

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ**  
**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение**  
**высшего образования «Национальный исследовательский**  
**технологический университет «МИСИС»**

*На правах рукописи*

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»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук, доцент  
Тухель Екатерина Андреевна

Москва, 2024

## Оглавление

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ БЕЗОПАСНОСТИ ПОДЗЕМНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОАКТИВНЫХ РАО.....	12
1.1 Принципы обеспечения долговременной безопасности изоляции высокоактивных РАО в геологических формациях.....	12
1.2 Подземная исследовательская лаборатория .....	15
1.3 Опыт использования геомеханических моделей для оценки и прогноза устойчивости породных массивов .....	25
1.4 Методические подходы и программные средства моделирования напряженно-деформированного состояния породных массивов .....	40
Выводы и постановка задачи исследований.....	50
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ, ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА ТРЕХМЕРНОЙ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ .....	53
2.1 Прочность горных пород .....	54
2.2 Блочность и структурная нарушенность породных массивов.....	61
2.3 Рейтинговые классификации устойчивости пород в массиве .....	63
2.4 Методика анализа напряженно-деформированного состояния массива на основе энергетического подхода.....	69
Выводы по главе 2 .....	75
ГЛАВА 3. СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УЧАСТКА «ЕНИСЕЙСКИЙ».....	77
3.1 Структурно-тектоническая характеристика участка «Енисейский».....	77
3.2 Исследование трещиноватости и динамических зон разломов .....	79
3.3 Физико-механические свойств пород и внешнее поле напряжений .....	86
3.4 Разработка трёхмерной структурно-тектонической модели участка «Енисейский» .....	90
Выводы по главе 3 .....	95
ГЛАВА 4. ТРЕХМЕРНАЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УЧАСТКА «ЕНИСЕЙСКИЙ».....	97
4.1 Рейтинговая классификация породного массива .....	98
4.2 Многовариантное моделирование напряженно-деформированного состояния .....	104
4.2.1 Граничные условия модели.....	104

4.2.2	Варианты моделирования.....	110
4.2.3	Результаты вариационного моделирования НДС.....	111
4.3	Комплексный анализ геомеханической модели и оценка устойчивости породного массива.....	115
4.3.1	Оценка прочности горных пород.....	115
4.3.2	Анализ прочности горных пород, находящихся в естественных условиях массива, с использованием критерия Хука-Брауна .....	118
4.3.3	Анализ результатов, полученных на основе энергетического подхода .....	120
4.3.4	Корреляционный анализ результатов моделирования.....	122
4.4	Создание блочной геомеханической модели.....	123
4.5	Рекомендации по проведению экспериментальных геомеханических исследований при строительстве и эксплуатации ПИЛ .....	127
	Выводы по главе 4 .....	131
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	133
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	136
	ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	151

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- БГМ – блочная геомеханическая модель
- ГГИС - горно-геологические информационные системы
- ГНСС – глобальные навигационные спутниковые системы
- ГЦ РАН – Геофизический центр Российской академии наук
- МАГАТЭ - Международное агентство по атомной энергии
- НДС – напряженно-деформированное состояние
- НИР – научно-исследовательская работа
- НИОКР – научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы
- НТС –научно-технический совет
- ПИЛ – подземная исследовательская лаборатория
- ПГЗРО – пункт глубинного захоронения радиоактивных отходов
- РАО – радиоактивные отходы
- СДЗК – современные движения земной коры
- СТБ – структурно-тектонический блок
- CAD - система автоматизированного проектирования (*Computer-aided design*)
- RMR - рейтинг массива горных пород (*Rock Mass Rating*)
- Q - индекс качества породного массива (*The rock mass quality*)
- RQD – показатель качества породы (*Rock-quality designation*)
- GSI - геологический индекс прочности (*Geological strength index*)
- URL - подземная исследовательская лаборатория (*Underground Research Laboratories*)

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность.** За период интенсивного развития атомной промышленности на территории России было накоплено огромное количество радиоактивных отходов (РАО) объемом свыше 510 млн. м<sup>3</sup>. Наиболее токсичными и опасными для окружающей среды являются тепловыделяющие высокоактивные радиоактивные отходы<sup>1</sup>. 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

---

<sup>1</sup> К высокоактивным отходам относятся РАО, в которых удельная активность бета-, гамма излучающих нуклиды более 10<sup>7</sup> кБк/кг, а трансурановых радионуклидов более 10<sup>5</sup> Бк/г

«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 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.

**Структура и объем 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 РФФ № 18-17-00241.

# ГЛАВА 1. Современное состояние исследований в области безопасности подземной изоляции высокоактивных РАО

## 1.1 Принципы обеспечения долговременной безопасности изоляции высокоактивных РАО в геологических формациях

В настоящее время в России и в нескольких десятках стран мира ведутся исследования по созданию пунктов глубинного захоронения (ПГЗРО) долгоживущих РАО и ОТЯ в геологических формациях [1-5]. Обоснование геоэкологической безопасности захоронения РАО — это 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, превышающий 10 тыс. лет. Их перечень изложен в целом ряде отечественных и международных нормативных документах [6-10]. Согласно [3, 17] пред началом захоронения РАО должно быть сформировано обоснование долговременной безопасности (*Safety Case*) как «интеграция аргументов и доказательств, которые описывают, количественно выражают и обосновывают безопасность пункта геологического захоронения». Оно состоит из 2-х частей [3]:

а) *assessment basis*, база исходных знаний о системе захоронения и барьерах, включая геологическую среду;

б) *safety assessment*, количественная оценка безопасности, т.е. результаты численного моделирования и анализа опасностей, связанных с геологической средой и конструкцией ПГЗРО.

Безопасность ПГЗРО основана на принципе многобарьерности, когда нарушение целостности одного из барьеров (инженерного или естественного) или внешнее событие природного или техногенного происхождения не приводит к снижению уровня безопасности ПГЗРО. К инженерным барьерам

относятся упаковка РАО, контейнер, инженерные конструкции, буферные материалы. К естественным барьерам относится геологическая среда.

«Российская концепция безопасности захоронения высокоактивных РАО основана на том, что главным барьером на пути миграции радионуклидов является геологическая среда. В тоже время, создание крупномасштабного подземного сооружения размерами ~ 1,5x1,0 км на глубине 500-600 м с объемом извлеченной массы пород более 10 млн. м<sup>3</sup> требует всесторонней оценки безопасности как при выборе площадки, так и при эксплуатации ПГЗРО» [16]. Геологические процессы, развивающиеся в течение достаточно продолжительного периода времени, могут привести к негативным геомеханическим процессам. Горные работы и контейнеры с тепловыделяющими РАО также создают тепловые, гидрогеологические, механические, геохимические и др. возмущения. «От них зависит безопасность ведения горных работ (горные удары) и устойчивость приконтурных зон шахтных стволов и горных выработок» [12, 15].

Нужно подчеркнуть, что влияние природных и техногенных процессов увеличивается с течением времени и полностью не может быть устранено [16]. Однако можно уменьшить негативное воздействие за счет превентивных конструкторских решений при проектировании подземной части ПГЗРО на основе специальных научных разработок [1]. Подобным исследованиям посвящены работы академиков А.Д. Гвишиани, Н.П. Лаверова, Н.Н. Мельникова, а также известных ученых О.Л. Кедровского, Е.Б. Андерсона, В.А. Петрова, В.С. Юдинцева, Б.Т. Кочкина, В.Н. Морозова, В.Н. Татарина, И.Ю. Шишица, В.С. Гупало и др.

Геодинамические процессы стоят первыми в ряду причин риска, поэтому оценка и прогноз их возможного проявления — это одна из важнейших задач в общей проблеме геоэкологической безопасности захоронения РАО [11]. В многочисленных публикациях, посвященных этой задаче [1, 12-14 и др.], подчеркнуто, что кинематика современных движений (геодинамические криповые и быстрые сейсмические движения) является

фундаментальным обстоятельством, которое в силу своей энергетической мощи определяет изоляционные свойства структурно-тектонического блока (дальняя зона). Не менее важную роль играют геомеханические процессы<sup>2</sup>, изменяющие напряжено-деформированное состояние (НДС) массива в приконтурной части ПГЗРО (ближняя зона) и приводящие к его ослаблению или разрушению. «Разломная тектоника, движения, сейсмичность являются источниками разномасштабной деструкции породных массивов. Теоретические оценки воздействия тепловыделения от контейнеров с РАО в диапазоне температур 100-150<sup>0</sup>С в течение 300-400 лет дают основание утверждать, что термонапряжения не смогут достигнуть критических для горных пород значений. Но даже при таких температурах имеются оценки, что время эффективности системы инженерных барьеров не превысит 3-х тысяч лет» [19].

В этой связи, развиваемый научный подход, направленный на оценку существующего поля напряжений и прогноза его перераспределения при проходке выработок ПГЗРО и последующей эксплуатации, процессов деформирования, а также выявление потенциальных зон структурной нарушенности ближней зоны (в том числе при тепловом воздействии от РАО) по данным математического моделирования НДС, становится актуальным уже на стадии проходки шахтных стволов ПИЛ.

Практика исследований на зарубежных объектах показывает, что обоснование *Safety Case* осуществляется поэтапно по мере накопления информации и выполнения исследований в ПИЛ. Однако, очень важно уже на стадии проектирования ПИЛ определиться с необходимым комплексом методов геомеханических исследований и оптимальным расположением экспериментальных камер относительно наиболее опасных зон породного массива.

---

<sup>2</sup> И.В. Баклашов [15]: «Геомеханические процессы в массиве горных пород это механические процессы деформирования, перераспределения напряжений и разрушения горных пород».

Для получения количественных оценок безопасности активно применяется компьютерное моделирование [3], которое направлено на решение двух задач [13]:

- выявление негативных процессов, установление их значимости и взаимодействия, и влияния на показатели безопасности объекта;
- определение соответствия конкретных показателей нормативным требованиям или критериям устойчивости геологической среды, установленных на основе НИР.

Результаты математического моделирования НДС позволяют улучшить прогнозные способности моделей путем максимального приближения граничных условий к реальному массиву [72, 81, 89]. Для данной задачи безусловным является использование именно трехмерных моделей среды, которые позволяют учесть геометрию и размеры геологических неоднородностей, и их влияние на распределение полей напряжений и деформаций [16, 85, 111].

Таким образом, анализ существующих принципов обеспечения долговременной безопасности подземной изоляции высокоактивных РАО показал, что достоверность прогноза развития геомеханических процессов в горных выработках ПИЛ может быть повышена:

- а) путем учета влияния структурных элементов породного массива на напряжено-деформированное состояние приконтурной зоны подземного сооружения;
- б) с помощью использования математических 3D-моделей при расчете геомеханических параметров, позволяющих количественно оценить длительную устойчивость геологического барьера.

## **1.2 Подземная исследовательская лаборатория**

*Подземная исследовательская лаборатория (ПИЛ)* — это подземный объект, включающий в себя комплекс выработок по проектно-конструкторским характеристикам и размещению соответствующий

требованиям ПГЗРО и предназначенный для проведения комплекса исследований в целях проверки характеристик породного массива и конструкций [21-23].

Исследования «в ПИЛ проводятся практически во всех развитых странах, обладающих ядерными технологиями, в США (Yucca Mountain), Швеции (Äspö), Финляндии (Onkalo), Швейцарии (Grimsel), Франции (Fanay-Augeres), Японии (Mizunami), Германии (Горлебен)» и др. (рис. 1.1) [31, 20]. Наибольшего прогресса достигла Финляндия, где ПИЛ «Onkalo» планируется как часть пункта захоронения [67]. На конец 2022 года там уже пройдено пять тоннелей длиной 1700 м. В Китае в 2021 г. тоже начато строительство ПИЛ в Бэйшане. Лаборатория будет создаваться в течение 7 лет и рассчитана на последующую работу в течение 50 лет [20].

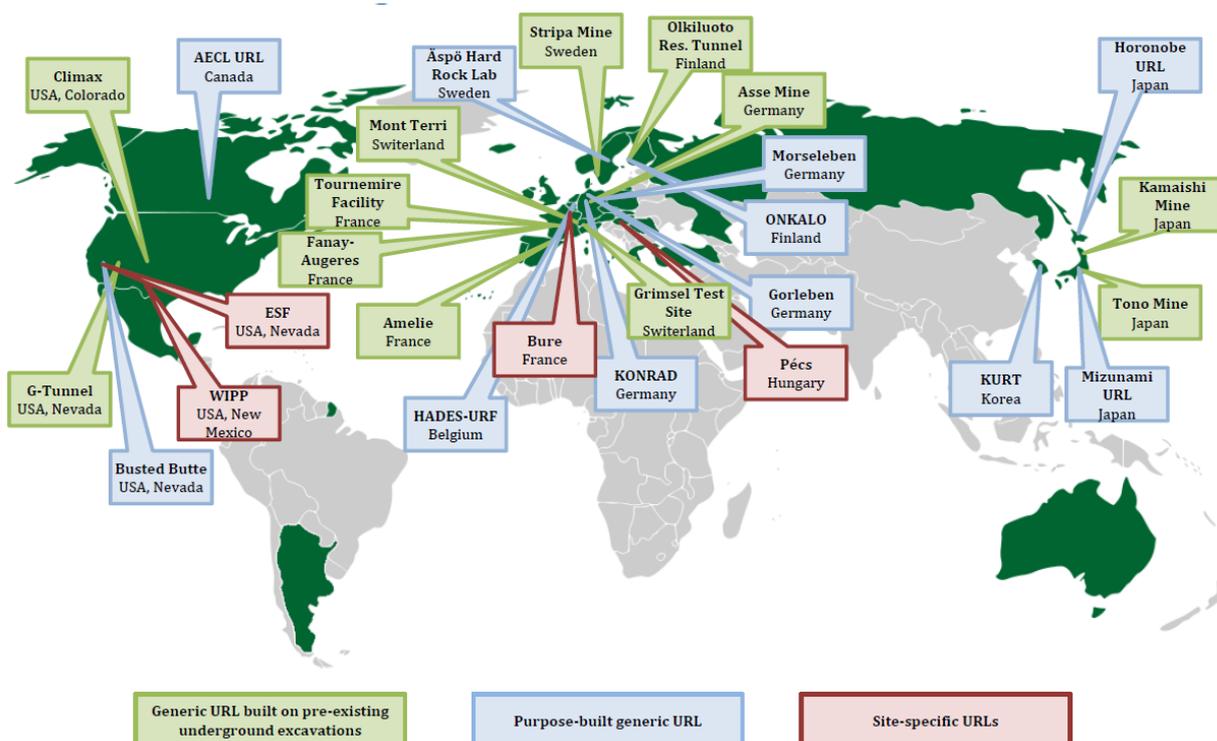


Рисунок 1.1 – Схема расположения подземных исследовательских лабораторий URL (*Underground Research Laboratories*) различного назначения

ПИЛ размещаются на глубине нескольких сотен метров (до 1000 м) от земной поверхности. Это может быть, как сложный, специально построенный

объект, в котором в течение многих лет проводятся исследовательские программы, так и более простой, например, пристроенный к существующим выработкам горного рудника. «Данные о массиве, формируемые в ходе исследований в ПИЛ, содействуют разработке основных элементов программ по созданию ПГЗРО и обоснованию безопасности. Кроме этого результаты исследований в ПИЛ имеют важное значение для выработки общественного доверия местного населения» [20].

За последние 40 лет в мире было создан целый ряд ПИЛ (рис. 1.2), предназначенных для проведения работ «по характеристике, испытаниям и демонстрации практической осуществимости различных концепций глубинного геологического захоронения РАО и ОЯТ-отработавшее ядерное топливо» [30, 67, 68]. Они сыграли ключевую роль в разработке технологий, методик и технических основ, требующихся для обеспечения безопасной изоляции РАО в геологических формациях.

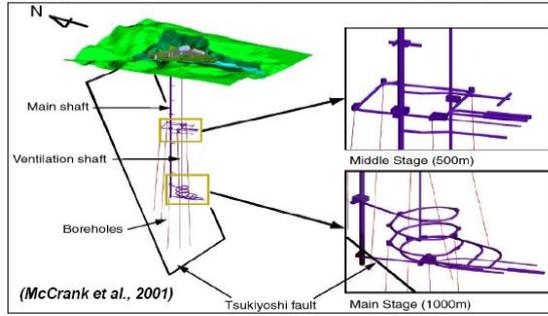
Согласно международной классификации, различают два вида ПИЛ (табл. 1.1) [18]:

- а) ПИЛ общего назначения (*generic URL*);
- б) ПИЛ конкретного назначения (*site-specific URL*).

