
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.

Деформационно-прочностные свойства контактного взаимодействия, представленные в таблице 2, являются минимально необходимыми для отсутствия откалывания керна в результате вращательного воздействия принятого бурового оборудования. При иных параметрах бурового оборудования определение минимально необходимых свойств контактного взаимодействия следует выполнять заново по описанной методике.

На рисунке 12 представлены закономерности изменения прочностных параметров контактного взаимодействия при различной ориентации трещины. Установлено, что при изменении угла наклона трещины от -45° до 45° , прочностные свойства контактного взаимодействия монотонно снижаются по закону, близкому к линейному.

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:

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

Буровые работы сопровождаются изменением температуры исследуемой части горного массива. При выполнении натурных испытаний следует измерять температуру на всем протяжении процесса обуривания и последующего измерения с применением трехкомпонентного датчика смещений. С целью учета данного фактора и повышения достоверности определения естественного напряженного состояния горного массива необходимо учитывать влияние термомеханических параметров на изменение диаметра измерительной скважины.

В результате выполненных исследований установлено влияние температуры на изменение диаметра измерительной скважины в микрометрах при выполнении работ по ее обуриванию, которое описывается зависимостью (2):

$$z^* = z \cdot K_1 \cdot K_2, \quad (2)$$

где z – опорная величина изменения диаметра измерительной скважины в мкм для температурного коэффициента линейного расширения $\alpha_T = 2 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и температуры, возникающей в момент обурирования измерительной скважины $T_{об} = 60^\circ\text{C}$, K_1 – коэффициент, отражающий изменение температурного коэффициента линейного расширения; K_2 – коэффициент, отражающий изменение температуры, возникающей в момент обурирования измерительной скважины.

Опорная величина изменения диаметра измерительной скважины z определена на основании многовариантного численного моделирования (поверхности, представленные на рисунке 13) и описывается полиномиальной зависимостью (3):

$$z = z_0 + a \cdot \lambda_T - b \cdot C - c \cdot \lambda_T^2 + d \cdot C^2, \quad (3)$$

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, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$.

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

Коэффициенты K_1 и K_2 определяются соотношениями (4-5):

$$K_1 = \frac{z}{3 \cdot 10^6 \cdot a_1 + b_1}, \quad (4)$$

$$K_2 = \frac{z}{0,1505 \cdot a_2 + b_2}. \quad (5)$$

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

Коэффициент корреляции результатов многовариантного численного моделирования и значений, рассчитанных по полиномиальной зависимости (3), составляет 0,997 (рисунок 14), что говорит о высокой достоверности аппроксимации.

Полученные коэффициенты для представленных зависимостей сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Коэффициенты, характеризующие полученные зависимости

№	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 обурировании измерительной скважины вызывает увеличение ее диаметра на 13-29% относительно варианта, где изменение температуры не учитывалось, что приводит к завышению определяемых главных напряжений.

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 моделирование 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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. 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. – Вып. № 2. – С.192-207. DOI:10.46689/2218-5194-2022-2-1-192-207.

2. 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.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. 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.

4. 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.

Свидетельство на объект интеллектуальной собственности:

5. 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.



Рисунок 1 – Схема метода оценки напряженного состояния горного массива. Этапы выполнения: 1 – натурные испытания; 2 – лабораторные испытания; 3 – численное моделирование; 4 – аналитический расчет

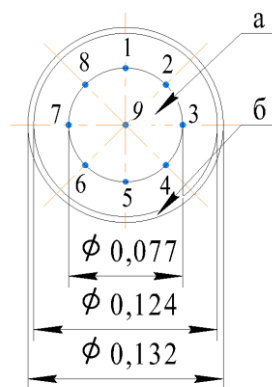


Рисунок 2 – Трехкомпонентный датчик в скважине (1-9 - измерительные направления): а – измерительная скважина; б – кольцевая разгрузочная щель

