

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования

«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Акматов Дастан Женишбекович

**ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ПОРОДНОГО МАССИВА НА ОСНОВЕ
РАЗРАБОТКИ ТРЕХМЕРНОЙ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРИ
ЗАХОРОНЕНИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ**

Специальность 2.8.6

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

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Тухель Екатерина Андреевна

Москва, 2024

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. За период интенсивного развития атомной промышленности на территории России было накоплено огромное количество радиоактивных отходов (РАО) объемом свыше 510 млн. м³. Наиболее токсичными и опасными для окружающей среды являются тепловыделяющие высокоактивные радиоактивные отходы¹. Необходимость их удаления из среды обитания человека отражает важнейшую общественную потребность населения страны и при существующем научно-техническом уровне может быть выполнено единственным осуществимым способом – захоронением в глубокие геологические формации.

В настоящее время в различных странах разрабатываются проекты подземной изоляции РАО в различных породах: *солях* (Германия, США), *гранитах* (Швеция, Финляндия, Швейцария, Канада, Россия), *глинах* (Франция, Швейцария, Бельгия), *туфах* (США) и др. Международный опыт выбора площадок для захоронения РАО основан на поиске в относительно стабильных геологических районах наименее нарушенного структурного тектонического блока при его максимально возможных размерах. Наибольшую угрозу представляет вероятность тектонической деструкции блока, находящегося в поле нелинейно изменяющихся тектонических сил. При этом существует потенциальная риск активизации существующих разломов с проникновением подземных вод к контейнерам с РАО и последующим выносом радионуклидов в окружающую среду.

В 2011 году был принят ключевой для атомной отрасли Федеральный закон «Об обращении с РАО и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» №190-ФЗ, который предусматривает захоронение накопленных и вновь-производимых высокоактивных РАО. Практические шаги по реализации закона изложены в «Стратегии создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов 2018г.», «Исследований в обосновании безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов 2017г.», а также в решениях НТС №10 «Экология и радиационная безопасность» ГК «Росатом» от 10.10.2018 г.

Согласно требованиям, международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), начальным этапом процесса захоронения РАО является строительство подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ), предназначенной для уточнения характеристик вмещающей геологической среды. При проектировании ПИЛ проводится обоснование оптимального комплекса методов исследований, схемы расположения экспериментальных камер, методик геомеханических наблюдений и т.д. Основой для этого служат модели

¹ К высокоактивным отходам относятся РАО, в которых удельная активность бета-, гамма излучающих нуклиды более 10⁷ кБк/кг, а трансурановых радионуклидов более 10⁵ Бк/г

напряженно-деформированного состояния (НДС) пород, позволяющие выявить высокоградиентные локальные зоны концентрации напряжений, которые инициируют процесс разрушения массива. Использование трехмерной модели позволяет повысить достоверность расчетов НДС за счет задания граничных условий, максимально адекватно отражающих реальные условия. Трёхмерная модель в дальнейшем может стать основой для единой информационной среды, которая охарактеризует породный массив и обеспечит удобный доступ к геопространственным данным и их обновлению по мере получения новых знаний, а также поможет автоматизировать процесс проектирования геомеханических исследований в ПИЛ.

В связи с этим разработка трехмерной геомеханической модели НДС участка «Енисейский» является актуальной научной задачей, решение которой позволит повысить достоверность оценки устойчивости породного массива и качество предполагаемых геомеханических экспериментов для прогноза сохранности пород в ПИЛ.

Цель работы. Оценка и прогноз развития геомеханических процессов в приконтурной части исследуемого массива скальных пород подземной исследовательской лаборатории на участке «Енисейский» Нижне-Канского массива.

Идея работы заключается в использовании трехмерной геомеханической модели для повышения достоверности оценки опасных геомеханических процессов путем пространственного учета влияния разрывных нарушений на напряженно-деформированное состояние и устойчивость приконтурной зоны породного массива, вмещающего горные выработки пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ опыта разработки структурно-геологических и геомеханических моделей напряженно-деформированного состояния породных массивов.
2. Провести сбор данных, характеризующих свойства, строение, поле деформаций, исходных тектонических напряжений и других характеристик геологической среды на участке «Енисейский» Нижне-Канского массива.
3. Построить структурно-тектоническую, расчетную и геомеханическую модели участка «Енисейский».
4. Задать граничные условия и выполнить многовариантное моделирование напряженно-деформированного состояния породного массива в пределах участка.
5. Провести системный анализ полученных результатов с учетом разработанной рейтинговой классификации качества породного массива.

6. Выделить потенциально неустойчивые зоны породного массива и выполнить прогноз развития возможных негативных геомеханических процессов с учетом горно-геологических особенностей участка.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная рейтинговая классификация горных пород на основе модифицированной системы Q-индекса Бартона позволяет наиболее полно учитывать изоляционные свойства массива и дает возможность ранжировать породный массив по степени устойчивости, а также принимать обоснованные инженерные решения при строительстве подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ).

2. Повышение обоснованности оценки напряженно-деформированного состояния породного массива и выявление потенциально опасных зон, способных инициировать процесс разрушения естественных и искусственных барьеров ПИЛ, достигается за счет построения трехмерной геомеханической модели участка «Енисейский» Нижне-Канского массива, основанной на многовариантном моделировании.

3. По результатам анализа геомеханической модели массива установлено наличие локальных потенциально неустойчивых участков, коррелирующих с зонами динамического влияния Верхнешумихинского, Меркурьевского и Безымянного тектонических разломов.

Научная новизна работы:

1. Впервые создана трёхмерная структурно-тектоническая модель участка «Енисейский» Нижне-Канского массива, включающая структурные нарушения и их зоны динамического влияния, геолого-литологическое строение и упруго-прочностные свойства пород.

2. Модернизирована система Q рейтинговой классификации горных пород, которая учитывает комплексную оценку устойчивости пород, вмещающих выработки ПИЛ, а также его уникальные особенности.

3. Разработана блочная трехмерная геомеханическая модель участка «Енисейский», включающая структурную модель, рейтинговую модель оценки качества пород и многовариантную модель напряженно-деформированного состояния.

4. Получены новые закономерности, определяющие связь между напряженным состоянием массива горных пород, структурной нарушенностью и потенциальной опасностью разрушения пород при строительстве ПИЛ на основе энергетического подхода.

5. Выполнено трехмерное геодинамическое районирование породного массива на участке «Енисейский», в результате чего выявлены зоны потенциальной неустойчивости

пород в зонах динамического влияния тектонических разломов Верхнешумихинского, Меркурьевского и Безымянного и их сопряжений.

Обоснованность и достоверность исследования подтверждаются результатами анализа имеющихся литературных источников по исследованию взаимодействия региональных, местных, локальных тектонических структур с происходящими геомеханическими процессами; корректным использованием сертифицированного программного обеспечения для моделирования; совпадением полученных зон концентрации напряжений с результатами геодезических наблюдений и моделями, разработанными другими авторами.

Методы исследований включают в себя литературный анализ и обобщение научно-технической информации, сбор и систематизацию данных о геологическом строении и тектонике района, геометрическое моделирование, методы определения граничных условий, математическое описание механического поведения породного массива, численное моделирование геомеханических процессов в приконтурной части подземной исследовательской лаборатории.

Практическая значимость результатов работы состоит в оценке устойчивости породного массива на основе впервые разработанной трехмерной геомеханической модели участка «Енисейский» для обоснования долговременной безопасности пункта подземной изоляции высокоактивных радиоактивных отходов (РАО).

Реализация выводов и результатов работы. Разработана трехмерная геомеханическая модель для оценки устойчивости Нижне-Канского породного массива участка «Енисейский» и принята к использованию в рамках научно-исследовательских и производственных работ лаборатории геодинамики Геофизического центра РАН.

Апробация работы. Содержание диссертационного исследования, полученные результаты и основные научные положения докладывались на всероссийских и международных научных конференциях, симпозиумах, форумах и семинарах: Международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (г. Москва, 2019, 2020, 2021, 2022 гг.); V Техническом совете по геомеханике в рамках Международного симпозиума «Неделя горняка-2023»; Международном Форум-конкурсе студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2021, 2023 гг.). Научной конференции молодых ученых и аспирантов Института Физики Земли РАН (Москва, 2023 гг.)