В ПИЛ общего назначения не должны размещаться РАО, они используются для проведения только НИОКР общей направленности. На основании результатов может быть принято решение о сооружении ПГЗРО в сходных геологических условиях. Такие лаборатории используют для исследования технологий, методов и технических приемов, необходимых при выборе площадки для строительства пункта захоронения.

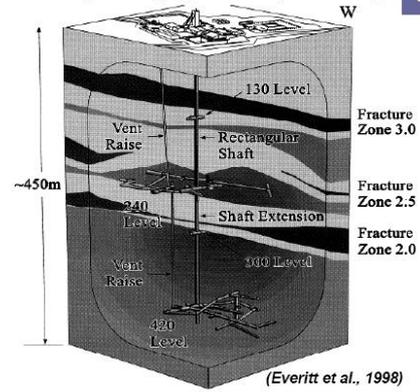
ПИЛ конкретного назначения используют для схожих целей, но в отличие от первых их сооружают на местах, уже потенциально пригодных для строительства ПГЗРО. В России, как и в Финляндии, планируется создание ПИЛ, которая станет частью ПГЗРО [23].

•Мицунами (Япония)/Mizunami (Japan)

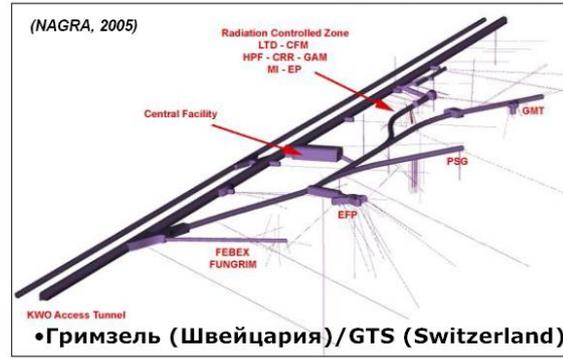
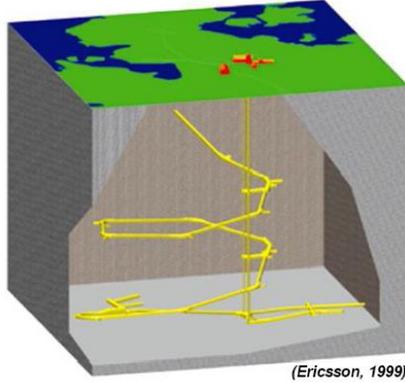


•Уайт Шел (Канада)/AECL (Canada)

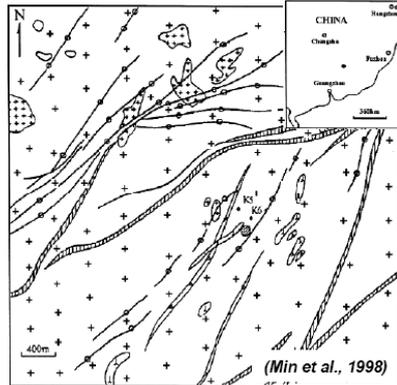
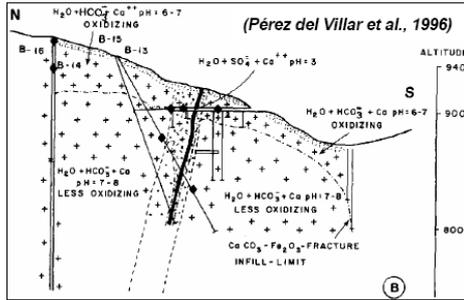
1



•Аспё (Швеция)/Äspö (Sweden)



•Эль Беррокал (Испания)/El Berrocal (Spain)

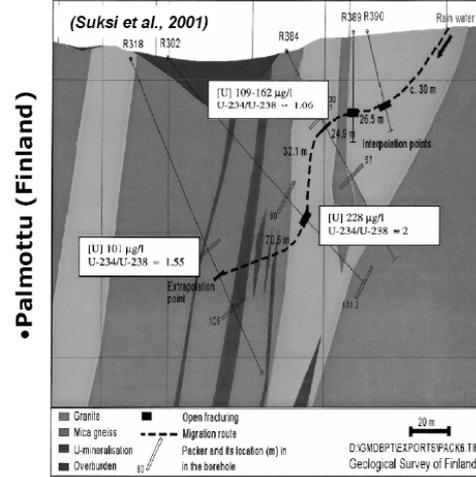


•Санерли (Китай)/Sanerliu (China)

- Yanshanian fine-grained granite
- Indosinian porphyritic granite
- Alkali metamorphic granite
- Fault zone
- Fault
- Mylonite
- Uranium deposit
- Sampling drillhole

•Палмотту (Финляндия)

1



•Камаиши (Япония)/Kamaishi (Japan)

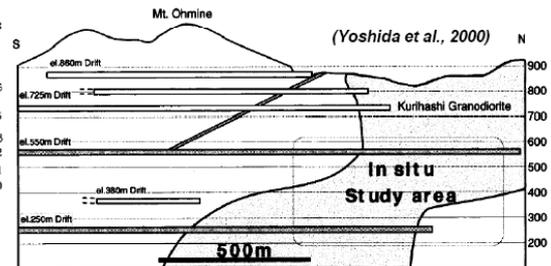
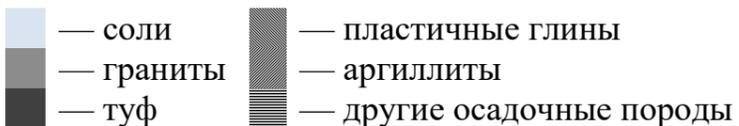


Рисунок 1.2 – Примеры зарубежных ПИЛ

Таблица 1.1 – Зарубежные подземные исследовательские лаборатории [20]

Страна	ПИЛ	ВИД*	Глубина	Характер НИОКР**	← 1960 гг.	← 1970 гг.	← 1980 гг.	← 1990 гг.	← 2000 гг.	← 2010 гг.
Бельгия	HADES	ОН/СС	230 м	ТХГМР+Д						
Венгрия	Pecs	КН/СВ	1000 м	ХА						
Германия	Asse	ОН/СВ	490-950 м	ТХГМР+Д						
	Gorleben	КН/СС	840 м	ХА						
	Konrad	КН/СВ	800-1300 м	ХГМ						
	Marsleben (ERAM)	КН/СВ	500 м	Д						
Индия	Kolar Gold Fields	ОН/СВ	1000 м	ТМ+Д						
Канада	AECL	ОН/СС	240-420 м	ТХГМ						
США	Climax	ОН/СВ	300 м	Д						
	G-Tunnel	ОН/СВ	420 м	ТХМ						
	Busted Butte	ОН/СС	420 м	ТГМ						
	WIPP	КН/СС	655 м	ТХГМР+Д						
	ESF	КН/СС	300 м	ТХГМ+Д						
Финляндия	ONKALO	КН/СС	500 м	ТХГМР+Д						
Франция	Fanay-Augeres	ОН/СВ	-	ТХГМ						
	Amelie	ОН/СВ	-	ТМ+Д						
	Tournemire RT	ОН/СВ	250 м	ХГМ						
	Bure	КН/СС	500 м	ТХГМР+Д						
Швейцария	Grimsel TS	ОН/СВ	450 м	ТХГМ						
	Mont Terri URL	ОН/СВ	230 м	ТХГМ						
Швеция	Aspo HRL	ОН/СС	450 м	ТХГМ+Д						
	Stripa	ОН/СВ	410 м	ТХГМ						
Япония	Tono	ОН/СВ	130 м	ХГМ						
	Kamaishi	ОН/СВ	700 м	ХА						
	MIU	ОН/СВ	300 м	строится						
	Honorobe	ОН/СС	250 м	ТХГМР						
Корея	KURT	ОН/СС	90 м	ТХГМ+Д						

Легенда  


\* ОН - ПИЛ общего назначения, КН - ПИЛ конкретного назначения, СС - специально сооруженная ПИЛ, СВ - ПИЛ в существующей выработке;  
 \*\* Т - тепловые, Х - химические, Г - гидрогеологические, М - механические, Р - радиационные, Д - демонстрационные, ХА - характеристика

В 2021 г. в России было начато строительство ПИЛ на участке «Енисейский» в гранитогнейсовых породах в 20 км севернее г. Красноярск (рис. 1.3) [23, 24].

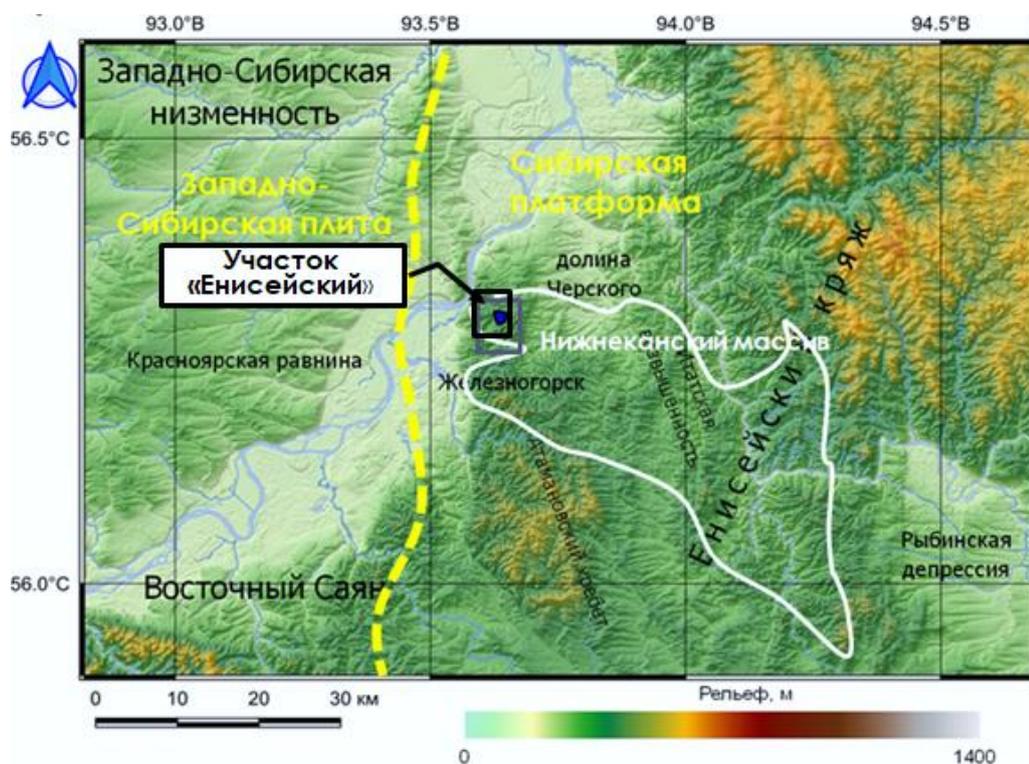


Рисунок 1.3 – Район строительства ПИЛ

Немаловажной частью «Программы исследований...» в ПИЛ являются геомеханические эксперименты и построение на их основе численных моделей НДС массива [25-27]. Предварительный проект ПИЛ (2019 г.) включает следующий комплекс сооружений (рис. 1.4):

- вспомогательные здания и сооружения поверхностной инфраструктуры, в том числе линейные объекты инженерного обеспечения объекта;
- три вертикальных ствола глубиной до 550 м, два из которых диаметром 6.0 м и один 6.5 м;
- оконтуривающие горизонтальные горно-капитальные выработки двух горизонтов сечением до 20 м<sup>2</sup> и общей протяженностью около 5000 м;

- четыре горизонтальные камерные выработки, по две на каждом горизонте, сечением 40-60 м<sup>2</sup> общей длиной 600 м с расположенными в них четырьмя вертикальными скважинами глубиной по 75 м.

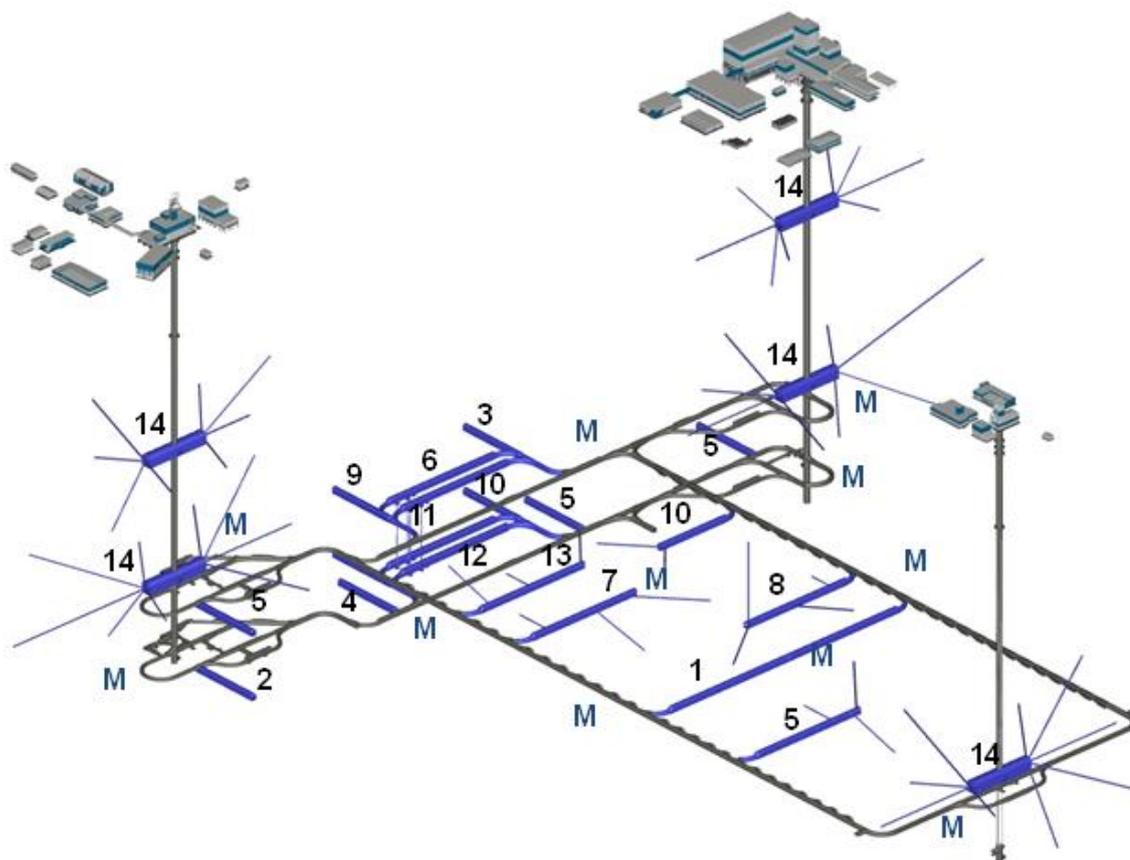


Рисунок 1.4 – Схема ПИЛ (вариант 2019 г.) (синим цветом выделены исследовательские выработки). Цифрами обозначены планируемые эксперименты. 1-3 – миграция; 4 – геохимия; 5 - геомеханика и термомеханика; 6-8 – инженерные барьеры; 9 – микробиология; 10 – газовыделение; 11 – технология РАО класс 1; 12 – технология РАО класс 2; 13 – прототип захоронения; 14 – гидрогеология; М – станции мониторинга [113]

В ПИЛ планируется решение следующих научно-практических задач [25-27]:

- «изучение породного массива и определение возможных диапазонов изменения параметров, важных для оценки безопасности возможного пункта окончательной изоляции РАО»;

- «экспериментальные исследования изолирующих свойств материалов инженерных барьеров в условиях тепловых воздействий и водонасыщения»;
- «отработка технических решений по конструкции и сооружению инженерных барьеров»;
- «разработка и испытания оборудования и способов проходки горных выработок»;
- «проверка математических моделей для оценки поведения многобарьерной системы безопасности».