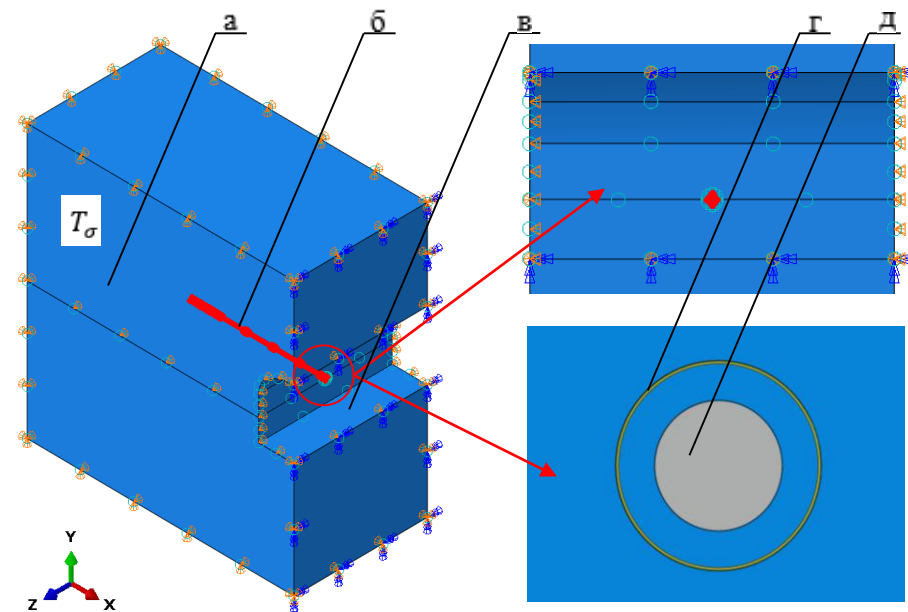


Рисунок 3 – Расчетная схема разработанных численных моделей: а – горный массив; б – измерительная скважина; в – горная выработка; г – кольцевая разгрузочная щель; д – измерительная скважина

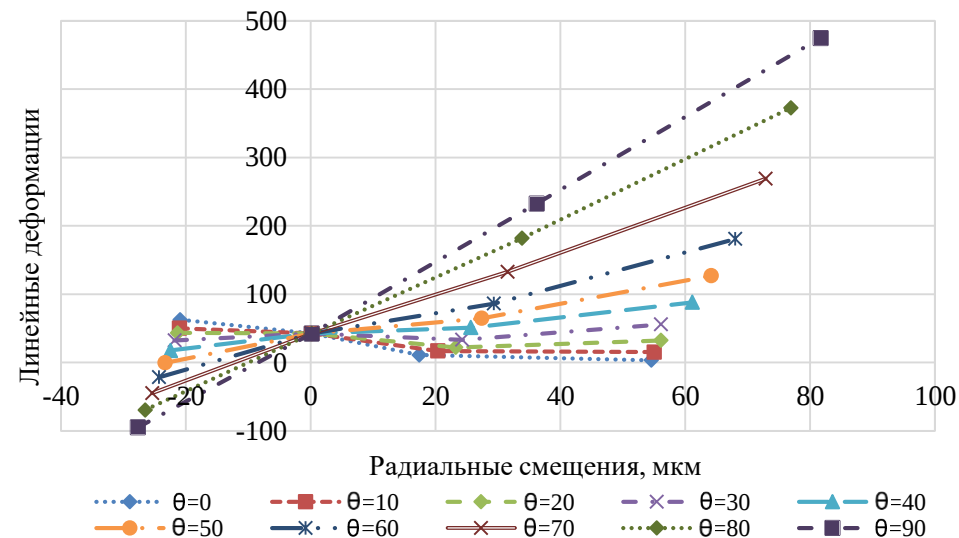


Рисунок 4 – Закономерности изменения радиальных смещений стенок измерительной скважины и линейных деформаций горного массива: θ – угол поворота главных напряжений, град