Личный вклад автора. Лично автором были выполнены сбор и систематизация данных о геологии и тектонике участка «Енисейский», построена структурно-тектоническая модель участка, разработана методика моделирования НДС, заданы

граничные условия каркасной модели, проведены многовариантные расчеты НДС, выполнен анализ пространственного распределения напряжений, разработана система рейтинговой классификации вмещающего ПИЛ породного массива, выполнена прогнозная оценка его длительной устойчивости.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 статей, из которых 3 - в научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 5 – в изданиях, индексируемых наукометрической базой Scopus.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 130 наименований и одного приложения. Работа изложена на 151 страницах текста и содержит 42 иллюстрации и 18 таблиц.

Благодарности.

Автор выражает благодарность научному руководителю Тухель Екатерине Андреевне за помощь в ходе работы над диссертацией. Особую благодарность автор выражает академику А. Д. Гвишиани, а также всем коллегам из Геофизического центра РАН: чл.-корр. РАН В.Н. Татаринovu, А.И. Маневичу и др. Автор признателен всем сотрудникам кафедры «Геология и маркшейдерское дело» Горного института НИТУ «МИСиС» за постоянное внимание и ценные советы по теме исследования.

Работа выполнена в рамках темы Государственного задания ГЦ РАН №: 122080300206-4, утвержденного Минобрнауки России, а также по проекту РНФ № 18-17-00241.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлены общие сведения о проблеме изоляции высокоактивных радиоактивных отходов (РАО) в геологических формациях. Выполнен литературный анализ опыта международного строительства подземных исследовательских лабораторий (ПИЛ). Также рассмотрены современные методы трехмерного моделирования массива на основе механики дискретной среды. Согласно изученной информации сформулированы цели и задачи диссертационного исследования.

В настоящее время в России и в нескольких десятках стран мира ведутся исследования по созданию пунктов глубинного захоронения (ПГЗРО), долгоживущих РАО в геологических формациях. Обоснование геоэкологической безопасности захоронения РАО — сложная междисциплинарная задача, которая решается последовательным выполнением ряда процедур, нацеленных на изучение, анализ и прогноз событий и процессов, определяющих сохранность изоляционных свойств пород на весь период радиобиологической опасности РАО, который превышает 10 тыс. лет. Их перечень изложен

в отечественных и международных нормативных документах. Для этого должно быть сформировано обоснование долговременной безопасности (Safety Case) как «интеграция аргументов и доказательств, которые описывают, количественно выражают и обосновывают безопасность пункта геологического захоронения».

Влияние природных и техногенных процессов увеличивается с течением времени и полностью не может быть устранено. Однако можно уменьшить их негативное воздействие за счет превентивных конструкторских решений при проектировании подземной части ПИЛ на основе проведенных научных исследований. Подобным исследованиям посвящены работы А.Д. Гвишиани, О.Л. Кедровского, Н.П. Лаверова, Н.Н. Мельникова, В.С. Юдинцева, Е.Б. Андерсона, В.А. Петрова, Б.Т. Кочкина, В.Н. Морозова, В.Н. Татарина, В.С. Гупало, N. Barton, Andersson, M.S. Chen, и др.

Для получения количественных оценок безопасности активно применяется компьютерное моделирование. Анализ опыта моделирования показал, что необходимым условием эффективного решения задачи является обеспечение максимальной достоверности оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) породного массива, которая может быть достигнута путем: а) учета влияния структурных элементов породного массива; б) использования трехмерных геомеханических моделей.

Во второй главе рассмотрены основы теории прочности, уделено внимание зонам влияния разломов. Представлена модернизированная классификация для оценки устойчивости геологической среды при захоронении радиоактивных отходов. Кроме того, предложена методика анализа напряженно-деформированного состояния массива, базирующаяся на энергетическом подходе.

При проектировании подземных выработок ПИЛ должны учитываться основные параметры массива, которые определяют его устойчивость. В мировой горной практике для более универсального подхода к характеристикам устойчивости получили развитие классификации на основе эмпирических данных с учетом строения массива и его физико-механических свойств. Поэтому на начальной стадии строительства ПИЛ, когда данных о прочностных свойствах пород недостаточно, для предварительной оценки устойчивости горных выработок используется модернизированная рейтинговая классификация на основе Q-индекса по Н. Бартону, но адаптированная под особенности подземной изоляции РАО. В контексте захоронения РАО процедура классификации состоит из двух этапов. На первом этапе делается акцент на исключение определенных разломов и их воздействия в пределах потенциальной площадки, а также на минимизацию других типов разрывных нарушений. На втором производится оценка пригодности выбранных потенциальных площадок для

целей безопасного захоронения РАО. Оценочный индекс пригодности вмещающих пород для захоронения РАО включает в себя факторы теплового воздействия, химического состава подземных вод и водопроницаемость вмещаемого массива.

Модернизированный индекс Q^R определяется формулой:

$$Q^R = C_{chm}^R \times C_T^R \times \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w^R}{SRF^R} \quad (1)$$

где C_{chm}^R – индекс химического состава подземных вод; C_T^R – тепловой эффект; Q' – индекс качества породного массива; RQD – индекс качества горных пород; J_n – показатель количества систем трещин; J_r – показатель шероховатости поверхностей стенок трещин; J_a – показатель выветрелости трещин; J_w^R – гидравлическая проводимость; SRF^R – индекс отношения прочности к напряжению.

Согласно (формуле 1) определяется значение, которое соотносит исследуемый массив к определенному классу устойчивости табл. 1.

Таблица 1 – Класс устойчивости массива горных пород согласно Q^R рейтингу

Q_{HLW}^R	Класс	Степень устойчивости	Категория устойчивости массива
[100, 1000]	I	Очень высокая	Весьма устойчивый
[40, 100]	II	Высокая	Устойчивый
[20, 40]	III	Средняя	Умеренно устойчивый
[10, 20]	IV	Низкая	Неустойчивая
[0, 10]	V	Очень низкая	Весьма неустойчивая

Под воздействием поля напряжений на границах структурных образований возникают деформации, амплитуда которых превышает на один-два порядка соответствующие значения внутри блоков. Они, в свою очередь, приводят к образованию в окрестностях неоднородностей зон концентрации напряжений. В зависимости от свойств пород, скоростей изменения напряжений и их абсолютных значений происходит разрушение массива.

Таким образом, закономерности НДС определяют характер геомеханической эволюции всей горнотехнической системы и являются основой управления геомеханическими процессами для обеспечения безопасности и технико-экономической эффективности горных работ. Отсюда следует вывод, что для эффективного использования моделей НДС при оценке устойчивости горнотехнической системы «среда-выработки», согласно принципам системного подхода, необходимо выявить главные факторы, определяющие эволюцию системы, выбрать наиболее достоверные критерии оценки и обосновать методику многовариантного моделирования НДС

Для решения подобных задач предложено использовать энергетический подход, который физически основан на том, что для зарождения разрушения требуется определенная потенциальная энергия деформации. С концентрацией напряжений на одних участках одновременно происходит уменьшение напряжений на других. В результате образование новых трещин сопровождается неравномерным уменьшением потенциальной энергии деформации, которая будет превращаться в работу внутренних сил массива на перемещениях при росте новых систем трещин.

Энергетический подход включает в себя решение ряда задач. Во-первых, необходимо иметь адекватные критериальные характеристики степени опасности НДС (связанные с прочностью пород). После чего, путем сопоставления значений вычисленных уровней опасности произвести анализ и ранжирование участков по убыванию соответствующего им уровня опасности НДС.

В третьей главе проведен сбор и анализ информации, полученной в ходе геофизических, геологических и геодезических исследований. На основе этих данных разработана структурно-тектоническая модель для участка «Енисейский». Модель включает систему разрывных нарушений, литологическую структуру, зоны с повышенной трещиноватостью и дроблением, а также зоны динамического воздействия крупных тектонических разломов.