При проектировании обычно стремятся расположить ПГЗРО внутри монолитного массива, а также отнести его как можно дальше от зоны динамического влияния крупных разломов и зоны потенциальной разгрузки подземных вод таким образом, чтобы время миграции радионуклидов до зоны разгрузки (в данном случае р. Енисей) было максимальным. Именно в этом ключе проанализированы подходы различных стран к выбору площадок для создания пунктов окончательной изоляции РАО в скальных породах, приведенные в табл. 1.2.

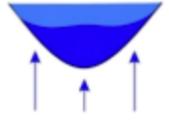
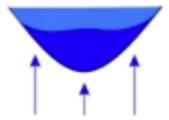
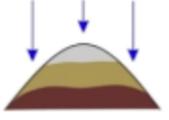
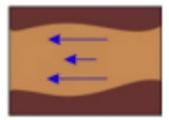
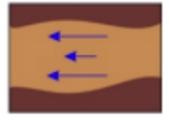
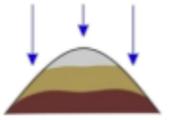
Существует три подхода. Первый - характерен для скандинавских проектов («Forsmark», Швеция и «Olkiluoto», Финляндия), где исследуется возможность создания глубинного ПЗРО рядом с береговой линией или непосредственно под дном Балтийского моря на глубинах около 500 м. С гидрогеологической точки зрения эти площадки приурочены к зонам разгрузки подземных вод, т.е. направление потока направлено преимущественно снизу-вверх [73, 74]. Таким образом, мощность природного барьера нужно рассматривать равной глубине заложения сооружения – 500 м. В условиях трещиноватого скального массива при заданной компоновке объекта, природный массив не может эффективно выполнять функции барьера, и практически полностью исключается из многобарьерной концепции захоронения РАО. По этой причине скандинавские страны в своих проектах вынуждены уделять особое внимание инженерным барьерам безопасности [20, 28, 67, 68]. Но это значительно удорожает проект.

Второй подход связан с выбором расположения объекта захоронения РАО на глубинах выше регионального базиса эрозии («Grimsel Test Site», Швейцария; «KAERI Underground Research Tunnel», Южная Корея). В таком случае существуют риски образования зон разгрузки в местах присклонового высачивания подземных вод. Как бы далеко не была удалена региональная зона дренирования (крупная река, море) от объекта изоляции, длина пути миграции радионуклидов будет значительно меньше за счет разгрузки подземных вод в речную сеть [19, 20].

Третий подход был использован при выборе участка «Енисейский» в России. Он принципиально выделяется из рассмотренных выше тем, что с одной стороны он расположен в зоне питания подземных вод (на водоразделе), а с другой стороны заглублен ниже отметок регионального базиса эрозии (р. Енисей) [5, 23, 108]. На водоразделе формируется нисходящий поток подземных вод, т.е. движение воды по трещинам и разломам в пределах площадки направлено вглубь массива, в отличие от объектов скандинавской группы, где направление обратное.

Заглубление подземных сооружений ниже регионального базиса эрозии позволяет исключить разгрузку подземных вод в локальную речную сеть. Возможная разгрузка будет происходить исключительно в р. Енисей, отнесенную от объекта более чем на 4 км [114].

Таблица 1.2 – Сравнительная характеристика зарубежных объектов, предназначенных для захоронения РАО с участком «Енисейский»

Участок / Лаборатория	Вмещающая порода	Возраст пород	Глубина, м	Назначение участка	Гидрогеологические условия, питание разгрузка в массиве, м	Коэф. фильтр., м/сут	Водоприток, м <sup>3</sup> /сут	Минерализация, мг/л	
1. <b>Forsmark</b> , Швеция	Метаморфизованные биотитовые граниты	1.8 - 1.9 млрд. лет	500	ВАО и ОЯТ. Сейчас короткоживущие РАО	зона разгрузки 	До зоны разгрузки 400-700 м. Объект расположен ниже базиса эрозии	$n \cdot 10^{-2}$ $n \cdot 10^{-7}$	520 в ПИЛ 4500 в ПЗРО (прогноз)	<1–>10
2. <b>Olkilooto</b> , Финляндия	Мигматизированные гнейсы, пегматитовые граниты	1.8 - 1.9 млрд. лет	420	ПИЛ. ВАО и ОЯТ	зона разгрузки 	До зоны разгрузки 500 М. Объект расположен ниже базиса эрозии	$< 4 \cdot 10^{-4}$	1000 в ПЗРО (прогноз)	<1–>10
3. <b>Grimsel Test Site</b> , Швейцария	Граниты, секущиеся дайками аплитов и лампрофиров	300 млн. лет	450	Только ПИЛ	зона питания 	До зоны разгрузки 300-500 м. Объект расположен выше базиса эрозии	$n \cdot 10^{-3}$ $n \cdot 10^{-7}$	?	<1
4. <b>Mizunami Underground Research Laboratory</b> , Япония	Граниты	100 млн. лет	500-1000	Только ПИЛ	зона транзита 	До зоны разгрузки 600 - 1200 м. Объект расположен ниже базиса эрозии	$8.5 \cdot 10^{-2}$ $5 \cdot 10^{-3}$	>1500 в ПИЛ	<1–2.5
5. <b>KAERI Underground Research Tunnel</b> . Южная Корея	Граниты	Мезозой	30-90	ПИЛ. Обсуждается изоляция ВАО и САО, НАО	зона транзита 	До зоны разгрузки 2-3 км. Выше базиса эрозии. Не глубоко от поверхности	$5 \cdot 10^{-2}$ $1 \cdot 10^{-5}$	30 в ПИЛ	<1
6. <b>Енисейский</b> , Россия	Гнейсы, секущиеся дайками долеритов	1.8 - 2.5 млрд. лет	450	ПИЛ, ВАО и ОЯТ	зона питания 	До зоны разгрузки 4 км. Объект расположен ниже базиса эрозии, в зоне затрудненного водообмена	$n \cdot 10^{-4}$	30 в ПЗРО (прогноз)	<1

### 1.3 Опыт использования геомеханических моделей для оценки и прогноза устойчивости породных массивов

Геомеханическому моделированию посвящено большое количество работ известных ученых в области горных наук. Следует отметить работы: Адушкина В.В., Баряха А.А., Захарова В.Н., Курлени М.В., Рассказова И.Ю., Баклашова И.В., Булычева, Н.С., Вознесенского А.С., Еременко В.А., Кочаряна Г.Г., Макарова А.Б., Морозова В.Н., Турчанинова И.А. и др.

Изучением закономерностей влияния тектонических структур на напряженно-деформированное состояние пород занимались И.М. Батугина, С.А. Батугин, В.В. Белоусов, М.В. Гзовский, А.М., Ломтадзе В.Д., Николаев П.Н., Руннейт К.В., В.Е. Хаин, С.Н. Шерман и др. Однако, несмотря на несомненные успехи, задача оценки и прогноза устойчивости породных массивов остается актуальной в настоящее время, особенно для подземных объектов с сверхдлительным сроком эксплуатации.

Требование создавать и использовать геомеханическую модель месторождения включено в проект новых Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности по обеспечению устойчивости бортов карьеров [72]. Разработка блочной геомеханической модели (БГМ) базируется на ряде дисциплин из области наук о Земле, каждая из которых имеет свой предмет исследований, методические подходы к его изучению, способы получения, интерпретации и т.д. Геомеханика это наука о механических состояниях породных массивов и процессах, развивающихся в них вследствие различных физических воздействий, включая внедрение самого подземного объекта. Отсюда *геомеханическая модель* – это упрощенное отражение наиболее существенных признаков, свойств и процессов в породном массиве и оценка его реакции на внешние воздействия. Она несет информацию о структуре среды, о физико-механических свойствах пород, НДС, устойчивости, включая рейтинговые показатели качества массива – *RMR*, *GSI*, *Q* и др. [57, 72]. Разработка БГМ включает в себя следующие этапы (рис. 1.6).



Рисунок 1.5 – Состав геомеханической модели в приложении к задаче захоронения высокоактивных РАО

Для оценки механического состояния породного массива, в т.ч. в математических моделях, широко используется термин «устойчивость геологической среды», определение которого приводится в работах Г.А. Голодковской, Г.К. Бондарика, М.А., В.Т. Трофимова, Ю.Г. Пузаченко, Т.Е. Емельяновой с соавт., В.А. Королева, В.Н. Татарина и др. Анализ содержания этого термина позволил сформулировать его в приложении к проблеме захоронения РАО в следующем виде.

*Устойчивость геологической среды* — «это неизменность или изменение свойств, процессов и состояния в таких пределах, которые не приведут к опасным *деформациям, напряжениям и структурным нарушениям* во вмещающем горные выработки породном массиве в заданное время» [69, 109].

Важнейшие представления о строении геологической среды и процессах в ней сформулированы в цикле работ акад. М.А. Садовского [70, 80]. Фундаментальное свойство геологической среды заключается в том, «что она состоит из системы неоднородностей (блоков, отдельностей), которые взаимодействуют друг с другом и обмениваются энергией в процессе деформирования среды». Его модель построена на следующих положениях:

1) «Геологическая среда состоит из иерархической последовательности структурных блоков, прочность которых значительно больше разделяющих их прослоек»;

2) «Структурные блоки в различной степени энергонасыщены потенциальной энергией, поступающей из внешних систем, достигнув неустойчивого состояния, некоторые блоки «сбрасывают» энергию, вызывая деформирование среды в асейсмичных районах или ее разрушение в сейсмических областях»;

3) «Деформирование сопровождается образованием в среде пространственных структур, которые можно рассматривать как самоорганизацию среды, служащую для трансформации энергии»;

4) «Накапливаемая потенциальная энергия в структурных объемах среды *диссипируется*, в основном, на иерархической системе поверхностей (границы блоков, земная поверхность)».

«Исходя из этого, прогноз устойчивости основан на двух принципах» [102].

1. Геологическая среда – «это *динамическая активная система, имеющая внутренние и внешние источники энергии*, определяющие пространственно-временную эволюцию ее структурных форм».

2. Геологическая среда «*иерархически устроена и пространственно структурирована*, накапливаемая в среде потенциальная энергия диссипируется в основном на иерархической системе трещин».

Геомеханическое моделирование представляет собой вариационный процесс определения реакции породного массива на внешние природные и техногенные воздействия [37, 115] в виде изменения первоначального поля напряжений. Реакция пород определяется также упругими и прочностными свойствами пород [42, 43].

При этом первостепенное значение приобретает анализ характера и форм проявления механических процессов в различных горно-геологических условиях. Это можно сделать только путем натуральных геомеханических инструментальных наблюдений. Данные, получаемые из натуральных исследований, позволяют классифицировать опасные явления и процессы, установить их общий механизм и проводить дальнейшие теоретические обобщения. Цель инструментальных методов - определение основных параметров механических процессов: напряжений, деформаций, сдвижений пород и их изменения в зависимости от основных характеристик массива.

Для определения величин и направлений напряжений имеется большое количество методов и их модификаций, со своими преимуществами и недостатками. Их можно условно разделить на 3 группы: геологические, геомеханическое, геофизические.

*Геологические* – «основаны на анализе общей геологической обстановки, а также на визуальном осмотре горных выработок, деформированных под действием горного давления. Как правило, такие методы способны дать лишь *качественную оценку* действующих напряжений и характеризуются малой трудоемкостью» [71].

*Геомеханическое* – «используют результаты измерения деформационных процессов в некоторой локальной области массива. Они обладают относительно высокой точностью определения напряжений, однако являются весьма *трудоемкими*» [71].

*Геофизические* – «изучают взаимосвязи природы, структуры, пространственной и временной изменчивости естественных и искусственных физических полей в массиве с действующими в нем напряжениями, они позволяют изучать большие объёмы среды, в том числе, не нарушая ее целостности. Но эта группа методов по своей сути не прямого назначения и точность определения значений напряжений достаточно низка. В то же время они информативны при изучении *динамики пространственно-временного изменения напряжений*» [71].

Инструментальным методам исследования напряжений посвящено огромное количество публикаций, поэтому ниже приведена общая информация о наиболее известных и надежных геомеханических методах (табл. 1.3).

Породный массив как объект исследования имеет очень существенную особенность - до образования выработок, т.е. ещё в своём изначальном состоянии он уже находится в напряжённом состоянии, которое обычно называют *естественным* или *начальным напряжённым состоянием*. Известно, что напряженное состояние земной коры в основном определяется двумя источниками: гравитацией и тектоническими движениями.

Таблица 1.3 – «Сравнительная характеристика геомеханических методов определения напряжений» [6]

Метод определения напряжений	Объект, подлежащий исследованию	Величины, подлежащие измерению	Применяемые средства измерения	Способ перехода к напряжениям	Данные, необходимые для пересчета	Характеристика получаемых напряжений
1	2	3	4	5	6	7
Полная разгрузка. Схема ВНИМИ	Керн	Деформация разгрузки на торце скважины	Тензометрические или фотоупругие датчики	Пересчет методами теории упругости	Модуль упругости и коэффициент Пуассона	Абсолютные величины и направления главных напряжений в массиве
Полная разгрузка. Схема Хаста	Керн центральной скважины	Измерение диаметра скважины	Тензометрические, магнитоэлектрические, емкостные датчики	Пересчет на базе теории упругости, лабораторное эталонирование	Тарировочная кривая деформации датчика в напряжениях, модуля упругости, коэффициента Пуассона	Величины и направления напряжений, действующих в плоскости, перпендикулярной оси скважины
Полная разгрузка. Схема Лимана	Керн центральной скважины	Деформация на поверхности скважины	Тензометрические датчики	Пересчет методами теории упругости	Модуль упругости и коэффициент Пуассона	Абсолютные величины и направления главных напряжений в массиве
Частичная разгрузка	Участок стенки выработки или ниши	Деформация участка стенки выработок	-	-	-	Величины и направления напряжений, действующих на поверхностях стенок выработки
Метод плоских домкратов	Стенки скважины	Давление, создаваемое в домкрате	Манометры, электроманометры, тензометрические датчики	Пересчет методами теории упругости	Модуль Юнга, коэффициент Пуассона	Напряжения, действующие перпендикулярно плоскости щели
Компенсационная разгрузка	Участок массива	Деформация упругого восстановления участка массива. Давление в гидравлической системе	Тензометрические датчики и механические индикаторы манометры, электроманометры	Непосредственное получение величины напряжений	-	Величины напряжения, нормального к поверхности обнажения
Щелевая разгрузка	Стенки щели	Деформации стенок щели	Тензометрические датчики	Пересчет методами теории упругости	Модуль Юнга, коэффициент Пуассона, коэффициент концентрации напряжений приконтурной части щели	Напряжения, действующие перпендикулярно плоскости щели
Метод разности давлений	Стенки скважины	Давление в гидравлической системе	Манометры, электроманометры, тензометрические датчики	Пересчет методами теории упругости, эталонирование	Связь давления в системе с напряжением в массиве путем эталонирования прибора	Средняя величина напряжения, нормального к поверхности скважины
Метод упругих динамометров	Стенки скважины	Нагрузка на упругий динамометр	Фотоупругие тензометрические динамометры	Пересчет или эталонирование	Модуль упругости, коэффициента Пуассона лабораторное	Относительное изменение напряжения, нормального к поверхности скважины

Метод определения напряжений	Объект, подлежащий исследованию	Величины, подлежащие измерению	Применяемые средства измерения	Способ перехода к напряжениям	Данные, необходимые для пересчета	Характеристика получаемых напряжений
1	2	3	4	5	6	7
Метод параллельных скважин	Стенки скважины	Измерение диаметра скважины	Манометры, электроманометры, тензометрические датчики	Пересчет методами теории упругости	Модуль упругости, коэффициент Пуассона	Величина напряжения, нормального к поверхности скважины
Измерение деформаций стенок буровых скважин	Стенки скважины	Измерение диаметра скважины	Тензометрические, струнные, индуктивные, емкостные деформометры	Пересчет методами теории упругости	Модуль упругости, коэффициент Пуассона	Величина напряжения, нормального к поверхности скважины

В общем виде напряженное состояние описывается тензором напряжений [76]:

$$[T\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Величины  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  называют нормальными напряжениями (рис. 1.6), а величины  $\tau_{xy}, \tau_{zx}, \tau_{yx}, \tau_{xz}, \tau_{zy}$  - касательными напряжениями.