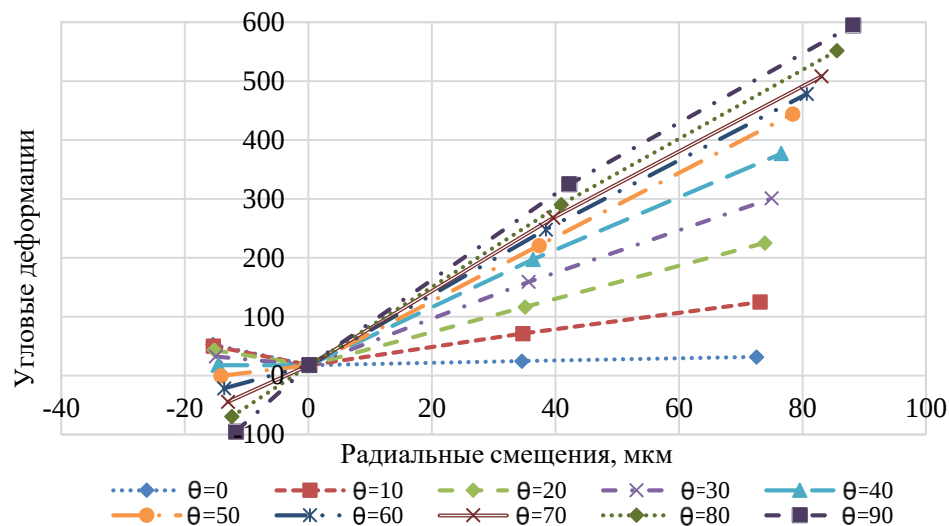


Рисунок 5 – Закономерности изменения радиальных смещений стенок измерительной скважины и угловых деформаций горного массива: θ – угол поворота главных напряжений, град

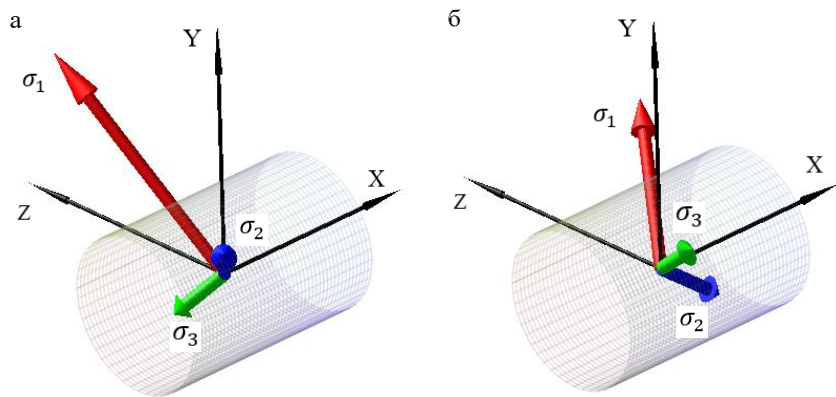


Рисунок 6 – Ориентация главных напряжений: а – измерения в зоне влияния выработки; б – измерения вне зоны влияния выработки