Модель создавалась на основе геологической документации керна буровых скважин, результатах геофизических исследований в скважинах и материалах местных и региональных геологических карт. Для задания граничных условий моделей в полевой период 2021-2022 гг. была выполнена геотехническая документация скальных обнажений пород. Был определен показатель качества пород *RQD* (методом треугольника на скальном обнажении), проведена съемка трещин обнажений для получения стереограмм (рис.1) и определены параметры индекса качества массива *Q* по Н. Бартону.

Статистическая обработка результатов измерений показала, что трещины в зоне динамического влияния Муратовского разлома имеют северо-восточное направление около 30° и 50° , соответственно (рис. 1а, в), а трещины в зоне динамического влияния Безымянного разлома северо-восточного – юго-западного и юго-восточного направления (около 10° и 130° соответственно) (рис. 1б, г).

На втором этапе модель дополняется зонами динамического влияния разрывных нарушений, ширина которых рассчитывалась по формуле С.И. Шермана. Исходя из данных о разрывных нарушениях, были выделены различные классы, характеризующие разрывные нарушения в Нижне-Канском массиве (табл. 2).

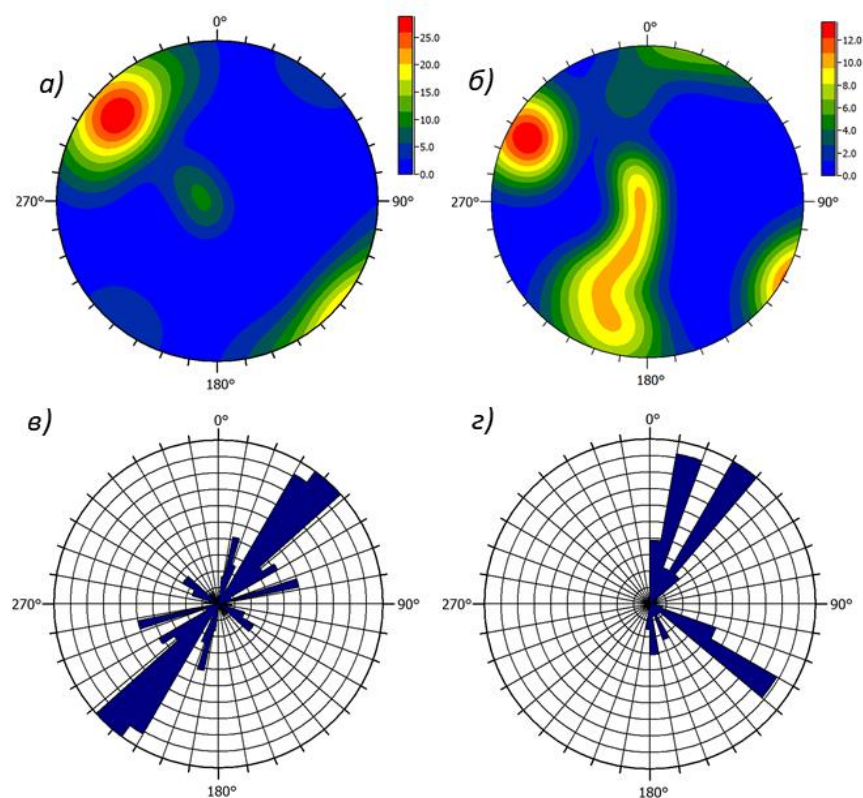


Рисунок 1 – Диаграммы трещиноватости (стереограмма трещиноватости верхняя полусфера) пород Нижне-Канского массива в зонах динамического влияния Муратовского (а) и Безымянного (б) разломов. Розы-диаграммы трещиноватости в зоне динамического влияния Муратовского (в), и Безымянного разломов (г).

Таблица 2 – Основные параметры разрывных нарушений Нижне-Канского массива

Название разлома, кинематический тип	Длина разлома, км	Порядок разлома	Ширина зоны динамического влияния разлома, по (км)
Муратовский, шарнирный сброс	Протяженностью более 50 км, но менее 100 км	XIII	2,8 - 4,9
Атамановский, шарнирный сброс	более 30 км но менее 50 км	XIII	1,8 - 3,24
Правобережный, сброс	более 30 км но менее 50 км	XIII	1,5 – 2,7
Канско-Атамановский, сбросо-сдвиг (левый)	более 30 км но менее 50 км	XIII	1,9 – 3,3
Кантатский разлом	более 30 км но менее 40 км	XIII	1,5 – 2,7
Шумихинский, сбросо-сдвиг (правый)	более 30 км но менее 40 км	XIII	1,5 – 2,7
Меридиональный	более 15 км но менее 20 км	XII	1,1-1,5
Байкальский разлом	8-9 км	XI	0,7-0,8
Безымянный разлом	6-8 км	XI	0,7-0,8
Студейный разлом	4-5 км	X	0,5-0,6

Для изучения напряженно-деформированного состояния Нижне-Канского массива были оценены параметры современных движений земной поверхности во временном интервале с 2012 по 2021 годы (рис. 2). На основе анализа осей ориентации и скоростей деформации участка видно, что реальное поле тектонических напряжений неоднородно («мозаично»). Породы, расположенные на северной и восточной границах участка, западнее от Правобережного разлома, преимущественно испытывают субмеридиональное растяжение, в то время как на западной границе, которая соответствует оси Правобережного разлома, подвергаются субмеридиональному сжатию и субширотному растяжению. Земная кора севернее разлома Безымянного испытывает растяжение, а блок, ограниченный Меркурьевским и Верхнешумихинским разломом, – сжатие. Породы в пределах самого участка также находятся в неоднородном поле современных деформаций.

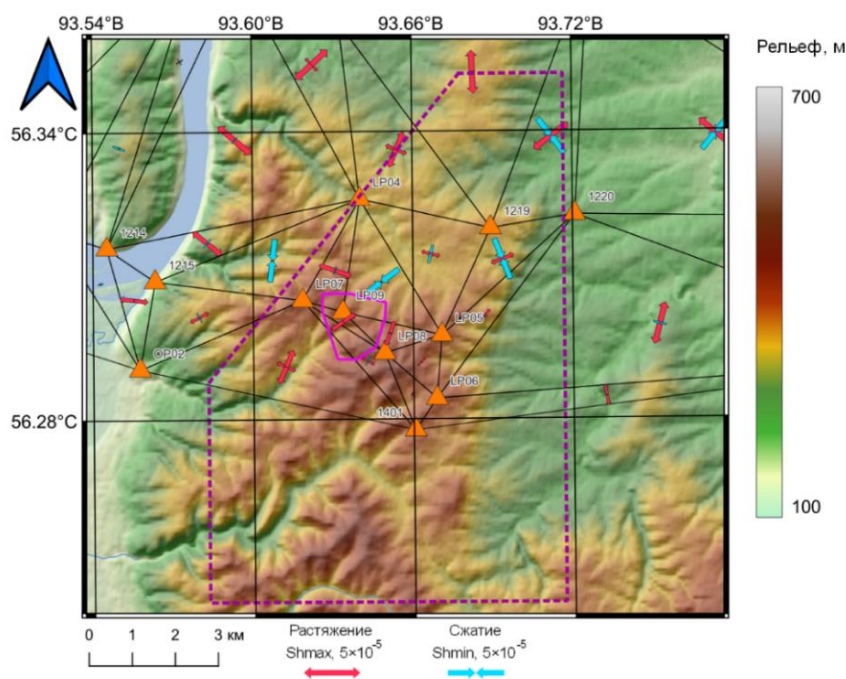


Рисунок 2 – Разломно-блоковая схема участка «Енисейский», главные оси и скорости деформаций, установленные по результатам ГНСС-наблюдений за период с 2012 по 2021 гг.

На третьем этапе работы предусматривается создание каркасной модели структурно-тектонического блока. Модель содержит литологическую часть, разрывные тектонические нарушения, интрузивные образования, зоны трещиноватости и дробления. В модель включены результаты системного анализа комплекса геолого-геофизических характеристик геологической среды, в том числе схемы разломной тектоники, данные геофизических и глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) наблюдений, параметры внешнего тектонического поля напряжений, физико-механические свойства пород, результаты определения трещиноватости пород и др.