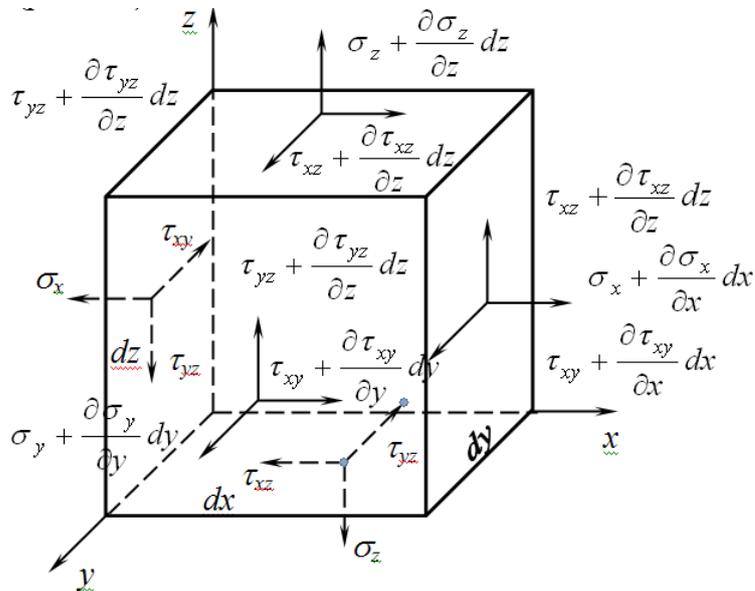


Рисунок 1.6 – Компоненты напряжений в прямоугольной системе координат

Тензоры напряжений симметричны в силу принципа взаимности или парности касательных напряжений:  $\tau_{xy} = \tau_{yx}; \tau_{yz} = \tau_{zy}; \tau_{zx} = \tau_{xz}$ . Поэтому тензор напряжений, в общем случае, полностью определяется шестью компонентами.

Значение составляющих касательных и нормальных напряжений, действующих на трех взаимно перпендикулярных площадках, является достаточным для того, чтобы вычислить величину напряжений на площадках, как угодно ориентированных в пространстве. Важно подчеркнуть, что при любых значениях напряжений можно найти такие направления осей координат, при которых все касательные компоненты тензора оказываются равными нулю. Тогда напряжения  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  являются «главными нормальными напряжениями», а направления их действия – главными осями напряжений» [33].

«При описании НДС часто пользуются плоской задачей, т.е. задачей о таком напряженном состоянии тела, когда все площадки одного направления, например, перпендикулярные к оси  $z$ , – заведомо главные. Для них касательные напряжения  $\tau_{xz} = \tau_{xy} = 0$ , а главное напряжение  $\sigma_z = 0$ » [33]. В этом случае уравнения теории упругости значительно упрощаются.

«Если длинное тело нагружено силами, не изменяющимися по его длине и перпендикулярными к этому направлению, то часть его, находящаяся на достаточном расстоянии от концов, подвергается плоской деформации ( $\sigma_z \neq 0, \varepsilon_z = 0$ )» [33]. Поскольку  $\sigma_z$  и  $\varepsilon_z$  – вторичны, то тензоры напряжений и деформаций можно представить в сокращенном виде

$$[T_\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Из формул закона Гука вытекает, что

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y), \quad \varepsilon_z = -\frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y), \quad (1.3)$$

где  $\nu$  - коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль упругости.

Однако использование плоской модели накладывает на них много ограничений. Одно из них – нельзя учитывать углы наклонов разломов, слоистость и вертикальную анизотропию пород. При анализе полей напряжений в математических моделях часто пользуются величиной, которая называется интенсивность напряжений, включающая в себя все компоненты

обобщенного (интегрального) тензора напряжений. «Интенсивность напряжений вычисляется по формуле» [33]:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3 \tau_{xy}^2}, \quad (1.4)$$

Приведенное выражение служит мерой «удельной потенциальной энергии формоизменения», накопленной в породах при деформировании.

На основе анализа геологического строения, тектоники и сейсмичности района можно получить некоторую оценку исходного поля напряжений, которая закладывается в граничные условия моделей НДС. На первом этапе развития геомеханики в качестве сил, обуславливающих горное давление, рассматривались только гравитационные силы. «Более 100 лет назад известный швейцарский геолог А. Гейм выдвинул гипотезу, согласно которой напряженное состояние земной коры в любой ее точке является функцией глубины залегания горных пород. Гейм полагал, что напряжения в земной коре должны распределяться по гидростатическому закону. Позже А. Динник, полагая, что горные породы можно моделировать упругим телом, предложил гипотезу о боковом распоре в условиях действия гравитационных сил. Согласно гипотезе, вертикальные напряжения превышают по величине горизонтальные, а последние равны между собой в различных направлениях и определяются величиной коэффициента Пуассона» [33].

Однако, создание новых инструментальных методов исследования привело к установлению факта наличия высоких горизонтальных напряжений в верхних слоях земной коры. Было установлено, что горизонтальные составляющие напряжений могут в разы превышать вертикальные и не равны между собой. Повышенные горизонтальные напряжения впервые экспериментально обнаружил шведский геомеханик Н. Наст в Скандинавии. Согласно его исследованиям горизонтальные напряжения могут в 3-5 и более раз превышать вертикальные и их природа отлична от гравитационных.

Таким образом, в земной коре существует три типа напряженного состояния, в зависимости от соотношения главных напряжений: гидростатическое,  $\sigma_z = \sigma_x = \sigma_y$ , (по Гейму); превышение горизонтальных компонент напряжений над вертикальными в несколько раз (по Хасту),  $\sigma_z \ll \sigma_x$  и  $\sigma_z \ll \sigma_y$ ; гравитационное (по Диннику),  $\sigma_z \approx 3\sigma_x$  и  $\sigma_z \approx 3\sigma_y$ .

Направление наибольшего главного нормального сжимающего напряжения  $\sigma_3$  в породах кристаллического фундамента в большинстве случаев является горизонтальным. В сильно метаморфизованных слоистых породных комплексах на ориентировку напряжения  $\sigma_3$  могут оказывать влияние структурные особенности пород. Чаще всего напряжение  $\sigma_3$  действует в направлении перпендикулярном или согласующемся с плоскостями напластования пород.

Важными критериями для предварительной оценки полей напряжений в изучаемом массиве пород могут быть данные анализа глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) [11, 25]. В тех случаях, когда имеются данные о горизонтальных *тектонических движениях* земной коры, неравномерность относительных горизонтальных перемещений пунктов служит признаком действия в изучаемом участке земной коры горизонтальных тектонических сил.

Следует также проводить качественную оценку уровня н участков массива в зависимости от коэффициента трещиноватости пород. В сильно, трещиноватых породах, как правило, максимальные величины напряжений меньше, чем в более монолитных и упругих породах.

Получить предварительные ориентировочные представления о структуре поля напряжений позволяют визуальное обследование горных выработок. При помощи визуального обследования можно ответить на следующие вопросы:

а) каков характер поля напряжений изучаемой области массива, т. е. является ли оно гидростатическим ( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ) или негидростатическим;

б) к горизонтальному или к вертикальному направлению близко направление действия наибольшего по абсолютной величине снимающего напряжения  $\sigma_3$  в случае негидростатического характера поля напряжений;

в) если направление наибольшего главного сжимающего напряжения  $\sigma_3$  близко к горизонтальному, то какова его приближенная ориентировка в плане, ближе оно к широтному, меридиональному или промежуточному диагональному направлению;

г) является ли поле напряжений однородным, т. е. сохраняется ли одинаковым распределение напряжений на различных участках.

При гидростатическом распределении породы разрушаются в одинаковой степени, как в кровле, так и в бортах выработок. Неодинаковая степень разрушения пород на контуре различно ориентированных горизонтальных выработок, а именно, преимущественное разрушение кровли или стенок выработок является признаком негидростатического распределения напряжений в массиве пород.

При негидростатическом распределении напряжений необходимо установить, действует ли максимальное главное сжимающее напряжение  $\sigma_3$  в направлении, близком к вертикальному (в этом случае напряженное состояние массива определяется, как правило, действием гравитационных сил) или - к горизонтальному, что возможно лишь при действии, наряду с гравитационными, больших по величине тектонических сил. «В результате анализа получают представление о направлении главного напряжения  $\sigma_3$ , которое необходимо при задании граничных условий моделей НДС» [33].

Геомеханическая модель позволяет ввести факторы, влияющие на механическое поведение блочного массива, и приблизиться к реальным условиям. «Наличие разрывов принципиально изменяет представление о поведении массива, полученное в рамках механики сплошной среды, и значительно изменяет механические характеристики массива и проявления геомеханических процессов в приконтурных зонах, если рассматривать объекты подземного строительства» [15, 33].

В настоящее время при оценке устойчивости породных массивов широкое распространение получили рейтинговые классификации [32, 42-48 54]. Первые рейтинговые классификации скальных массивов, предназначенные для оценки геомеханических свойств пород при проектировании подземных сооружений, появились в 50-60-х годах прошлого столетия. В них на основе эмпирического опыта породные массивы группировались по классам с приблизительно одинаковыми инженерно-геологическими параметрами. Затем, в 80-90-х годах были разработаны классификации, учитывающие их значимость. Существует около 30 рейтинговых классификаций и все они используются при проектировании во многих странах, несмотря на известные трудности, связанные с чрезвычайной изменчивостью и неоднородностью, масштабным эффектом и другими особенностями породных массивов [36, 43, 42, 53, 116 и др.]. В основном их используют при идеализации реального массива в упрощенные геомеханические модели при ограниченном объеме исходных данных. Несмотря на относительно малую точность метод на начальной стадии может быть единственным, позволяющим перевести «геологические» знания в проектные решения.

В (табл. 1.4) с учетом [34] представлены наиболее известные классификации, используемые при инженерно-геологическом изучении породных массивов, а в табл. 1.5 приведены геологические факторы, учитываемые в классификациях, используется от 1 до 12 факторов. Разделение пород производится на основе количественного показателя, рассчитываемого путем сложения баллов, характеризующих каждый параметр, иногда, с учетом весовых коэффициентов. «Рейтинговые оценки берут начало с классификации Бенявского на основе индекса RMR» [43].

В табл. 1.5 приведены прочностные характеристики массивов по классификации Бенявского [43].

Таблица 1.4 – Рейтинговые классификации, используемые при инженерно-геологическом изучении породных массивов

Автор	Год публикации	Принцип классификации	Назначение классификации
1	2	3	4
Терцаги [36]	1946	Разделение на 5 классов по структуре массива	Выбор типа крепления для туннелей
Мюллер [36]	1963	Разделение 4 класса по прочности на сжатие и расстоянию между трещинами	Определение сопротивления массива сдвигу
Дир [36]	1964	Разделение на 5 классов по $RQD$	Определение общей прочности массива
Дир и Миллер [36]	1966	Разделение на 3 класса по отношению модуля упругости к прочности на сжатие	Определение «качества» массива
Франклин [36]	1971	Разделение на 6 классов по прочности на сжатие и расстоянию между трещинами	Определение «качества» массива
Бенявский [43]	1973	Разделение на 5 классов по рейтингу ( $RMR$ )	Определение свойств массива, выбор типа крепления подземной выработки и др.
Бартон [35,42]	1974	Разделение на 9 классов по рейтингу ( $Q$ )	Определение свойств массива, выбор свода и типа крепления выработки
Лаубшер [51]	1977	Разделение на классы по рейтингу ( $MRMR$ )	Определение устойчивости откоса
Хвонг [48]	1978	Разделение на 5 классов по рейтингу ( $Z$ )	Определение «качества» массива
Булычев [37]	1982	Разделение на 5 категории по рейтингу ( $S$ )	Определение устойчивости массива для подземных выработок
Кикучи, Сайто, Кусуноки [50]	1982	Разделение на 6 классов по геологическим параметром	Определение свойств массива, несущей способности и глубины съема выветрелых пород в основании плотины
Кендорский [49]	1983	Разделение на классы по рейтингу ( $MBR$ )	Определение прочности массива и выбор крепления выработок
Романа м	1985	Разделение на 5 классов по рейтингу ( $SMR$ )	Определение устойчивости откоса
Спурр [53]	1985	Разделение на классы по рейтингу ( $RMR$ с дополнительными параметрами)	Определение эрозионной прочности массива
Ванхе и Нианксин м	1986	Разделение на 5 классов по рейтингу ( $W$ )	Прогноз обрушений в подземных выработках
Хомма и Камекура [47]	1986	Рейтинг ( $e_n$ )	Прогноз конвергенции и выбор крепления выработок

Автор	Год публикации	Принцип классификации	Назначение классификации
1	2	3	4
Антюнес и Инфанти [41]	1986	Разделение на классы по восьми параметрам	Определение эрозионной прочности массива
СНиП 2.02.02-85 [38]	1988	Разделение на категории по шести факторам	Определение прочности на сдвиг по трещине, массиву и контакту бетон – скала
Хайнес и Тербрюгге [46]	1991	Разделение на 10 классов по рейтингу ( <i>MRMR</i> )	Определение устойчивости откоса
Брито [44]	1991	Разделение на 5 классов по трем трещинным параметрам	Определение эрозионной прочности массива
Аль-Хартхи и Хенчер [39]	1993	Двуступенный рейтинг ( $R_c$ )	Определение прочности массива на сдвиг, прогноз ослабленных зон, выбор крепления выработок
Ангелидис, Конмантакис, Закас [40]	1993	Разделение на 3 класса по четырем факторам	Планирование землеустройства и прогноз условий для местного строительства
Хэк и Прайс [45]	1993	Двуступенный рейтинг ( <i>SSR</i> )	Оценка устойчивости откоса
Tg. CWRC [55]		Разделение на 5 классов по рейтингу ( $M$ )	Определение «качества» и районирование основания плотины
Проект национального стандарта (Китай) [55]	1994	Двуступенная классификация по рейтингу ( $BQ$ )	Определение свойств и районирование массива для оценки устойчивости сооружений
Хагрос и Анника [56]	2006	Разделение на 4 классы по четырем параметрам ( <i>HRC</i> )	Определение свойств массива для захоронения высокоактивных РАО
Тим Макивен и др. м	2012	Разделение на категории по трем факторам ( <i>RSC</i> )	Определение свойств массива для захоронения высокоактивных РАО
L. Chen и др. [58]	2015	Разделение на 3 категории по шести факторам ( $Q_{HLW}$ )	Определение свойств массива для захоронения высокоактивных РАО

Для скальных и полускальных массивов на основании рейтинговых оценок выделяется пять классов качества. В табл. 1.6 приведены примеры наиболее распространенных рейтинговых классификаций (*Q*-system), Н. Бартон, *RMR* (*Rock Mass Rating* – рейтинг массива горных пород) З. Бенявски, *GSI* (индекс геологической прочности), предложенный Хуком и Брауном.

Таблица 1.5 – Прочностные характеристики массивов по классификации Бенявского [34]

Класс массива	I	II	III	IV	V
«Качество» массива	Очень хороший	Хороший	Удовлетворительный	Плохой	Очень плохой
Рейтинг ( <i>RMR</i> )	100–90	90–70	70–50	50–25	<25
Сцепление (Па)	>300	200–300	150–200	100–150	<100
Угол трения, град	45	40–45	35–40	30–35	<30

Таблица 1.6 – Примеры наиболее распространенных рейтинговых классификаций [35, 42, 43]

Значение рейтинговых показателей	Класс качества массива				
	Класс I	Класс II	Класс III	Класс IV	Класс V
	Очень хороший	Хороший	Удовлетворительный	Плохой	Очень плохой
<i>Q</i> -system, Н. Бартон	$40 < Q$	$10 < Q \leq 40$	$4 < Q \leq 10$	$1 < Q \leq 4$	$Q \leq 1$
<i>RMR</i> (Rock Mass Rating), З. Бенявски	$100 \div 81$	$80 \div 61$	$60 \div 41$	$40 \div 21$	$< 20$
<i>GSI</i> (индекс геологической прочности), Хоек и Браун	$80 < GSI$	$72 < GSI \leq 80$	$60 < GSI \leq 72$	$51 < GSI \leq 60$	$GSI \leq 51$

На основе рейтинговых классификаций выполнено огромное количество исследований в горной промышленности [59, 92]. Например, в работе [35] описано численное моделирование испытаний блоков горной породы по контакту на сдвиг с использованием нелинейного критерия прочности по контакту взаимодействия между блоками горной породы. Моделируется влияние сдвигового смещения и расширения, нормального смыкания и раскрытия трещин на проницаемость. Также оценивается влияние термической нагрузки на свойства горных пород. В работе [60] предложена новая система классификации  $Q_{HLW}$  массива горных пород, целью которой является выбор подходящего участка для захоронения высокоактивных РАО. В [62] описаны исследования в ПИЛ, состоящей из ствола и трех

пересекающих выработок на глубине -560 м. В [63] представлена модель горных пород ПИЛ «Форсмарк» (Швеция). Пригодность участка ПИЛ «Onkalo» была проанализирована в [64] путем оценки показателей  $RSC$  и  $Q_{HLW}$ .