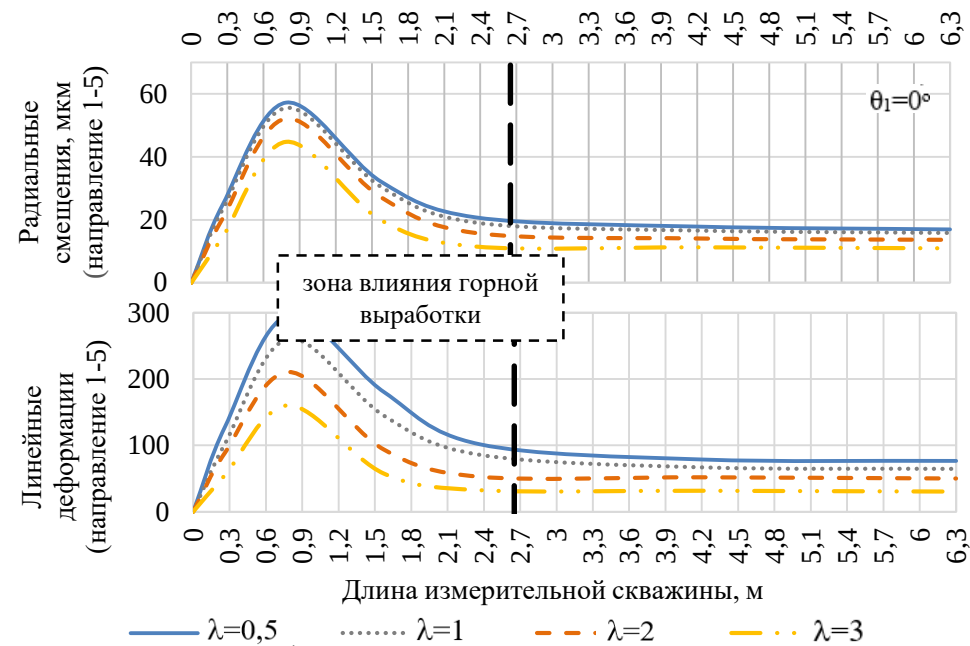


Рисунок 7 – Закономерности изменения радиальных смещений стенок измерительной скважины и линейных деформаций горного массива: λ – коэффициент бокового давления; θ – угол поворота главных напряжений, град

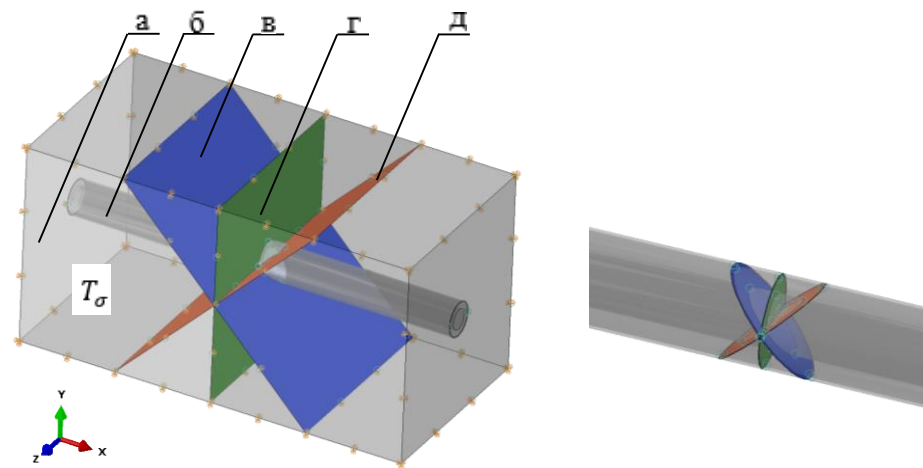


Рисунок 8 – Расчетная схема разработанных численных моделей: а – горный массив; б – измерительная скважина; в – трещина (угол наклона 45°); г – трещина (угол наклона 0°); д – трещина (угол наклона -45°);