Полная каркасная модель имеет размеры 3 км в плане и 2 км в поперечном направлении с высотой 1 км (рис. 3). Область анализа модели имеет размер $2 \times 1.5 \times 0.6$ км соответственно. Область анализа меньше всей модели для снижения краевых эффектов, возникающих при расчете полей напряжений на границах каркасной модели

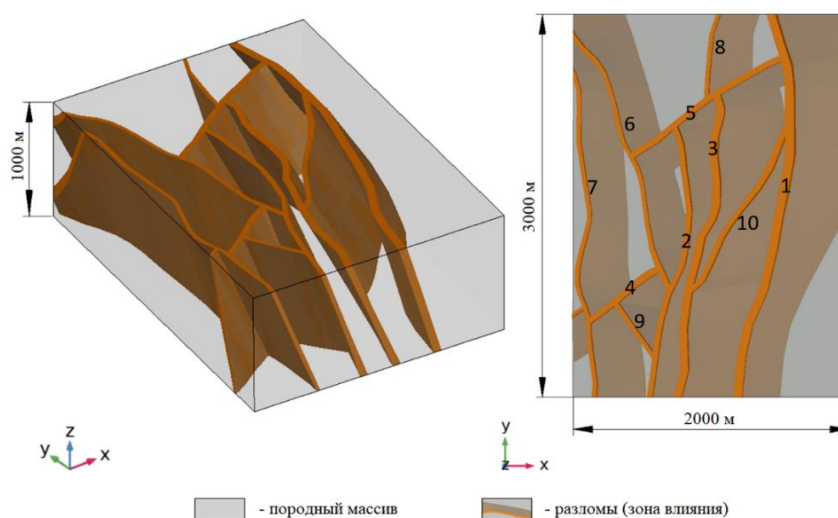


Рисунок 3 – Общий вид каркасной модели в интерфейсе COMSOL Multiphysics. 1 – Верхнешумихинский разлом; 2 – Меркурьевский разлом; 3 – Верхнемеркурьевский разлом; 4 – Безымянный разлом; 5 – Безымянный разлом 2; 6 – РН6; 7 – РН7; 8 – РН8; 9 – РН9; 10 – РН10

В четвертой главе диссертации выполнены расчеты с использованием модернизированной рейтинговой классификации. Проведено вариационное моделирование, включающее четыре варианта событий, а также выполнен комплексный анализ полученных моделей.

Первоначально был произведён расчет по предложенной рейтинговой классификации. Этот подход позволил оценить стабильность горных пород на рассматриваемом участке и выявить потенциально ослабленные зоны. Согласно расчетам по рейтинговой классификация, выбранный участок является подходящей для захоронения РАО. Следует отметить, что классификации создаются на основе имеющихся в настоящее время данных, которые еще относительно ограничены. Классификация участка Енисейский построена только на данных, полученных в пределах шести скважин.

Ключевым фактором создания геомеханических моделей являются граничные условия модели: внешние и внутренние источники нагрузок, закрепления модели, сетка конечных элементов, учет краевых эффектов при моделировании, принятые физико-механические свойства и т.д. На основании этого было выполнено вариационное моделирование в четырех вариантах:

- Первый вариант является контрольным и включает в себя только гравитационное давление и давление бокового отпора (рис. 4а). Тектоническая составляющая в первой модели принята равной нулю.

- Второй вариант – выбран с учетом тектонических напряжений, определенных по результатам геологических исследований. Соотношение главных действующих напряжений при ориентации оси компрессионного сжатия в $100-110^\circ$ принималось равным $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 0,5$ (рис. 4б).

- Третий вариант выбран, исходя из принципа «пессимистичного» прогноза. В нем главные действующие напряжения принимались равными $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 2$ при ориентации оси компрессионного сжатия в 90° (вдоль простирания главных тектонических нарушений) (рис. 4в). Такая ситуация является наиболее опасной с точки зрения реализации тектонических напряжений в форме динамических проявлений горного давления и сейсмических явлений.

- Четвертый вариант моделирования принимался на основе результатов геодезических измерений (рис. 4г). Так как результаты ГНСС-измерений показывают постоянную миграцию поля деформации, то осредненные скорости движений за последние 10 лет ГНСС-измерений следует принимать как наиболее вероятный современный тип напряженного состояния на границах модели, который со временем может измениться.

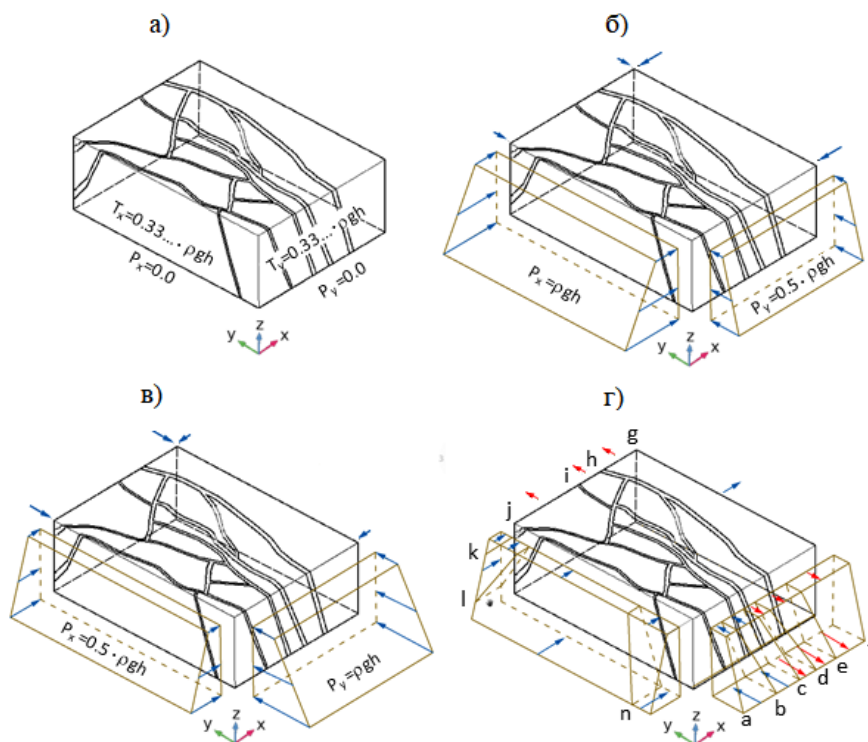


Рисунок 4 – Схемы задания граничных условий для расчетных вариантов: а – только гравитационное давление; б – на основе геологических данных $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 1/2$; в – пессимистичный прогноз $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 2$; г – по результатам ГНСС-измерений

Ниже представлены результаты численного моделирования НДС на глубине 450 м. На рисунке 5 представлено распределение интенсивности напряжения σ_i для четырех вариантов граничных условий. Этот параметр наиболее полно отражает суммарное поле в каждой точке массива.

Компоненты, характеризующие интенсивность напряжения σ_i , выражены отчетливо, но наблюдается их сложное распределение с присутствием зон концентрации напряжений в каждом из вариантов. На рис. 5 они показаны красным цветом. Значения фоновых напряжений в пределах строительной площадки варьируются от 12 до 14 МПа. Все, что выше этих значений, можно отнести к аномальным зонам. Основная часть аномалий сосредоточена в районе Верхнешумихинского разлома, где наблюдаются максимальные значения более 20 МПа.