#### **1.4 Методические подходы и программные средства моделирования напряженно-деформированного состояния породных массивов**

Математическое моделирование НДС определяется решением краевой задачи упругости, вязко-упругости, упругопластичности и т.п. «В условиях, когда константы, определяющие деформации и прочность горной породы, либо неизвестны, либо заданы приближенно, упругие модели позволяют получить качественную картину распределения полей напряжений с учетом его структурных неоднородностей. Для расчетов применяют точные аналитические методы и приближенные численные методы. Приближенные численные методы расчетов обладают большой универсальностью, кроме того, они могут быть выполнены с любой заданной точностью» [71, 76].

При наличии разломов, локальных неоднородностей, а также анизотропии свойств, оптимальным с точки зрения точности расчетов является метод конечных элементов (МКЭ). «По нему имеется весьма обширный список публикаций, где описаны примеры приложения МКЭ для различных задач» [83, 85, 86, 89, 130]. МКЭ основан на вариационном исчислении и механике деформированного твердого тела. «Краевая задача для упругого потенциала пород, находящегося под действием сил гравитации и тектонических сил, рассматривается как функционал Лагранжа» [85]. Расчетная область разбивается на большое количество малых элементов, внутри которых потенциал изменяется линейно. «Решается система линейных алгебраических уравнений с большим количеством неизвестных - узловых перемещений [84], после чего вычисляются деформации и из обобщенного закона Гука напряжения в узлах элементов. При этом в качестве исходных

данных используются геометрия модели, упругие свойства и плотность пород, кинематические связи и силовые воздействия» [86, 117].

При создании модели НДС, «ключевое внимание уделяется точности в воспроизведении структурных и тектонических характеристик, изображенных на геологической карте» [89]. Основой для этого служит конструирование модели, в которой сложность реальных геологических границ и разломов упрощается путем их представления в виде линейных сегментов; это делает модель менее сложной, хотя и менее детализированной. «Кроме того, для достижения максимального сходства между моделью и настоящей структурой земной коры, моделируемые напряжения должны соответствовать главным напряжениям, определенным посредством изучения геодинамической истории данной местности» [69]. Устойчивость тектонической активности в геологических провинциях, которые находятся в состоянии относительного покоя, в большой степени зависит от долговременного воздействия сжимающих сил. «В исследовании, приложенном к Нижне-Канскому массиву [86], предложена гипотеза, согласно которой эти силы направлены с юго-запада на северо-восток, пересекая основное пространство твердой пластины Енисейского кряжа. Исходя из этого, вектор тектонического сжатия стремится к азимуту 220-240°».

Обычно, «когда рассматриваются кинематические граничные условия, они соответствуют закрепленным состояниям, которые не позволяют движению в направлениях, перпендикулярных к окружающему контуру» [86].

Использование «этого метода фиксации позволяет поддерживать стабильность и предотвращать сдвиги в солидном теле. Этот подход облегчает определение мест с повышенным напряжением, возникающих из-за различий в структуре материала. В исследованиях часто моделируют зоны с трещинами, применяя данные о более слабых механических характеристиках. Такие трещины обычно заполняются материалом, который намного менее прочен и более податлив к деформациям, чем окружающие горные породы» [114, 115].

Данный метод дает возможность создать точную модель среды, состоящей из различных блоков, основываясь на физическом понимании характеристик горных пород. Это находит подтверждение в фактически зафиксированных геологических условиях, где обычно встречаются зоны сильного измельчения пород и милонитизации вдоль разломов.

Таким образом, при моделировании НДС, структура массива может быть представлена двумя областями [89]:

- 1) Разломами, характеризуемыми приведенными ниже механическими характеристиками: модулем упругости –  $E_i$ ; коэффициентом Пуассона –  $\nu_i$ .
- 2) Фрагментарными подобластями (комплексы пород): модули упругости –  $E_j$ ; коэффициенты Пуассона –  $\nu_j$ .

Создание БГМ задача нетривиальная, из-за специфики специализированного программного обеспечения («*Datamine – CAE Mining, Surpac, Gemcom, Minescape, Micromine, Mineframe, Geomix, K-Mine* и др.»). В странах дальнего зарубежья (Чили, Канада, ЮАР) такие модели нашли широкое применение в горнорудной промышленности [72, 87, 88, 117]. Она по сути представляет собой упрощенный вид геологической модели с присвоенными численными параметрами, которые описывают те или иные параметры (или их комплекс) породного массива, которые важны для оценки его устойчивости. Основными исследуемыми величинами моделирования являются напряжения и деформации. Результатом моделирования является пространственное распределение тензора напряжений, деформаций и параметров, характеризующих устойчивость массива. При этом набор (как исходных, так и на выходе) параметров модели может быть достаточно разнообразным в зависимости от наличия исходных данных и поставленной задачи. Например, устойчивость может быть определена по:  $RQD$  – показатель качества пород;  $FF$  – количество трещин на метр;  $RMR$  – рейтинговые показатели по Бенявскому, Лобширу, Якубеку;  $GSI$ -Хука-Брауна;  $Q$  – по

Бартону, интенсивность напряжений, соотношения главных напряжений и др. [29, 76, 86].

Граничные условия структурной модели зависят от:

- структурной нарушенности и разломов, дискретно ограничивающих распространение геомеханических параметров в пределах крупных блоков;
- пликативной тектоники (складки, флексуры, изменение простирания пласта и пр.), предопределяющей ориентацию структурной анизотропии и направления главных напряжений;
- различными литологическими типами пород, обладающих различными физико-механическими свойствами;
- возможным наличием гетерогенности в распределении геомеханических параметров в пределах единого литологического типа;
- зонами выветривания (слабого и сильного), областями нарушенных пород как в пределах главных разломов, так и вне зоны их влияния;
- направлением главных компонент регионального поля тектонических напряжений и др.

Эти факторы должны быть в обязательном порядке учтены при построении БГМ, поскольку оказывают непосредственное влияние на геомеханические параметры.

В итоге проведенного анализа был выбран следующий состав БГМ, показанный на рис. 1.7.

Первым этапом для создания геомеханических моделей является сбор и организация данных. Данные могут быть получены или из уже имеющегося архивного материала или собраны непосредственно в полевых условиях.

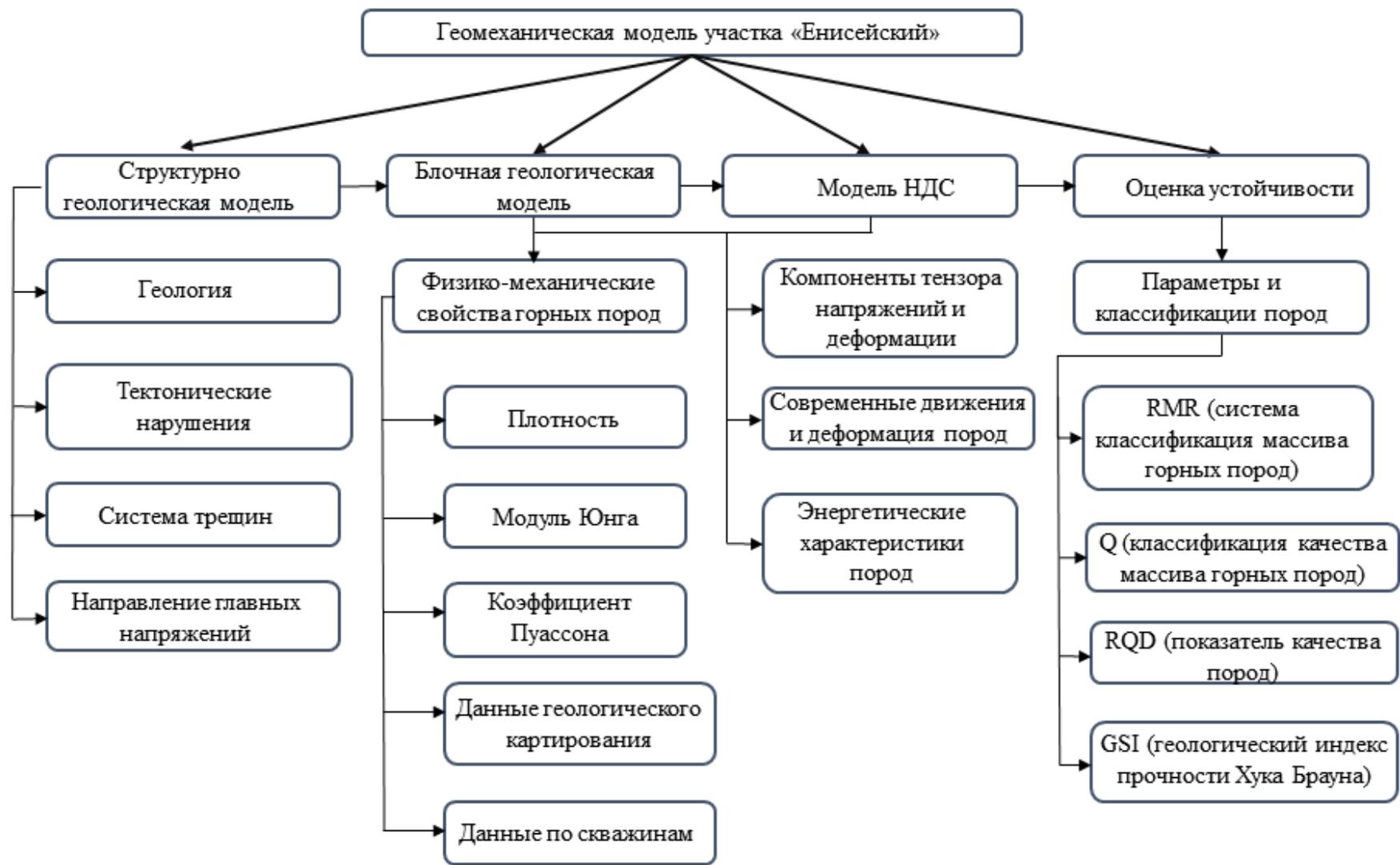


Рисунок 1.7 – Компоненты геомеханической модели участка «Енисейский»

Для каждой задачи имеется конкретный перечень исходных данных. В работе [81] предлагается следующий перечень данных:

- информация о литологических типах и сопутствующих геологических особенностях: трещиноватость, выветрелость, измененность, минералогические особенности и др.;

- карты, разрезы, погоризонтные планы;
- топографическая поверхность (рельеф);
- модели крупных разрывных нарушений;
- данные геологической съемки поверхности, изучения керна скважин, данные из подземных выработок.

«Геотехническая документация керна и выходов массивов горных пород (на земной поверхности и в стенках выработок) позволяет получить следующие инженерно-геологические показатели» [81]:

- глубина интервалов при документировании керна;
- показатель качества породы (*RQD*);
- состояние породы (выветрелость/изменение по сложению и составу);
- обводненность породы;
- прочность ненарушенного материала (твердость скальной породы или грунта - прочность *ISRM*);
- количество систем трещин;
- свойства трещин.

После этого необходимо провести классификацию и структурирование имеющихся данных для описания инженерно-геологических условий и характеристик породного массива.

На основе них создается база данных скважин, включающий геологические и инженерно-геологические показатели. Производится анализ базы данных и визуализация. Анализ геологических данных выполняется путем выделения тектонических структур и систем трещин,

а также выделением тектонических и геологических доменов. Затем производится каркасное моделирование, литологических разностей (типов пород), основных структур (разрывные нарушения) и даек.

На основе созданной геологической каркасной модели строится блочная геологическая модель, которая включает в себя:

- литологические разности;
- физико-механические свойства пород;
- тектонические нарушения;
- основные системы трещин.

Блочная геомеханическая модель создается на основе каркасной модели. В блочную геомеханическую модель также вносятся рейтинговые показатели ( $RMR$ ,  $Q$ ,  $RQD$  и т.д.). Главной особенностью блочной геомеханической модели является выделение структурно нарушенных зон, в том числе зон динамического влияния разломов.

«Важность учета в моделях направлений и величин компонент главных тектонических напряжений можно проиллюстрировать на примере изучения напряжений в ПИЛ «АЕСЛ» (Канада)» [82] (рис. 1.8). На левом графике рисунка показаны горизонтальные напряжения, полученные в ПИЛ «АЕСЛ» (Канада) различными методами для интервала глубин от 0-950 м. Была зафиксирована важнейшая особенность их распределения, состоящая в резком увеличении абсолютных значений напряжений в интервале глубин от 250 до 300 м. Выяснилось, что она связана с пологопадающим под углом  $30^{\circ}$  разломом  $FZ-2$ . Причем, по сравнению с экспериментальной зависимостью, полученной для Канадского щита, этот перелом существенен. Такая же особенность зафиксирована и для главных напряжений на правом графике рис. 1.8. Градиент напряжений, которые возрастают с 20 до 55 МПа на интервале 50-70 м очень велик и может инициировать негативные

геомеханические процессы в приконтурной части выработок ПИЛ.

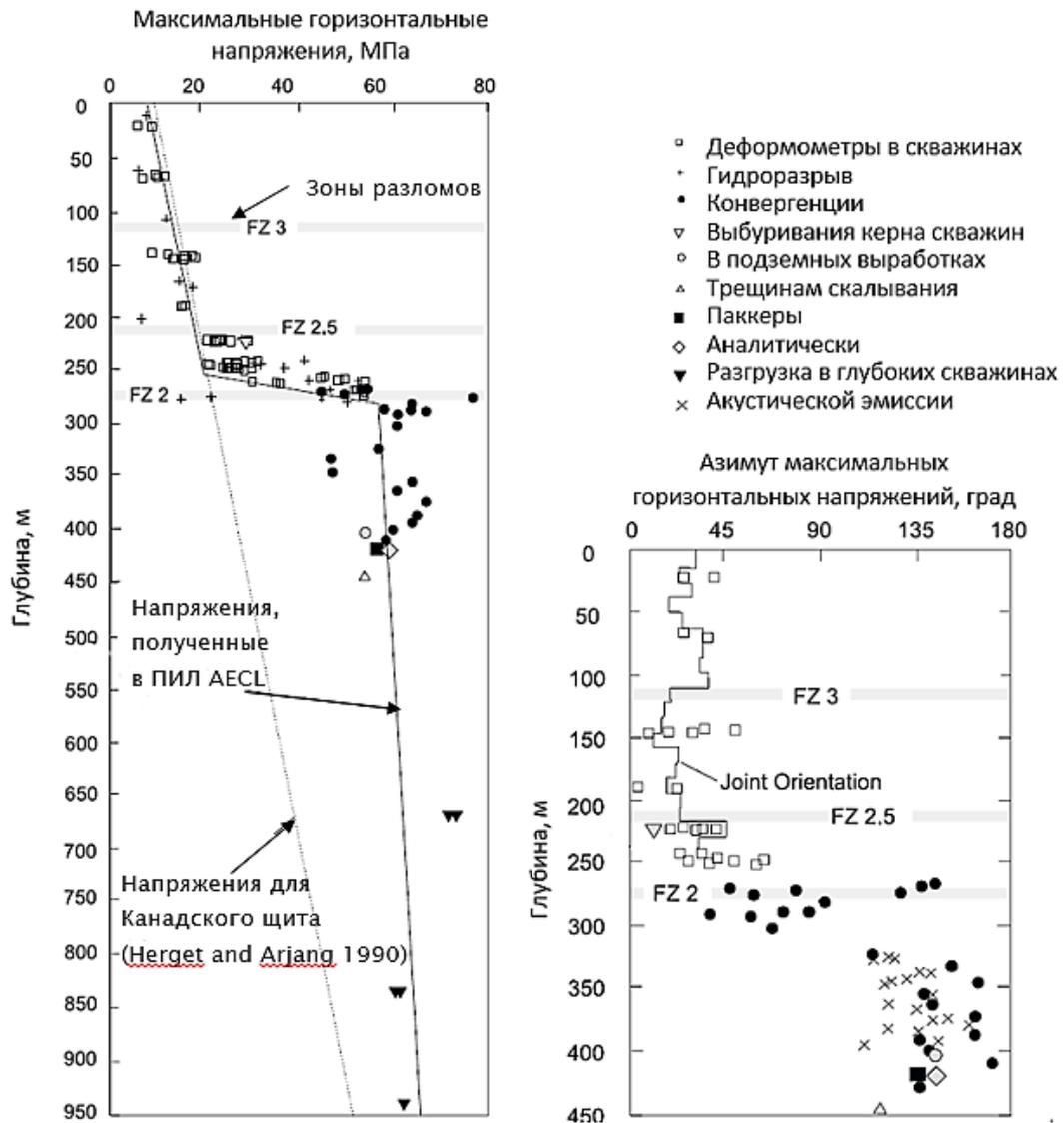


Рисунок 1.8 – Пример, характеризующий изменение максимальных величин напряжений и направления действия главных напряжений в зоне динамического влияния разлома (по вертикали) по данным различных методов в ПИЛ «АЕСЛ» (Канада) [82]

*Верификация модели.*

Ориентация блоков в БГМ внутри соответствуют особенностям геологического строения исследуемого участка. Совпадение границ блоков и исходных каркасов, а также характер распределения разностей

подтверждает соответствие параметром поискового эллипса и выбранной схемы интерполяции.