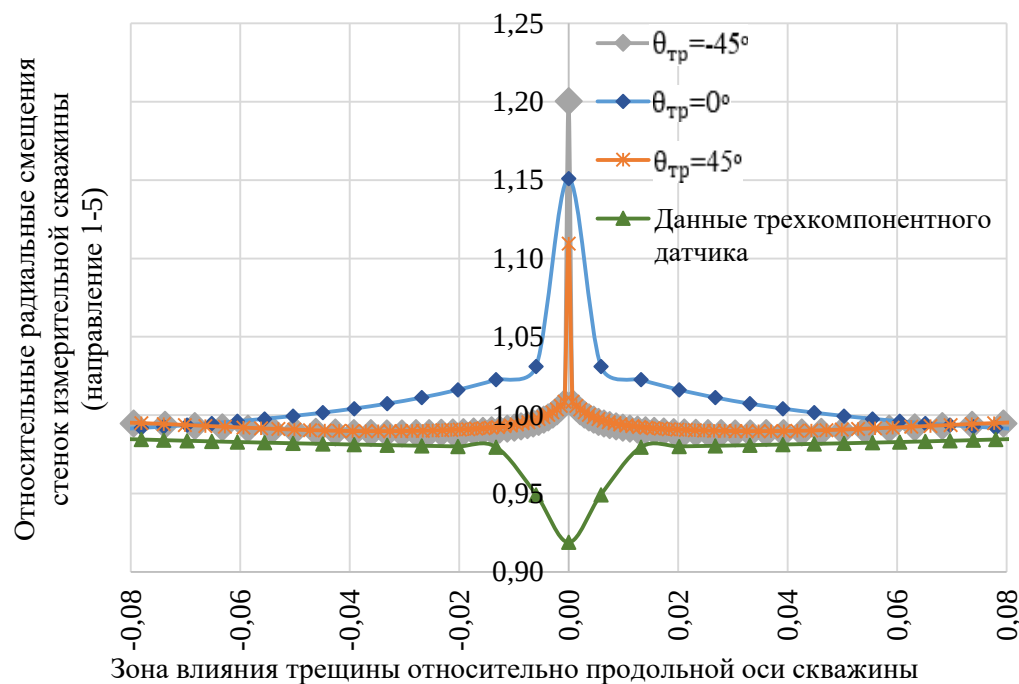


Рисунок 9 – Закономерности изменения относительных радиальных смещений стенок измерительной скважины (направление 1-5): $\theta_{тр}$ – угол наклона трещины

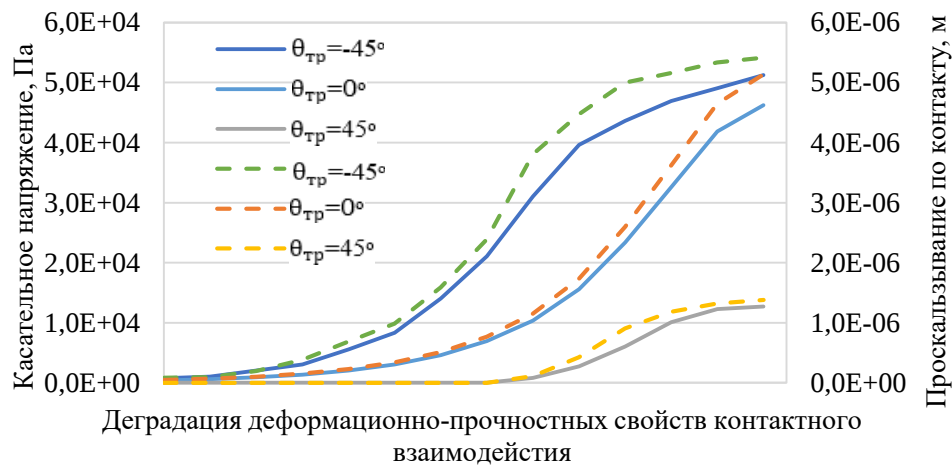


Рисунок 10 – Закономерности изменения касательных напряжений и величины проскальзывания по контакту в ненарушенной горной породе: $\theta_{тр}$ – угол наклона трещины