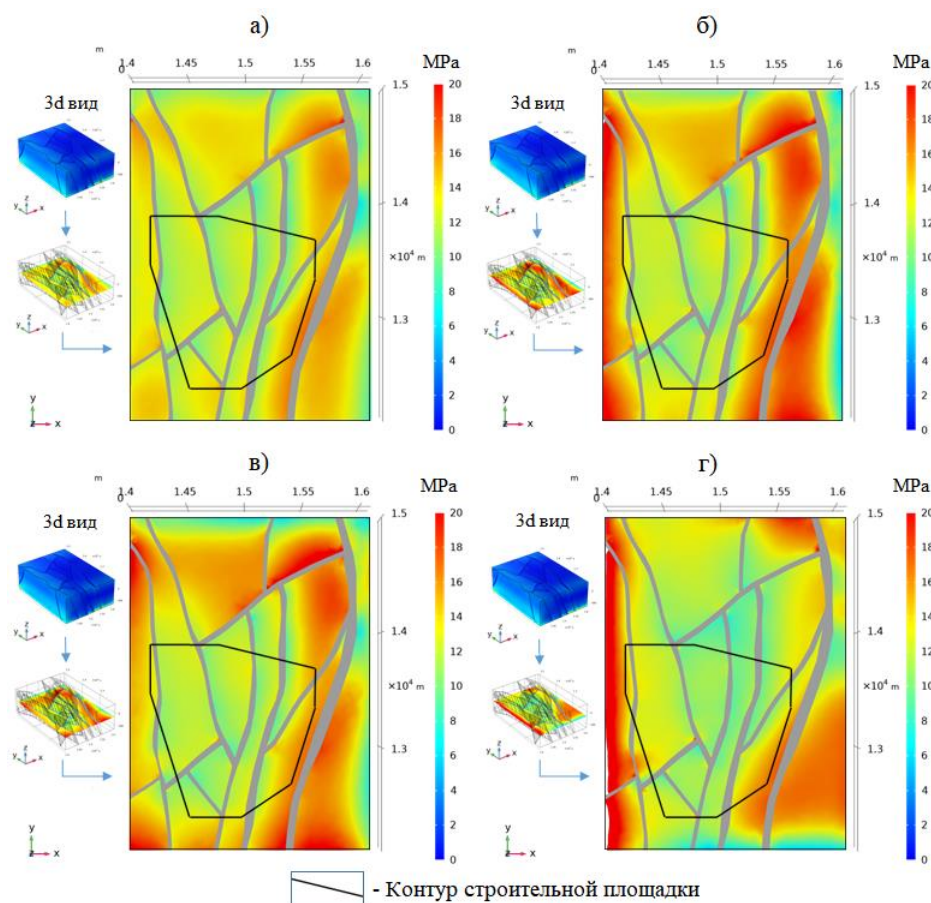


Рисунок 5 - Распределение интенсивности напряжений σ_i на глубине 450 м для вариантов: а) – только гравитационное давление; б) $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 0,5$; в) $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 2$; г) по результатам ГНСС-измерений

На рисунке 5а показаны максимальные значения интенсивности напряжений на стыке двух тектонических разломов в северо-западной части Верхнешумихинского разлома с разломом Безымянный 2, достигая 18 МПа. Рисунок 5б также показывает максимальные

значения, приуроченные к Верхнешумихинскому разлому и достигающие 20 МПа. Аналогичные значения наблюдаются на стыках Верхнешумихинского и Безымянного разломов. На рисунках 5в и 5г также имеются значения интенсивности напряжений более 20 МПа, особенно в северо-западной части. Область строительной площадки ПИЛ располагается в зоне средних значений интенсивности напряжений, $\sigma_i = 8 \div 14$ МПа.

Второй важный параметр — параметр, характеризующий отношение σ_{yy}/σ_{xx} . Чем оно больше, тем больше градиент перепада напряжений и вероятность разрушения пород. На рисунке 6 показано распределение отношения действующих напряжений σ_{yy}/σ_{xx} на глубине 450 м для четырех указанных выше вариантов граничных условий. В пределах строительной площадки ПИЛ отношения действующих напряжений находятся в диапазоне от 0,5 до 2.

На рисунке 6а видно, что в северной части модели и на юго-востоке Верхнешумихинского разлома имеются знакопеременные градиенты напряжений. Рисунки 6б и 6в повторяют распределение, показанное на рисунке 6а.

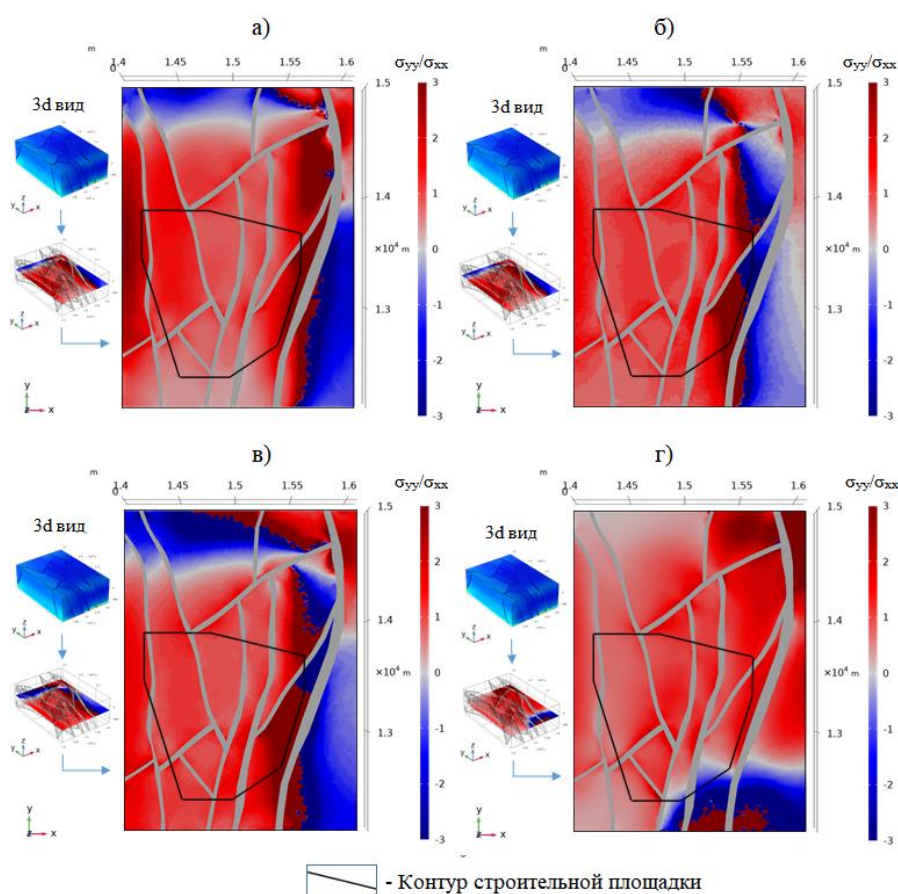


Рисунок 6 – Распределение отношения действующих напряжений σ_{yy}/σ_{xx} на глубине 450 м для вариантов: а) – только гравитационное давление; б) $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 0,5$; в) $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 2$; г) по результатам ГНСС-измерений

Критерий Хука-Брауна представляет собой модель поведения горных пород, которая является обобщением критерия Кулона-Мора. Он включает дополнительные параметры, позволяющие более точно определять прочность горных пород в естественных условиях.

Для определения прочности пород Нижне-Канского массива участка «Енисейский» использованы следующие параметры: геологический индекс прочности (GSI) и структурный индекс (m_i).

Структурный индекс m_i учитывает структурные особенности горных пород, такие как наличие трещин, разломов и других дефектов в структуре массива. Чем выше значение, тем более сложная структура породы.

$$GSI = 9 \cdot \log e Q' + 44; \quad (2)$$

Геологический индекс прочности GSI был вычислен по формуле 2. Расчетный показатель GSI для гранита-гнейсовых пород равняется 80. Значения предела прочности горных пород были использованы с учетом влияния тепла, где прочность снижается на 14% и составляет 112 МПа. Структурный индекс $m_i = 25$ для гранитогнейсов и метадолеритов. Модуль деформаций 68,25 ГПа.