#### *Численное моделирование НДС.*

Объёмная твердотельная модель, состоящая из необходимого для поставленных задач числа доменов, строится в среде CAD. Размеры модели должны превышать размеры анализируемой области для отсутствия влияния краевых эффектов.

Тектонические нарушения представляют собой объемную фигуру с определённой мощностью. Построенная модель из среды CAD послойно экспортируется в программный продукт для численного моделирования. После чего строится конечно-элементная сеть и задаются физико-механические свойства. Каждому блоку прикладываются граничные условия (гравитационные и тектонические силы). После проделанных подготовительных операций запускается расчет модели. Затем производится верификация модели, по направлениям главных напряжений, количеству элементов или известным деформациям (конвергенциям).

Под моделью геологических тел подразумевается каркасная или блочная модель с минимальной представительностью элементов (рис. 1.9). Основной акцент в современных ГИС ставится на адекватном пространственном отображении моделей [65]. В большинстве из них в виде отдельных модулей реализована возможность построения схем тектонических нарушений, опираясь на результаты изучения керна, и геолого-технологических исследований скважин [66].

«Современные программно-аппаратные средства позволяют в рамках создаваемой 3D-модели насыщать и объединять огромные информационные массивы разнородных данных, в результате чего появляется возможность объемного моделирования» [65].

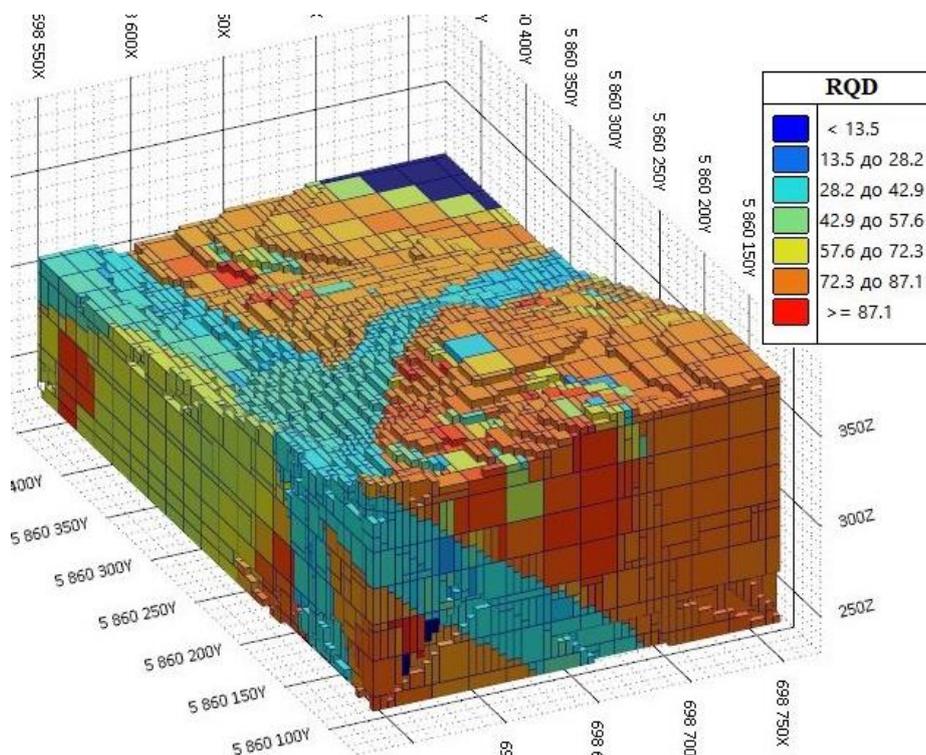


Рисунок 1.9 – Блочная модель по данным *RQD* (в системе ГИС *Micromine*)

В универсальных системах проектирования (*AutoCAD, SolidWorks* и др.) хорошо реализуется ядро геометрической обработки и твердотельного моделирования. «Программные комплексы инженерного анализа методом конечных элементов (*COMSOL Multiphysics, PLAXIS, CAE Fidesys, Abaqus, RFEM, SigmaGT, ANSYS, NASTRAN* и др.) предоставляют достаточно полный функциональный набор для инженерных расчетов, включая моделирование напряженно-деформированного состояния, НДС собственных частот и форм колебаний, механики деформируемого твердого тела, но ограничены в инструментах интерактивного построения или изменения модели» [25].

При моделировании определяется распределение компонент тензора напряжений для вариаций направления силового воздействия и других граничных условий, чтобы выяснить пределы их изменения. Определяются зоны консолидации напряжений, где возможны

негативные проявления горного давления. Для моделирования НДС в 3D постановке многими исследователями применяется программный комплекс *COMSOL Multiphysics*.

Таким образом, анализ методик и программных средств моделирования НДС позволил выбрать для моделирования НДС оптимальный программный комплекс:

- ГГИС *Micromine* для создания каркасов по геологическим разностям и преобразования их в блочную геомеханическую модель с численными данными (различные параметры);

- *COMSOL Multiphysics* для выполнения многовариантного моделирования НДС.

## **Выводы и постановка задачи исследований**

Из результатов анализа опыта геомеханических исследований и построения моделей для оценки устойчивости породных массивов можно сделать следующие выводы:

1. Геомеханические исследования играют принципиально важную роль в обеспечении геоэкологической безопасности системы глубинного геологического захоронения РАО. Современная концепция геомеханических исследований включает в себя следующие компоненты:

- выбор контролируемых параметров;
- измерение этих параметров в натуральных условиях;
- разработку математических моделей НДС;
- оценка и прогноз устойчивости породного массива.

2. Необходимым условием решения этой задачи является обеспечение максимальной достоверности оценки напряженно-деформированного состояния породного массива, которая может быть обеспечена:

а) путем учета влияния на напряженное состояние структурных элементов породного массива;

б) использования при прогнозе геомеханических 3D-моделей.

3. Общеизвестна тесная связь деформаций породного массива и образования зон концентрации напряжений с структурными неоднородностями породного массива. Поэтому важнейшей задачей оценки развития негативных геомеханических процессов в приконтурных частях горных выработок является определение влияния разломов и трещиноватых зон на формирование высокоградиентных зон напряжений. Анализ опыта моделирования НДС на подземных объектах и горнорудных предприятиях показал, что это можно достичь только, используя трехмерные модели массива.

3. Для оценки устойчивости породных массивов при недостаточности априорной информации о породном массиве широко используются методы эмпирических классификаций массива горных пород, которые эффективно используются в горной промышленности. Главным недостатком эмпирических классификации остается пока еще недостаточная надежность, требующая определенной осторожности при применении для таких сложных объектов как ПГЗРО.

4. Системный анализ распределения полей напряжений и параметров, характеризующих устойчивость, становится возможным благодаря объединению огромных массивов разнородных данных с использованием современных программно-аппаратных средств создания 3D-моделей и существующих методических подходов. Для инженерных расчетов программные комплексы инженерного анализа методом конечных элементов, такие как Comsol Multiphysics, PLAXIS и другие, предоставляют достаточно полный функциональный набор.

Анализ результатов экспериментальных наблюдений и моделирования послужил основой для формулирования идеи

диссертационной работы - 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 доказательства гипотезы намечено решение следующих задач:

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.

## ГЛАВА 2. МЕТОДЫ, ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА ТРЕХМЕРНОЙ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Для земной коры характерно блоковое иерархическое строение. Дискретность литосферы связана со сложным сочетанием разных по знаку, направленности и интенсивности тектонических движений, которые отражены в современном строении земной коры. Порядок дискретности структурных форм в районе ПИЛ определяется из тектонической классификации структурных элементов.

*Оценка устойчивости на основе трехмерной геомеханической модели сводится к выявлению влияния различных по иерархическим уровням структурных неоднородностей и связанных с ними упруго-прочностных особенностей массива на его напряженно-деформированное состояние [122].*

Иерархичность структур среды определяет и иерархичность полей напряжений. «Предположение о подобии физических процессов является одним из наиболее полезных допущений в геодинамике, поскольку позволяет экстраполировать данные с одного масштабного уровня на другой» [93,122]. Под воздействием тектонических сил на границах блоков возникают деформации, амплитуда которых превышает на 1-2 порядка деформации внутри них. Последние, в свою очередь, приводят к концентрации напряжений в окрестностях неоднородностей. В зависимости от свойств пород, скоростей изменения напряжений и их абсолютных значений происходит разрушение пород [15, 16, 76, 115].

То есть закономерности распределения НДС определяют характер геомеханической эволюции горнотехнической системы и являются основой управления геомеханическими процессами для обеспечения безопасности. 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 вариационного (многовариантного) моделирования НДС [16, 102, 94, 113, 98]. Эти три группы факторов рассматриваются ниже.

## 2.1 Прочность горных пород

Для изучения закономерностей эволюции НДС наиболее информативно использование численных моделей, верифицируемых результатами мониторинга. «Для этого традиционно используется термин – *прочность горной породы*, определяемая величиной критических напряжений, при которых происходит ее разрушение. Горные породы имеют различную прочность, зависящую от их структуры, геологических условий образования, возраста, типа геодинамической обстановки и т. д.» [75]. Соответственно, при моделировании используются различные критерии оценки прочности пород [89, 90].

«Процесс разрушения может быть связан с образованием трещин сдвига под действием касательных напряжений величина которых достаточно полно характеризуется интенсивностью напряжений» [97]

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}{2}}, \quad (2.1)$$

и трещин отрыва под действием нормальных напряжений, уровень которых определяется шаровым тензором

$$I = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3, \quad (2.2)$$

где  $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$  – главные напряжения,  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ ).

Существует несколько теорий прочности, описывающих способность пород выдерживать механические нагрузки. «Наиболее

просто эта задача решается при одноосном напряжённом состоянии с учётом главных напряжений  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ . Условие прочности при одноосном напряжённом состоянии» [91]:

$$\sigma_1 \leq [\sigma_p] \text{ – при растяжении } (\sigma_1 > 0, \sigma_2 = 0, \sigma_3 = 0); \quad (2.3)$$

$$\sigma_3 \leq [\sigma_c] \text{ – при сжатии } (\sigma_1 > 0, \sigma_2 = 0, \sigma_3 < 0) \quad (2.4)$$

В случае двухосного и трёхосного напряжённого состояния необходимо учитывать действие всех главных напряжений, отличных от нуля. «Такому критерию соответствует *понятие эквивалентного напряжения*, которым называется напряжение одноосного растяжения элемента материала, равнопрочного тому же элементу при сложном напряжённом состоянии» [16].

1. Первая теория прочности (*гипотеза наибольших нормальных напряжений*).

«Опасное состояние возникает, когда наибольшее по модулю нормальное напряжение достигает предельного значения, соответствующего простому растяжению или сжатию» [16].

Условие прочности:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sigma_1 \leq [\sigma_p] \text{ – при растяжении } (\sigma_1 > 0, \sigma_2 = 0, \sigma_3 = 0); \quad (2.5)$$

$$\sigma_{\text{экв}} = \sigma_3 - [\sigma_c] \text{ – при сжатии } (\sigma_1 > 0, \sigma_2 = 0, \sigma_3 < 0), \quad (2.6)$$

где  $[\sigma_p]$  - допускаемое нормальное напряжение при одноосном растяжении;  $[\sigma_c]$  - допускаемое нормальное напряжение при одноосном сжатии.

«Теория дает удовлетворительные результаты лишь для некоторых *хрупких материалов* (бетона, камня, кирпича) и неприменима для пластичных материалов» [16, 91].

2. Вторая теория прочности (*гипотеза наибольших относительных удлинений*).

«В этой теории в качестве критерия разрушения принято наибольшее по модулю относительное удлинение  $\varepsilon$ . Опасное состояние

материала наступает тогда, когда наибольшее относительное удлинение достигает опасного значения» [16, 91].

Условие прочности:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3) \leq [\sigma], \quad (2.7)$$

где  $[\sigma]$  - допускаемое нормальное напряжение;  $\mu$  - коэффициент Пуассона.

3. Третья теория прочности (*гипотеза наибольших касательных напряжений*).

Причиной разрушения материала считается сдвиг, вызываемый касательными напряжениями. «Полагают, что материал разрушается, когда наибольшее касательное напряжение достигает значения, предельного для данного материала» [16, 91].

Условие прочности:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{(\sigma_z)^2 + 4\tau_{zy}^2} \leq [\sigma], \quad (2.8)$$

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

4. Четвёртая теория прочности (*энергетическая теория прочности*).

Предполагается, «что пластичный материал находится в опасном состоянии, когда удельная потенциальная энергия формоизменения достигает предельного для данного материала значения» [16].

Условие прочности:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \leq [\sigma], \quad (2.9)$$

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

5. Пятая гипотеза прочности (*теория прочности Мора*).

Она позволяет учесть различное сопротивление материалов растяжению и сжатию. Критерий Кулона-Мора основан на предположении, что прочность материала зависит только от его сцепления и угла внутреннего трения.

Условие прочности:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sigma_1 - \frac{[\sigma_p]}{[\sigma_c]} \sigma_3 \leq [\sigma_p], \quad (2.10)$$

Если  $[\sigma_p] = [\sigma_c]$ , то теория прочности Мора совпадает с третьей теорией прочности.

Формула для критерия Кулона-Мора имеет вид:

$$\sigma = C + \sigma_n \times \operatorname{tg}(\varphi), \quad (2.11)$$

где  $\sigma$  - предельная прочность материала,  $C$  - сцепление,  $\sigma_n$  - нормальное напряжение,  $\varphi$  - угол внутреннего трения.

Этот критерий широко используется в геомеханике, инженерном строительстве, геологии и других областях, где требуется оценить прочность грунтов и горных пород. Он помогает определить, насколько крепкими будут породы, если на них будет действовать определенное напряжение [16].

Моделью, получившей наибольшее распространение для описания трещиноватых горных массивов, является модель Хука – Брауна. «Модель является изотропной линейно-упругой и идеально-пластической с критерием текучести Хука – Брауна. Критерий Хука – Брауна является развитием критерия Кулона – Мора и представляет собой нелинейную зависимость между касательным и нормальным напряжениями, что позволяет более точно определить предел прочности горных пород» [77].