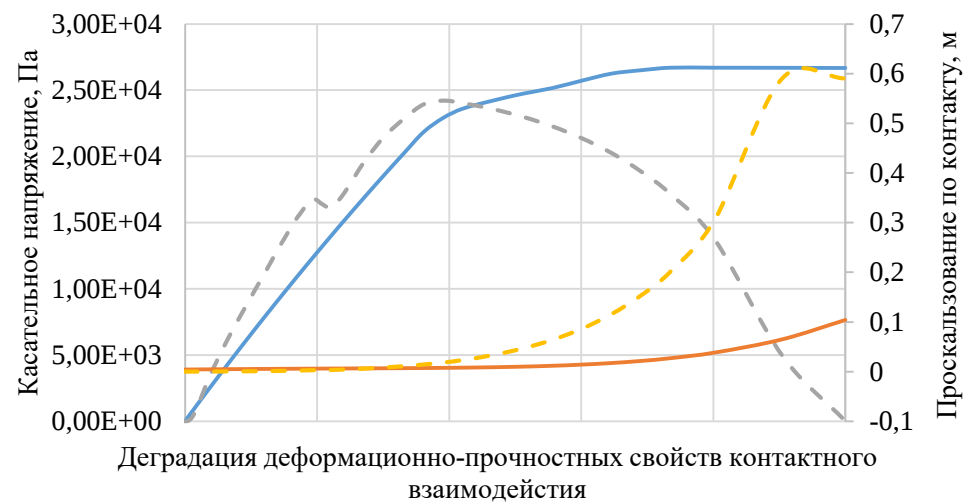


Рисунок 11 – Закономерности изменения касательных напряжений и величины проскальзывания по контакту (угол наклона трещины 0), учитывающий предельное значение напряжения сдвига

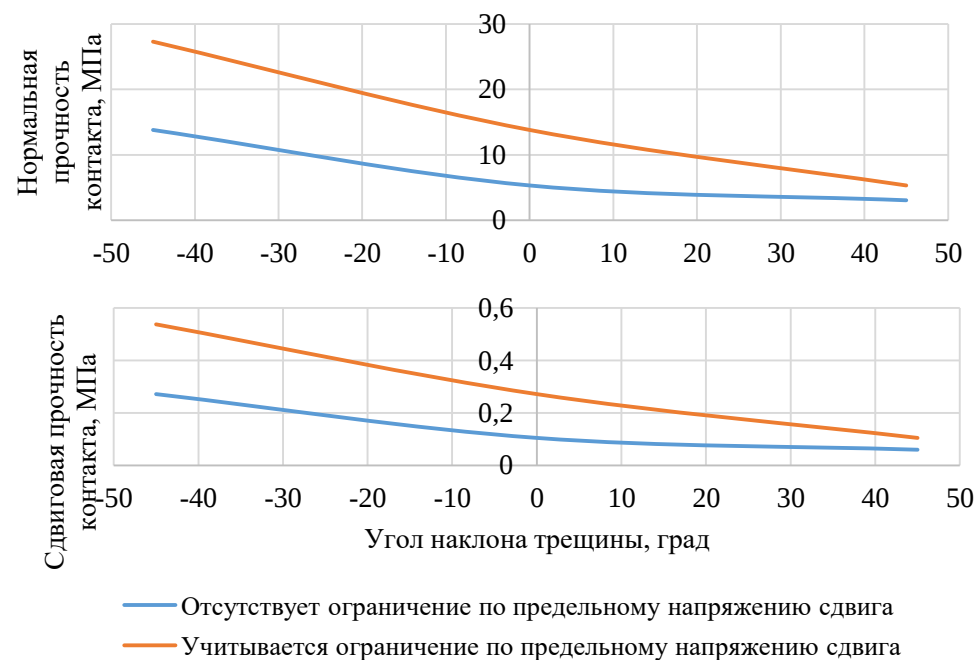


Рисунок 12 – Закономерности изменения нормальной и сдвиговых прочностей контактного взаимодействия