В ходе анализа физико-механических характеристик горных пород были определены показатели прочности горных пород Нижне-Канского массива участка "Енисейский" с применением программы Rock Mass Strength; были получены постоянные Хука-Брауна $m_b = 12.23, s = 0.108, a = 0.500$. Также на основе этих данных были рассчитаны эквивалентные параметры Кулона-Мора: сцепление (c'), угол внутреннего трения (φ') и прочностные свойства пород в массиве, такие как прочность на растяжение, одноосное и объемное сжатие, а также модуль деформации. Значение показателей приведены в таблице 3. Графическое представление обобщенного метода Хука-Брауна представлено на рисунке 7. Полученные данные вариационные модели НДС были проанализированы с использованием критерия разрушения Хука-Брауна.

Таблица 3 - Показатели прочности горных пород Нижне-Канского массива участка "Енисейский"

Параметры	Показатели в массиве
Предел прочности на одноосное сжатие	36,82 МПа
Предел прочности на растяжение	-0,99 МПа
Предел прочности при объемном сжатии	58,56 МПа
Модуль деформации (Юнга)	60.08 ГПа
Сцепление	6 МПа
Угол внутреннего трения	57 град

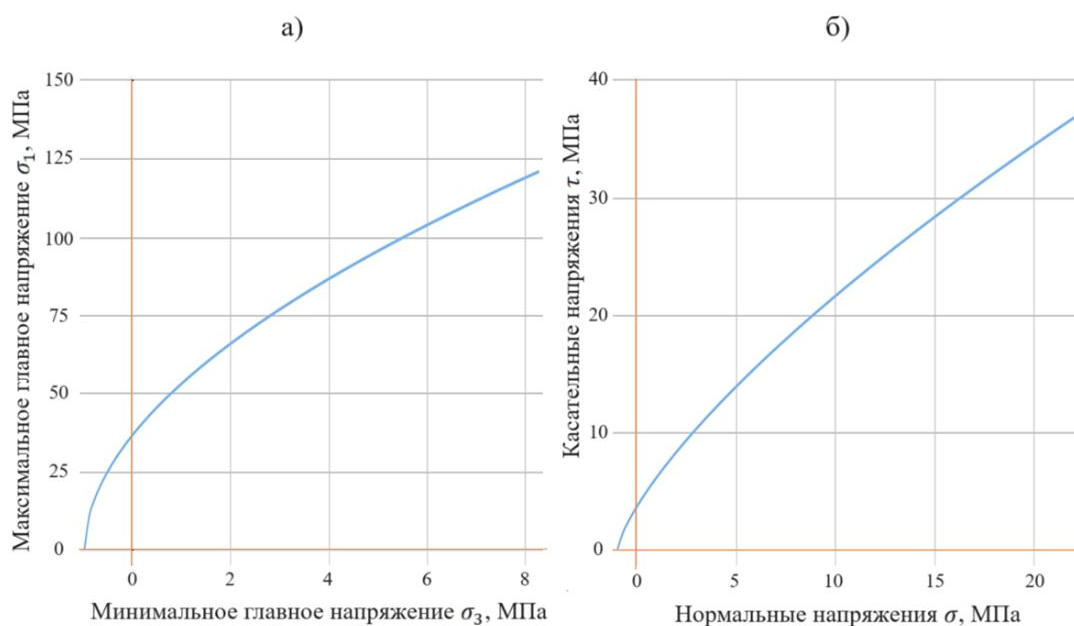


Рисунок 7 – Определения параметров прочности горных пород на основе обобщенного метода Хука-Брауна — гнейс, метадолерит, в массиве горных пород участка «Енисейский»: в пространстве главных напряжений (а); в пространстве касательных и нормальных напряжений (б)

На рисунке 8 общая тенденция показывает, что все варианты демонстрируют относительно большой запас прочности по сжатию (19.5 МПа). На рисунке 8а можно заметить, что максимальные значения сжатия (18,6 МПа) наблюдаются в северо-восточной части Верхнешумихинского разлома и северной части Безымянного 2 разлома. Рисунок 8б показывает максимальные значения сжатия (20 МПа) в западной части строительной площадки ПИЛ, приуроченной к разлому РН7.

Также относительно небольшие значения напряжений сжатия (18,9 МПа) проявляются в восточной части строительной площадки ПИЛ, отнесенный к Верхнешумихинскому разлому. На рисунке 8в максимальные значения сжатия превышают 20 МПа и проявляются в зоне ПИЛ.

Рисунок 8г демонстрирует такое же распределение напряжений, как и на рисунке 8б с максимальным значением до 20 МПа. На всех рисунках площадка ПИЛ попадает в зону относительного сжатия со значениями напряжений от 10 до 16 МПа.

Из анализа видно, что основными факторами, влияющими на распределение напряжений в массиве, являются зоны влияния разломов, где максимальные значения достигают 20 МПа. Вмещающие породы (гранит-гнейсы и метадолериты) на участке "Енисейский" обладают пределом прочности при объемном сжатии в 58,56 МПа (согласно таблице 3). Для оценки устойчивости выполнен расчет коэффициента запаса, который

составил $k = 2.9$ для максимальных значений напряжений. Это значение указывает на то, что горные породы имеют запас прочности, что способствует устойчивому состоянию всего массива.

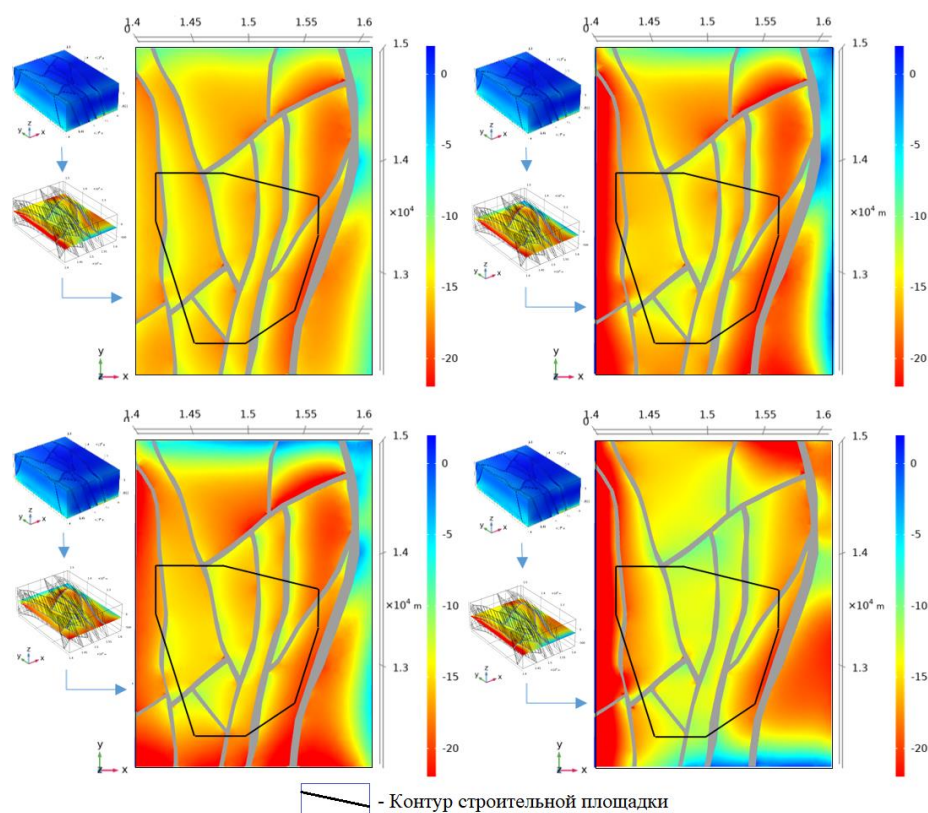


Рисунок 8 – Распределение напряжений по критериям Хука-Брауна на глубине 450 м для вариантов: а) – только гравитационное давление; б) $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 0,5$; в) $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 2$; г) по результатам ГНСС-измерений

Полученные вариационные модели НДС также были проанализированы на предмет устойчивости с использованием энергетического подхода.

На рисунке 9 представлено распределение критерия концентрации интенсивности энергии δ , который был получен путем суммирования показателей, $\propto (x, y), \beta(x, y)$ и $\gamma(x, y)$.