Согласно критерию Хука-Брауна, при наличии только трех направлений главных напряжений порода будет разрушаться в том

случае, если максимальное значение из трех главных напряжений достигнет критического, которое зависит от прочности породы в растяжении и сжатии [78]. Этот критический уровень напряжения определяется выражением:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \times \left( m_b \times \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a, \quad (2.12)$$

«где  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  – главные максимальные и минимальные напряжения, МПа;  $\sigma_{ci}$  – прочность на одноосное сжатие ненарушенной породы, МПа;  $m_b, s, a$  – постоянные Хука-Брауна, которые определяются по формулам» [77]:

$$m_b = m_i \times \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14 \times D}\right); \quad (2.13)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3 \times D}\right); \quad (2.14)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \times \left( e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right), \quad (2.15)$$

где  $m_i$  – параметры нарушенной породы;  $GSI$  – геологический индекс прочности;  $D$  – коэффициент техногенной нарушенности массива;  $e$  – основание натурального логарифма. Параметры  $m_i, GSI, D$  определяются эмпирически (рис. 2.1).

В табл. 2.1. приведены значения предельной прочности ненарушенного образца скальной породы при отсутствии бокового давления.

Зоны разломов характеризуют нарушенность пород и могут инициировать опасные геомеханические процессы. Разломные зоны также являются потенциальными путями для миграции нуклидов за пределы санитарной зоны ПГЗРО. Поэтому влияние динамических зон разломов обязательно необходимо учитывать в моделях.



Таблица 2.1 - Значения предельной прочности ненарушенного образца скальной породы при отсутствии бокового давления [91]

Скальная порода		Полевая идентификация	Диапазон, МПа
Крайне прочная	Кремень, диабаз, невыветрелый базальт, гнейс, гранит, кварцит	Возможно только скалывание геологическим молотком)	>250
Очень прочная	Амфиболит, габбро-базальт, гнейс, гранодиорит, песчаник, мрамор, риолит, известняк, туф	Для разламывания требуется множество ударов геологическим молотком	100-250
Прочная	Известняк, мрамор, филлит, песчаник, сланец	Для разламывания требуется больше одного удара геологическим молотком	50-100
Умеренно (средне-) прочная	Аргиллит. уголь, бетон, сланец, алевролит	Образец можно разломать одним ударом геологического молотка, однако невозможно соскабливание его тонкого слоя перочинным ножом	25-50
Непрочная (слабая)	Мел, каменная соль	Сильный удар острием геологического молотка оставляет углубление; соскабливание тонкого слоя перочинным ножом возможно, но затруднено	5-25
Очень не прочная (очень слабая, сильно нарушенная или видоизмененная)		Сильный удар острием геологического молотка приводит к разрушению; соскабливание тонкого слоя перочинным ножом возможно	1-5
Крайне непрочная (напоминающая плотный дисперсный грунт)		Ноготь большого пальца оставляет на поверхности образца углубление	0,25-1

## 2.2. Блочность и структурная нарушенность породных массивов

Различные аспекты формирования разломно-блоковых структур рассмотрены в работах известных ученых М.А. Садовского, М.В. Раца, С.В. Гольдина, В.Г. Трифонова, Г.Г. Кочарана, Ю.Я. Ващилова, С.И. Шермана, К.Ж. Семинского, Р.М. Лобацкой и др. При моделировании НДС под тектоническим разломом понимается трехмерное тело, разномасштабно диспергированного материала и отличающееся физико-механическими характеристиками от окружающей среды. «Важнейшей характеристикой при задании граничных условий моделирования, является ширина разлома, которая характеризуется сильно (на 1-2 порядка) ослабленными физико-механическими свойствами» [102, 107].

На рис. 2.2 представлена классическая модель тектонического разлома. По обе стороны его центральной части находятся нарушенные породы, мощность которых зависит от внешнего поля напряжений и имеет размеры от сотен метров до десятков километров. Эта модель ассоциируется с зоной повышенной плотности оперяющих разломов меньшего ранга и трещиноватых пород. Подобные зоны были выделены и детально описаны в работах [93, 95] и названы зонами «динамического влияния разломов».

В настоящее время существуют 3 типа моделей тектонических разломов [93]: а) в виде упругой модели (*continuum-euclidean*); б) в виде диспергированной среды (*granular medium*); в) в виде фрактальной среды (*fractal*).

Считается, что ширина разлома зависит от его протяженности, при общей ширине зоны динамического влияния разлома  $W$ , определяемой из следующего простого соотношения [93]:

$$W = k L, \quad (2.16)$$

где  $L$  – длина разлома,  $k = 10^{-1} \div 10^{-2}$ .

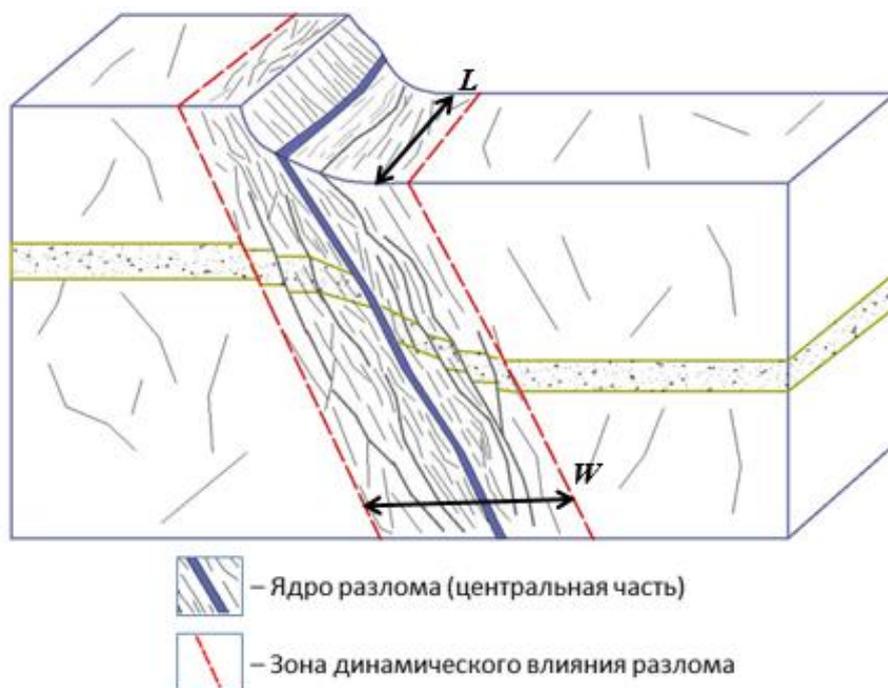


Рисунок 2.2 – Схематичное изображение строения разломной зоны.

$L$  – длина разлома,  $W$  – ширина зоны динамического влияния

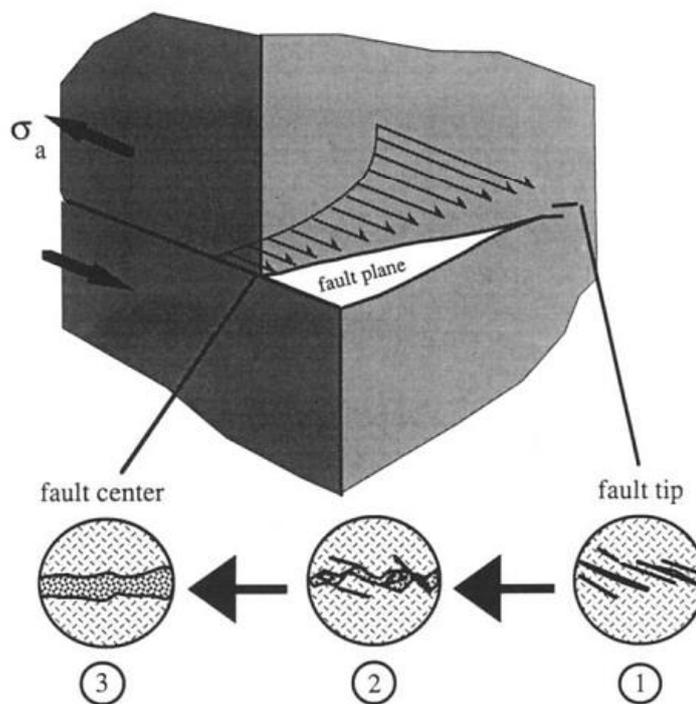


Рисунок 2.3 – Идеализированная модель сдвигового разлома по С. Scholz [96]. 1, 2, 3 – стадии развития разлома. Сила трения условно показана стрелками

Под «зоной динамического влияния разлома» понимается часть геологической среды, окружающей разлом во всех трех измерениях, где проявляются остаточные, необратимые (пластические или разрывные) и обратимые (упругие) во времени следы деформаций, а также геофизические поля, вызванные формированием разлома и подвижками по нему» [95].

В работе Scholz С. [96] на представленной идеализированной модели разлома (рис. 2.3) также акцентируется внимание на зависимость свойств разлома по длине его простирания, связанное со стадиями его эволюции.

В поздних работах других исследователей на это почти не обращается внимание. Выделяется три зоны:

1. Передовая часть – стадия образования мелких трещин;
2. Зона слияния трещин и образования разлома небольшой мощности;
3. Зрелая стадия – максимальная ширина зоны раздробленных пород.

Подчеркивается, что максимальное смещение по разлому линейно связано с его длиной. Константа пропорциональности зависит от соотношения  $(\sigma_0 - \sigma_f)/\mu$ , где  $\sigma_0$  - прочность на сдвиг,  $\sigma_f$  - сопротивление трения, а  $\mu$  - модуль упругости сдвига. Параметры  $\sigma_0$  и  $\sigma_f$  изменяются в зависимости от состава пород, а  $\mu$  - от давления.

### **2.3 Рейтинговые классификации устойчивости пород в массиве**

При проектировании подземных выработок ПИЛ должны учитываться параметры массива, определяющие его устойчивость [11-16]. На начальной стадии строительства ПИЛ, когда исходных данных о прочностных свойствах пород мало, для предварительной оценки

качества горных пород в мировой горной практике используют рейтинговые классификации, в которых устойчивость оценивают в баллах.

В приложении к задаче захоронения РАО процедура классификации состоит из следующих этапов.

*а) Зоны влияния разломов.*

Разломы классифицируются на 3 класса в зависимости от длины [62]:

Класс *A*: включает разломы с длиной в диапазоне от нескольких десятков до нескольких сотен километров;

Класс *B*: охватывает разломы с длиной от нескольких километров до десятков километров;

Класс *C*: включает разломы, длина которых измеряется в сотнях метров.

Разломам класса *A* запрещается пересекать строительную площадку ПГЗРО. Разломы класса *B* разрешены в пределах площадки, но они не должны пересекать выработки, предназначенные для захоронения РАО. Разломам класса *C* разрешается пересекать выработки, но необходимы защитные меры.

Классификация зон разломов приведена в табл. 2.2.

Таблица 2.2 - Классификация разрывных нарушений (разломов)

Класс	Длина (км)	Требование к строительству ПИЛ, ПГЗРО	Зона влияния по Шерману С.И. (м)
A	$L \geq 10$	Пересечение строительной площадки запрещено (граница лицензии).	$W > 100-500$
B	$2 \leq L \leq 10$	Пересечение выработок ПГЗРО запрещено.	$20 > W > 100$
C	$0,1 \leq L \leq 2$	Необходимо принимать определенные инженерные защитные меры.	$5 > W > 20$

б) *Геохимический индекс подземных вод.  $C_{chm}^R$*

Геохимический индекс подземных вод отражает основные химические свойства воды, такие как кислотность, щелочность, содержание солей и других химических элементов. Если химический индекс подземных вод в месте захоронения изменится, это может привести к разрушению контейнеров с РАО. В качестве показателей рассматриваются три подпараметра:  $TDS$  – содержание общих растворенных твердых веществ;  $pH$  – (кислотность/щелочность), характеризующий кислотность или щелочность воды;  $Cl$  – параметр, который указывает на концентрацию хлоридных ионов в воде. Индекс  $C_{chm}^R$  определяется по табл. 2.3.

Таблица 2.3 - Геохимический индекс подземных вод

$C_{chm}^R$	Описание химического состава подземных вод
1.0	$6 < pH < 10, TDS < 50 \text{ г/л}, Cl < 20 \text{ г/л}$
0.8	Одно из условий ( $6 < pH < 10, TDS < 50 \text{ г/л}, Cl < 20 \text{ г/л}$ ) не выполняется
0.1	Более двух из условий ( $6 < pH < 10, TDS < 50 \text{ г/л}, Cl < 20 \text{ г/л}$ ) не выполняется

Если все требования к геохимическим параметрам выполняются, то геохимическая обстановка благоприятна. Значение параметра определяется как 1.0. Если одно из этих требований не выполняется, то принимается значение 0,8. В противном случае среда рассматривается как "малопригодная", и ей присваивается индекс 0.1.

в) *Тепловой эффект.*

Вследствие распада радионуклидов вмещающие породы будут подвергаться воздействию повышенных температур в течение длительного периода времени (по различным оценкам порядка  $120-150^\circ \text{C}$  в течение более 150 лет). В условиях одновременного воздействия горного давления и тектонических напряжений это может оказать

существенное влияние на устойчивость пород. Свойства пород рассматриваются в 2-х аспектах. Величина теплопроводности может влиять на объемно-планировочные решения выработок ПГЗРО. «Другим аспектом является изменение физико-механических свойств под воздействием высокой температуры. Экспериментальные исследования в работе» [23, 99] подтвердили, что высокая температура может привести к значительному снижению механической прочности горных пород. В данной работе индекс теплового эффекта  $C_T^R$  определяется как отношение прочности при одноосном сжатии при максимальной температуре ( $\sigma_{cd}^{Tmax}$ ) к значению прочности при комнатной температуре ( $\sigma_{cd}$ ) в интервале от 0 до 1:

$$C_T^R = \frac{\sigma_{cd}^{Tmax}}{\sigma_{cd}}, \quad (2.17)$$

Предлагается использовать средневзвешенное значение индекса  $C_T^R$  в случае, если присутствуют несколько типов пород. Например, если на участке присутствуют гранит и гнейсы в соотношении 30% и 70% соответственно, то индекс  $C_T^R$  рассчитывается с использованием формулы:

$$C_T^R = 0.3C_{T,гранит}^R + 0.7C_{T,гнейс}^R, \quad (2.18)$$

г) *Q-индекс качества породного массива по Н. Бартону.*

Согласно исследованиям, проведенным в подземной лаборатории «Aspo» (Швеция) [68] было выявлено, что параметры коэффициента релаксации напряжений ( $SRF$ ) и обводненности пород  $J_w$  не являются подходящими для оценки устойчивости массива при подземной изоляции РАО. Исходя из этого, в системе оценки пригодности массива пород для захоронения РАО принято использовать произведение четырех параметров, обозначаемое как  $Q'$  и определяемое по формуле:

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a}, \quad (2.19)$$

где  $RQD$  – индекс качества горных пород;  $J_n$  – показатель количества систем трещин;  $J_r$  – показатель шероховатости поверхностей стенок трещин;  $J_a$  – показатель выветрелости трещин.

Индекс качества горных пород  $RQD$  предложенный в 1964 г. Диром [36, 101], характеризующий их структурную нарушенность, рассчитывается по формуле:

$$RQD = \frac{L_\Sigma}{L} \times 100\%, \quad (2.20)$$

где  $L_\Sigma$  – сумма расстояний между естественными трещинами на исследуемом участке обнажений длиной более 10 см, м;  $L$  – общая длина исследуемого участка, м.

д) *Индекс гидравлической проводимости пород  $J_w^R$*

Гидравлическая проводимость (скорость жидкости через поры и трещины) играет важную роль, т.к. в случае разрушения инженерных барьеров определяет скорость выноса радионуклидов в окружающую среду [100]. В данном случае это река Енисей. Она зависит от проницаемости, насыщения, плотности и вязкости жидкости. Индекс  $J_w^R$  определяется следующим образом:

$$J_w^R = \begin{cases} 1.0 & \text{Если } (K < 10^{-8} \text{ м/сут}) \geq 90\% \\ 0.7 & 70\% \leq \text{Если } (K < 10^{-8} \text{ м/сут}) < 90\% \\ 0.3 & 30\% \leq \text{Если } (K < 10^{-8} \text{ м/сут}) < 70\% \\ 0.1 & \text{Если } (K < 10^{-8} \text{ м/сут}) < 30\% , \end{cases} \quad (2.21)$$

где  $K$  – удельная гидравлическая проводимость (или водопроницаемость) горных пород.