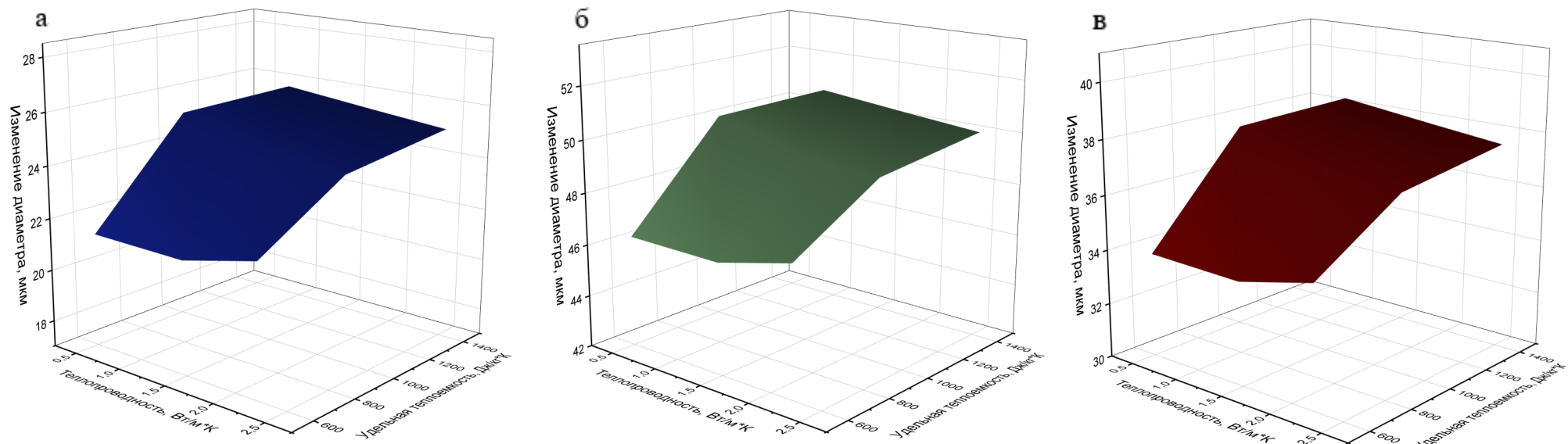


Рисунок 13 – Поверхности, отражающие изменение диаметра измерительной скважины, при различных температурных параметрах: а – направление 1-5; б – направление 3-7; в – направления 2-6 и 4-8

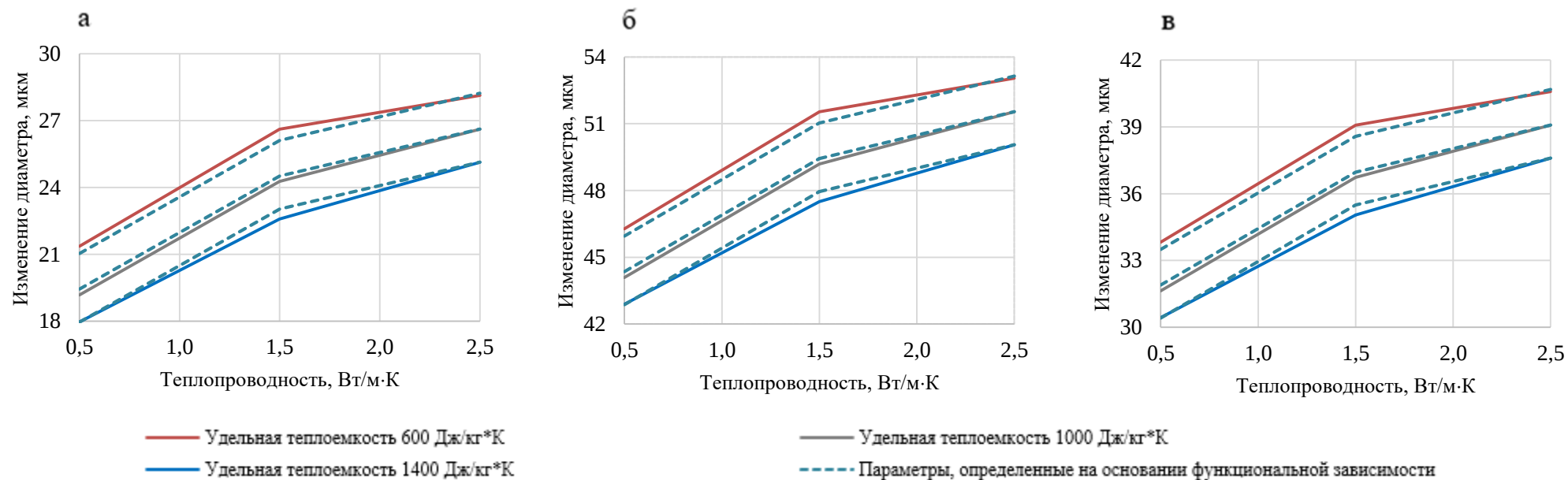


Рисунок 14 – Закономерности, отражающие расхождение предложенной полигональной закономерности с результатами многовариантного численного моделирования: а – направление 1-5; б – направление 3-7; в – направления 2-6 и 4-8