Из результатов видно, что участок строительства ПИЛ попадает в область, где величина концентрация интенсивности энергии $\delta = 0.4-0.5$. На рисунке 9а можно наблюдать, что максимальные концентрация интенсивности энергии δ находятся на стыке двух тектонических разломов в северо-западной части Верхнешумихинского разлома с Безмянным разломом 2. Из рисунка 9б видно, что максимальные значения концентрация энергии δ , приуроченные к структурным блокам, большинство из которых связаны с Верхнешумихинским разлом и с разломом Безмянный 2. Похожие значения также наблюдаются на стыках разломов РН6 и РН7 в западной части строительной площадки.

Рисунок 9в полностью повторяет рисунок 9б. На рисунке 9г максимальный показатель концентрации интенсивности энергии δ наблюдается в юго-западной части строительной площадки и связан с Безмянным разломом. Также аномальную зону можно заметить и в восточной части строительной площадки, связанная с Верхнешумихинским разломом.

Применение энергетического анализа к четырем вариантам моделирования выявило систематическую зависимость состояния разрушения горных пород от критической концентрации интенсивности энергии. Области с максимальными значениями энергии соотносятся с Верхнешумихинским и Безмянным разломами, что свидетельствует о высоком уровне опасности в этих зонах.

Анализ результатов моделирования указывает на то, что строительная площадка ПИЛ расположена в зоне с низкими уровнями опасности.

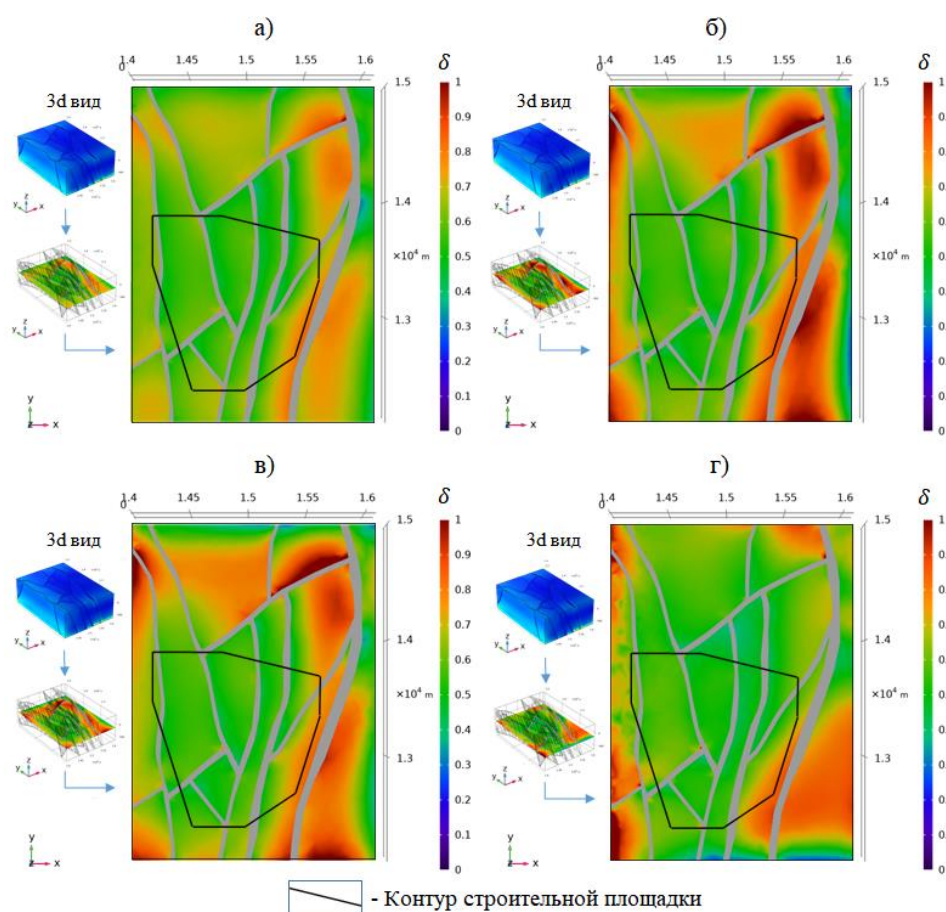


Рисунок 9 - Распределение критерия концентрации интенсивности энергии δ по (формула 2.30) на глубине 450 м для вариантов: а) – только гравитационное давление; б) $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 0,5$; в) $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 2$; г) по результатам ГНСС-измерений

Применение шкалы Чеддока для четырех вариантов моделирования выявило, что первые три варианта обладают очень высокой связью в показателях интенсивности напряжений, действующих напряжений и критерии Хука-Брауна (табл. 4). Это

свидетельствует о том, что существует высокая степень взаимосвязи между первыми тремя вариантами, особенно в отношении интенсивности напряжений и распределения действующих напряжений. Критерии Хука-Брауна также указывают на высокую общую связь между всеми вариантами. В то же время, анализ по критерию концентрации интенсивности энергии показывает, что связь между четвертым вариантом и другими является слабой. Это объясняется тем, что в четвертом варианте были установлены индивидуальные граничные условия для каждого блока (анизотропия), в отличие от других вариантов, где использовались общие условия (изотропия).

Таблица 4 – Корреляционная зависимость между вариантами моделирование

Распределение интенсивности напряжений				
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Вариант 1		0,88	0,89	0,59
Вариант 2	0,88		0,96	0,72
Вариант 3	0,89	0,96		0,66
Вариант 4	0,59	0,72	0,66	
Распределение отношения действующих напряжений σ_{yy}/σ_{xx}				
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Вариант 1		0,7	0,71	0,36
Вариант 2	0,01		0,88	0,38
Вариант 3	0,71	0,88		0,38
Вариант 4	0,36	0,38	0,38	
Распределение напряжений по критериям Хука-Брауна σ_1				
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Вариант 1		0,89	0,91	0,76
Вариант 2	0,89		0,97	0,77
Вариант 3	0,91	0,97		0,77
Вариант 4	0,76	0,77	0,77	
Распределение критерия концентрации интенсивности энергии δ				
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Вариант 1		0,76	0,79	0,39
Вариант 2	0,76		0,9	0,57
Вариант 3	0,79	0,9		0,48
Вариант 4	0,39	0,57	0,48	

Для комплексного пространственного анализа была создана блочная геомеханическая модель.

На рисунке 10 представлена объединенная блочная геомеханическая модель в программном продукте Micromine, раскрашенная в соответствии с системой Q^R . Модель включает разнообразные литологические разности, структурно-тектонические характеристики участка, физико-механические свойства пород, данные о напряжениях, которые получены в результате численного моделирования, а также рейтинговые классификации RQD , Q' и GSI . Цветовая разметка в модели отображает степень устойчивости по системе Q^R , что позволяет провести систематический анализ

геомеханических параметров в цифровом пространстве. В этой модели наблюдаются низкие значения в диапазоне от 0 до 20 в областях разломов и зонах повышенной трещиноватости, и это характеризует степень устойчивости как низкую. О переходе от средней к высокой степени устойчивости свидетельствует увеличение значений и их превышение 20 по мере удаления от разрывных зон. Высокая и очень высокая степень устойчивости приурочена к ненарушенным блоковым структурам массива, где фоновые значения колеблются от 100 до 300. В зонах влияния разломов отмечаются низкие значения по системе Q^R простирающиеся на максимальное расстояние до 75 метров и ассоциированные с Верхнешумихинским разломом. Средняя мощность зон с низкими значениями (по системе Q^R) по всем разломам изменяется в пределах от 15 до 20 метров.

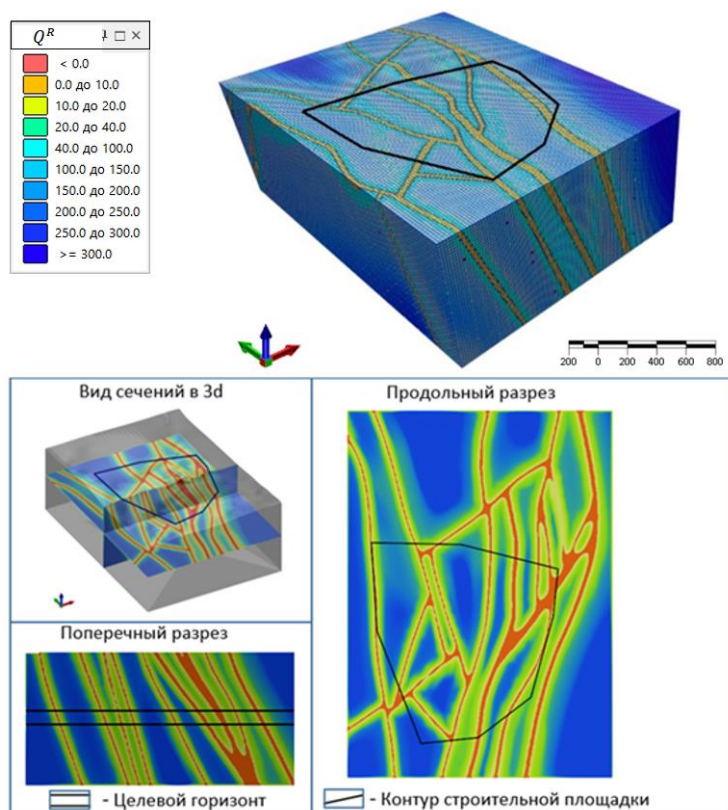


Рисунок 10 – Объединённая блочная геомеханическая модель раскрашенная в соответствии с системой Q^R

Разработанная блочная геомеханическая модель позволяет объединить все эти параметры в единую цифровую пространственную среду. Это дает возможность систематически анализировать опасные геомеханические процессы и обеспечивать безопасность при проведении строительных работ, включая управление радиоактивными отходами. В конечном счете подобное объединение способствует повышению эффективности всего процесса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся завершенной научно-квалификационной работой, на основе выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований проведена оценка устойчивости породного массива с использованием трехмерной геомеханической модели участка «Енисейский» Нижне-Канского массива, что имеет важное значение для развития геомеханики скальных массивов и обеспечения геоэкологической безопасности при подземной изоляции высокоактивных радиоактивных отходов.

Основные научные результаты, выводы и рекомендации, полученные лично автором:

1. По результатам анализа опыта разработки структурно-геологических и геомеханических моделей рассматриваемого породного массива выявлено, что имеющиеся методы, методики и инструменты не соответствуют повышенным требованиям к безопасности уникального создаваемого объекта. Для обеспечения максимальной достоверности оценки напряженно-деформированного состояния породного массива необходимо внести коррективы. Это может быть достигнуто путем создания трехмерных геомеханических моделей, учитывающих структурные особенности породного массива с применением современных программных продуктов.

2. Собраны и обобщены данные о физико-механических свойствах пород и о характеристике внешнего, по отношению к участку, регионального поля напряжений. Полученные данные о современном напряженно-деформированном состоянии района, с использованием средств ГНСС, показывают сложноградиентное распределение действующих внешних тектонических сил на границах создаваемой геомеханической модели.

3. На основе анализа геолого-геофизических данных разработана структурно-тектоническая модель участка «Енисейский», включающая в себя систему разрывных нарушений, литологическую модель, модели интрузивных образований, зоны повышенной трещиноватости и дробления, физико-механические свойства пород и зоны динамического влияния крупных тектонических разломов.

4. Ключевым фактором создания геомеханических моделей являются граничные условия модели: условия внешних и внутренних источников нагрузок, закрепления модели, учет краевых эффектов при моделировании, принятые физико-механические свойства и т.д. При задании внешних действующих сил были приняты и проанализированы четыре вероятных сценария граничных условий: 1 – только гравитационное давление; 2 – на основе

геологических данных $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 1/2$; 3 – пессимистичный прогноз $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 2$; 4 – по результатам ГНСС-измерений.

5. На основе предложенной рейтинговой классификации проведена оценка устойчивости геологической среды на участке Нижне-Канского массива. Важными факторами нарушения устойчивости являются высокая плотность трещиноватости в зонах динамического влияния разломов и присутствие метаморфических пород в массиве. Однако, в блочных структурах породного массива наблюдается высокая степень устойчивости по рейтинговому показателю Q^R .

6. Анализ результатов численного моделирования НДС показал, что существуют локальные области повышенных напряжений в геологическом массиве, соответствующие тектоническим структурам, таким как Верхнешумихинский и Безымянный разломы. Однако результаты моделирования указывают, что площадка ПИЛ во всех сценариях моделирования попадает в зону геодинамической устойчивости.

7. Проведенный корреляционный анализ данных, полученных в результате многовариантного моделирования, демонстрирует высокую степень корреляции между первыми тремя вариантами граничных условий. Четвертый вариант показывает пониженную корреляционную связь, что обусловлено наличием определенных анизотропных граничных условий по границам участка моделирования.

8. Разработана блочная геомеханическая модель, интегрирующая разнородные геомеханические, геологические и горнотехнические параметры массива в единое цифровое пространство для оценки устойчивости породного массива участка «Енисейский» Нижне-Канского массива средствами ГГИС.

9. Разработанная трехмерная геомеханическая модель для оценки устойчивости массива при захоронении высокоактивных радиоактивных отходов была апробирована в научно-исследовательских и производственных работах Геофизического центра РАН, выполняемых совместно с ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами». Модель применяется при эксплуатации геодинамического полигона ПИЛ и при реализации научной программы геодинамических и геомеханических исследований в ПИЛ.

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы:

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, и входящих в международную систему цитирования SCOPUS

1. **Akmatov D.Zh.**, Nikolaichuk V.V., Tikhonov A.A., Shevchuk R.V. Radar Interferometry as Supplement to Classical Methods to Observe Earth's Surface Displacement. *Gornaya promyshlennost.* 2020. (1): P. 144–147. 10.30686/1609-9192-2020-1-144-147 (**Scopus**).
2. **Akmatov D.Zh.**, Tikhonov A.A., Kappushev D.Z. Numerical modeling of geomechanical processes in construction of the Moscow Metro running tunnels // *Gornaya promyshlennost.* 2022. (1): P. 133-137. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1-133-137 (**Scopus**).
3. Shevchuk R.V., Manevich A.I., **Akmatov D. Zh.**, Urmanov D.I., Shakirov A.I. Modern methods, techniques and technical means of monitoring movements of the Earth crust. *Gornaya promyshlennost.* 2022. (5): P. 99–104 DOI:10.30686/1609-9192-2022-5-99-104 (**Scopus**).
4. **Акматов Д.Ж.**, Маневич А.И., Татаринов В.Н., Шевчук Р.В. Трёхмерная структурно-тектоническая модель Енисейского участка (Нижнеканский массив) // *Горный журнал.* 2023. №1. с.69–74. DOI: 10.17580/gzh.2023.01.11 (**ВАК, Scopus**).
5. **Akmatov D.Zh.**, Evloev H.Y., Meller A.D., Manukyan T.A., Chadin V.N. Methodology for numerical modeling of stress fields in vicinities of coal mines // *Gornaya promyshlennost.* 2023. (1): P. 39–44. DOI:10.30686/1609-9192-2023-1-39-44 (**Scopus**).
6. **Akmatov D.Zh.**, Kuleshov A.M., Chadin V.N., Bogachuk A.G., Kolesnikov K.A. Stress-strain state of fault models analysis. // *Gornaya promyshlennost.* 2023. (5): P. 119-123. DOI:10.30686/1609-9192- 2023-5-119-123 (**Scopus**).
7. Татаринов В.Н., **Акматов Д.Ж.**, Маневич А.И., Шевчук Р.В. Иерархический подход к оценке устойчивости геологической среды в геомеханических исследованиях // *Горный журнал.* 2024. №1. с.15–21. DOI: 10.17580/gzh.2024.01.03 (**ВАК, Scopus**).
8. **Акматов Д.Ж.** Оценка устойчивости участка «Енисейский» Нижне-Канского породного массива на основе трехмерной геомеханической модели // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* 2024. №1 (специальный выпуск №2). с. 3-16. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_2_3 (**ВАК**).