ж)  $SRF^R$  – индекс отношения при одноосном сжатии к максимальному главному напряжению.

Механическая устойчивость выработок в основном зависит от соотношения прочности и действующих напряжений в массиве пород [26, 28]. Обычно это оценивается по отношению прочности при одноосном сжатии  $\sigma_{UCS}$  к максимальному главному напряжению  $\sigma_1$ . Это отношение используют в качестве коэффициента запаса прочности ( $SRF^R$ ) [29]. В соответствии с классификацией устойчивости Бартона он определяется по формуле:

$$SRF^R = \begin{cases} 0.5 & \text{(Если } (\sigma_{сж}/\sigma_1 > 5) \geq 90\%) \\ 1 & 70\% \leq \text{Если } (\sigma_{сж}/\sigma_1 > 5) < 90\% \\ 5 & 40\% \leq \text{Если } (\sigma_{сж}/\sigma_1 > 5) < 70\% \\ 20 & \text{(Если } (\sigma_{сж}/\sigma_1 > 5) < 40\%) \end{cases} \quad (2.22)$$

где  $\sigma_{сж}$  – прочность пород при одноосном сжатии,  $\sigma_1$  – максимальное напряжение в массиве.

В качестве оценки устойчивости массива представлена классификация горных пород на основе  $Q$ -системы по Н. Бартону, но адаптированная под особенности подземной изоляции РАО. Оценочный индекс устойчивости вмещающих пород включает в себя факторы теплового воздействия, химического состава подземных вод и водопроницаемость вмещаемого массива. Модернизированная система  $Q^R$  определяется формулой:

$$Q^R = C_{chm}^R \times C_T^R \times \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w^R}{SRF^R}, \quad (2.23)$$

где  $C_{chm}^R$  – индекс химического состава подземных вод;  $C_T^R$  – тепловой эффект;  $J_w^R$  – гидравлическая проводимость;  $SRF^R$  – индекс, характеризующий отношения прочности к напряжению.

В итоге была составлена классификация пород по индексу  $Q^R$ , представленная в табл. 2.4, по которой в представленной ниже

геомеханической модели породный массив будет делиться на определенные классы устойчивости.

Таблица 2.4 – Категория устойчивости массива горных пород по модифицированной системе  $Q^R$

$Q^R$	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

#### **2.4 Методика анализа напряженно-деформированного состояния массива на основе энергетического подхода**

В численных моделях главной особенностью распределения полей напряжений является образование зон концентрации напряжений, связанных с различиями сопротивляемости деформированию различных типов горных пород и тектоническими разломами. В работах И.Ю. Колесникова [16, 69, 102] «для анализа таких зон на предмет опасности разрушения предложено использовать энергетический подход». Физически он основан на положении, что для зарождения разрушения требуется определенная потенциальная энергия деформации. Одновременно с концентрацией напряжений на одних участках 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» [86, 102].

Энергетический подход включает решение ряда задач. Во-первых, необходимо иметь адекватные критериальные характеристики степени опасности НДС (связанные с прочностью пород). Затем, «определить соответствующие им уровни опасности НДС и наконец, путем сопоставления значений уровней опасности произвести анализ и ранжирование участков по убыванию соответствующего им уровня опасности НДС» [102]. В разработанной методике оценки опасности потери устойчивости породного массива по результатам трехмерного моделирования НДС использован этот подход.

Главный его «принцип – выявление зон с наиболее опасным НДС (принцип «наиболее слабого звена» [102]), т. к. как на основе условия превышения локальных характеристик НДС их среднего значения, после анализируются только те участки (структурные блоки), которые попадали в этот разряд». «Для анализа используются параметры, которые связаны с сопротивлением структурно-тектонического блока (СТБ) его возможному разрушению, а именно - *накопленная потенциальная энергия деформации* и *величина модуля градиента энергии*, как меры наибольшего убывания энергии по направлению, противоположному направлению градиента энергии» [86]. А также *девиаторную составляющую* энергии - потенциальную энергию формоизменения [103].

То есть используются три дополняющих друг друга энергетических критерия:

- а) потенциальной энергии деформации;
- б) модуль градиента энергии;
- в) потенциальная энергия формоизменения.

Формулы для потенциальной энергии и ее составляющих, связанных с изменением формы и объема, имеют следующий вид для 3D моделей:

$$U = U_{dev} + U_{dil}, \quad (2.24)$$

$$U_{dev} = \frac{1 + \nu}{3E} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + \frac{1}{3G} (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2), \quad (2.25)$$

$$U_{dil} = \frac{1 - 2\nu}{6E} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)^2, \quad (2.26)$$

где  $U_{dev}$ ,  $U_{dil}$  - девиаторная и шаровая составляющая энергии, соответственно;  $\nu$  - коэффициент Пуассона;  $\sigma_i$  - интенсивность напряжений;  $E$  - модуль упругости;  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  - компоненты тензора напряжений.

«В качестве обобщенного критерия предлагается использование интенсивности напряжений  $\sigma_i$ , представляемой в виде полей в трехмерном объеме. Размер участка «Енисейский» имеет размер в плане 2 на 3 км и глубиной 1000 метров» [110]. В [16] «показано, что с учетом средних свойств горных пород средняя интенсивность напряжений, на ненарушенных участках составляет 24-26 МПа, а на локальных участках массива расчетные значения  $\sigma_i$  превышают 70-80 МПа».

Прежде всего, надо выделить относительно «устойчивые» и «неустойчивые» участки массива. Условие обеспечения прочности согласно этой теории, записывается для обобщенного объемного напряженного состояния в виде [14, 16]:

$$\sigma_i(x, y, z)_j = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2} \sigma_x^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \leq [\sigma]_j, \quad (2.27)$$

где  $\sigma_i$  - интенсивность напряжений;  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  - компоненты тензора напряжений;  $[\sigma]_j$  - величина допускаемого напряжения для материала  $j$  –

горной породы (здесь эта величина соответствует «безопасному» напряженному состоянию в породе);  $(x, y, z)_j$  - координаты центра блока.

«Компонента  $\sigma_z$  фактически равна  $\gamma H$ , т.е. весу налегающей толщи горных пород. Для глубины захоронения, равной  $\sim 500$  м величина  $\gamma H$  заключена в интервале 12-15 МПа. Учитывая это горизонтальные напряжения  $\sigma_x, \sigma_y$  задаются с учетом коэффициента бокового отпора,  $k = 1/3 \gamma H$ » [102].

По сути, это совокупность трех энергетических характеристик, соответствующих энергетическому вектору (см. рис. 2.4):

$$\vec{E} = \{E_1, E_2, E_3\} = \{U_{dev}, U_{dil}, |grad U|\}. \quad (2.28)$$

Для 3D моделей используются концентрационные критерии в следующем виде.

1. *Концентрация потенциальной энергии формоизменения*, определяемая как отношение локального значения энергии формоизменения в блоке к ее вычисленному среднему значению:

$$\alpha(x, y) = \frac{U_{dev}}{\langle U_{dev} \rangle^{\Omega^{(k)}}}, \quad (2.29)$$

где  $U_{dev}$  – девиаторная компонента энергии;  $\langle U_{dev} \rangle^{\Omega^{(k)}}$  – среднее арифметическое этих компонент энергии по множеству блоков  $\Omega^{(k)}$  ( $k = 1, 2$ ).

«Функция отражает концентрацию девиаторной компоненты энергии, обусловленную неоднородностью механических свойств гетерогенной модели массива» [102].

2. *Концентрация потенциальной энергии деформации* – как отношение локального ее значения к среднему:

$$\beta(x, y) = \frac{U}{\langle U \rangle_{\Omega^{(k)}}}, \quad (2.30)$$

где  $U$  - потенциальная энергия в центре блока;  $\langle U \rangle_{\Omega^{(k)}}$  - среднее арифметическое значений энергии в центрах блоков  $\Omega^{(k)}$  ( $k = 1, 2$ ).

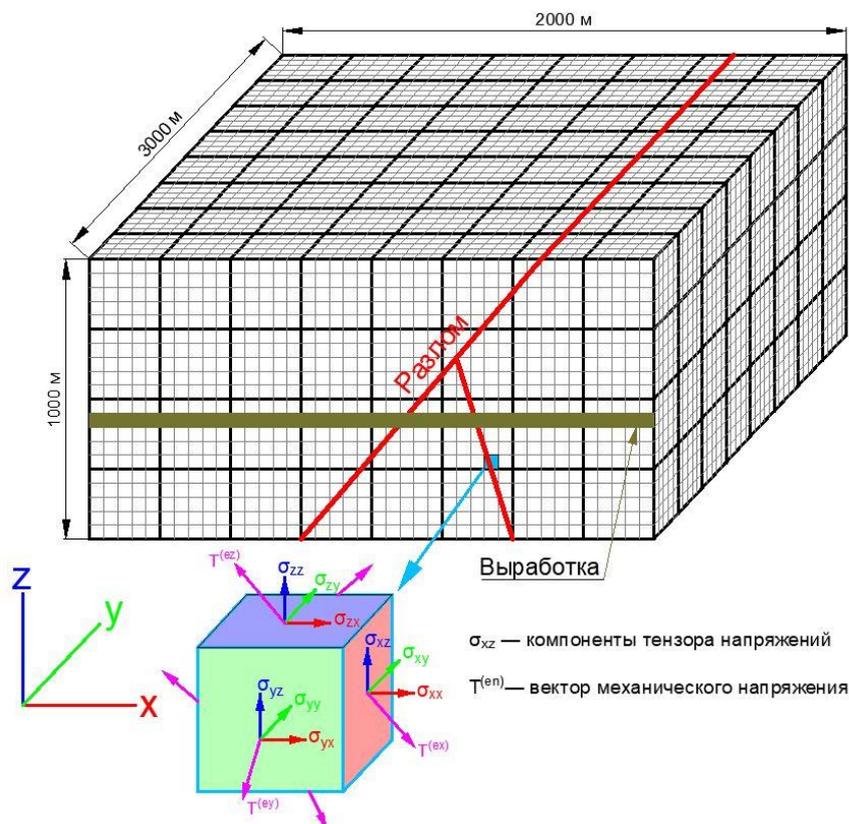


Рисунок 2.4 – К расчету энергетического вектора  $\vec{E}$

3. «Концентрация наибольшего убывания энергии, определяемая как отношение локальной величины модуля градиента к вычисленному ее среднему значению» [102]:

$$\gamma(x, y) = \frac{|\text{grad } U|}{\langle |\text{grad } U| \rangle_{\Omega^{(k)}}}, \quad (2.31)$$

где  $|\text{grad } U|$  - модуль градиента энергии;  $\langle |\text{grad } U| \rangle_{\Omega^{(k)}}$  - среднее арифметическое этих значений в центрах СТБ множества  $\Omega^{(k)}$  ( $k = 1, 2$ ).

4. «Для того, чтобы учесть все составляющие концентрации энергии по вектору  $\vec{E}$ , введем параметр, который назовем *концентрацией интенсивности энергии*» [102]:

$$\delta(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2} \quad (2.32)$$

Заметим, «что осреднения в приведенных формулах производятся отдельно для случаев малых ( $k = 1$ ) и больших ( $k = 2$ ) напряжений, поскольку эти случаи характеризуют различные величины НДС» [86, 102].

Практическая реализация подхода к решению практической задачи об оценке устойчивости породного массива на участке «Енисейский» представляет следующие шаги.

1. На основе структурной модели строится конечноэлементная модель.

2. С помощью программного комплекса *COMSOL* производится расчет НДС.

3. «На основе теории удельной потенциальной энергии формоизменения производится сортировка блоков на два непересекающихся множества, характеризуемых большими ( $\sigma_i > [\sigma]$ ) и малыми ( $\sigma_i \leq [\sigma]$ ) напряжениями» [86]. «Целесообразность такой сортировки обусловлена теоретической и экспериментальной базой, заложенной в теориях прочности, описанных выше» [102].

4. «Вычисление потенциальной энергии формоизменения, потенциальной энергии деформирования, наибольшего убывания потенциальной энергии (модуля градиента энергии)»;

5. «Вычисление суммарной концентрации интенсивности энергии, как основной оценки склонности СТБ к разрушению»;

6. «Определение направления, по которому потенциальная энергия деформации убывает наиболее быстро»;

7. «Ранжирование блоков модели по убыванию уровня опасности НДС»;

8. «Выявление «опасных» зон для последующего исследования инструментальными и геологическими методами».

## **Выводы по главе 2**

1. Каждый из критериев, применяемых в механике горных пород для описания НДС имеет свои преимущества и недостатки, и выбор зависит от условий задачи. Критерий Кулона-Мора применяется в большинстве случаев, так как он является достаточно простым в использовании и обладает высокой точностью в большинстве практических задач. Критерий Хука-Брауна применяется для описания деформационной прочности пород с трещинами, так как он учитывает влияние на прочность породы наличия таких дефектов. Это особенно важно для задач, связанных с инженерным проектированием и строительством, где трещиноватость породного массива может оказывать существенное влияние на его механические свойства.

2. Разломные зоны оказывают существенное воздействие на геомеханические процессы и миграцию радионуклидов. Разнообразные модели разломов: упругая, диспергированная и фрактальная, - позволяют учитывать различные геомеханические условия и свойства пород. Включение динамических характеристик разломов, таких как ширина (зона динамического влияния), для разных типов разломов и пород способствует более точной оценке их поведения и возможных последствий. Такой подход позволяет лучше понять воздействие разломных зон на устойчивость.

3. В рамках оценки пригодности участка для захоронения РАО представлена процедура классификации, которая состоит из двух этапов. На первом этапе осуществляется исключение определенных разломов и их воздействия в пределах возможной площадки, а также снижение влияния других разрывных нарушений. На втором этапе производится оценка пригодности выбранных потенциальных площадок для безопасного захоронения РАО. Для оценки устойчивости породного массива в работе используются рейтинговые классификации горных

пород. Установлены параметры, влияющие на безопасность долгосрочного захоронения РАО, такие как: разрывные зоны, химический состав подземных вод, тепловое воздействие, гидравлическая проводимость, соотношение между прочностью пород и действующими напряжениями и др. В результате их анализа было принято решение использовать рейтинговую классификацию  $Q^R$  для оценки устойчивости массива в районе строительства ПИЛ.

4. При численном моделировании НДС породных массивов важно ранжировать зоны концентрации напряжений по степени опасности. Для этого целесообразно использовать энергетический подход, основанный на расчете потенциальной энергии деформации и модуля градиента энергии. Путем их анализа определяется уровень опасности НДС и выполняется классификация структурных блоков по устойчивости.

## **ГЛАВА 3. СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УЧАСТКА «ЕНИСЕЙСКИЙ»**

### **3.1 Структурно-тектоническая характеристика участка «Енисейский»**

Нижне-Канский массив расположен в зоне активного орогенеза на стыке двух крупных структур – юго-западной части Енисейского кряжа (Ангаро-Канский антиклинорий) и юго-восточного окончания Западно-Сибирской плиты (Чулымо-Енисейский прогиб). Его современное напряженное состояние определяется тектоническим взаимодействием этих структур [11, 13].

Участок «Енисейский» имеет размеры около 3х2 км и расположен на западной границе Нижне-Канского массива во вмещающих докембрийских толщах гнейсов и гранитогнейсов (рис. 3.1). Такие зоны, как правило, отличаются повышенной трещиноватостью. Породы также представлены многочисленными дайками метаморфизованных магматических пород основного состава [14].

Восточный край участка отсекается древним Правобережным разломом сбросового характера. Он формирует северо-восточный склон Атамановского хребта. Максимальная амплитуда сброса, составляет 400—580 м при длине около 20 км [13]. Амплитуда послеюрского смещения оценивается в 300 м. Разлом был подновлен на новейшем этапе и активен в голоцене по настоящее время. Об этом свидетельствуют данные повторного высокоточного геодезического нивелирования, согласно которым современные движения по разлому составляют 1 мм/год [11]. Ширина зоны динамического влияния Правобережного разлома по результатам геологических и геофизических изысканий варьируется от 300 м до 3 км [14, 106].

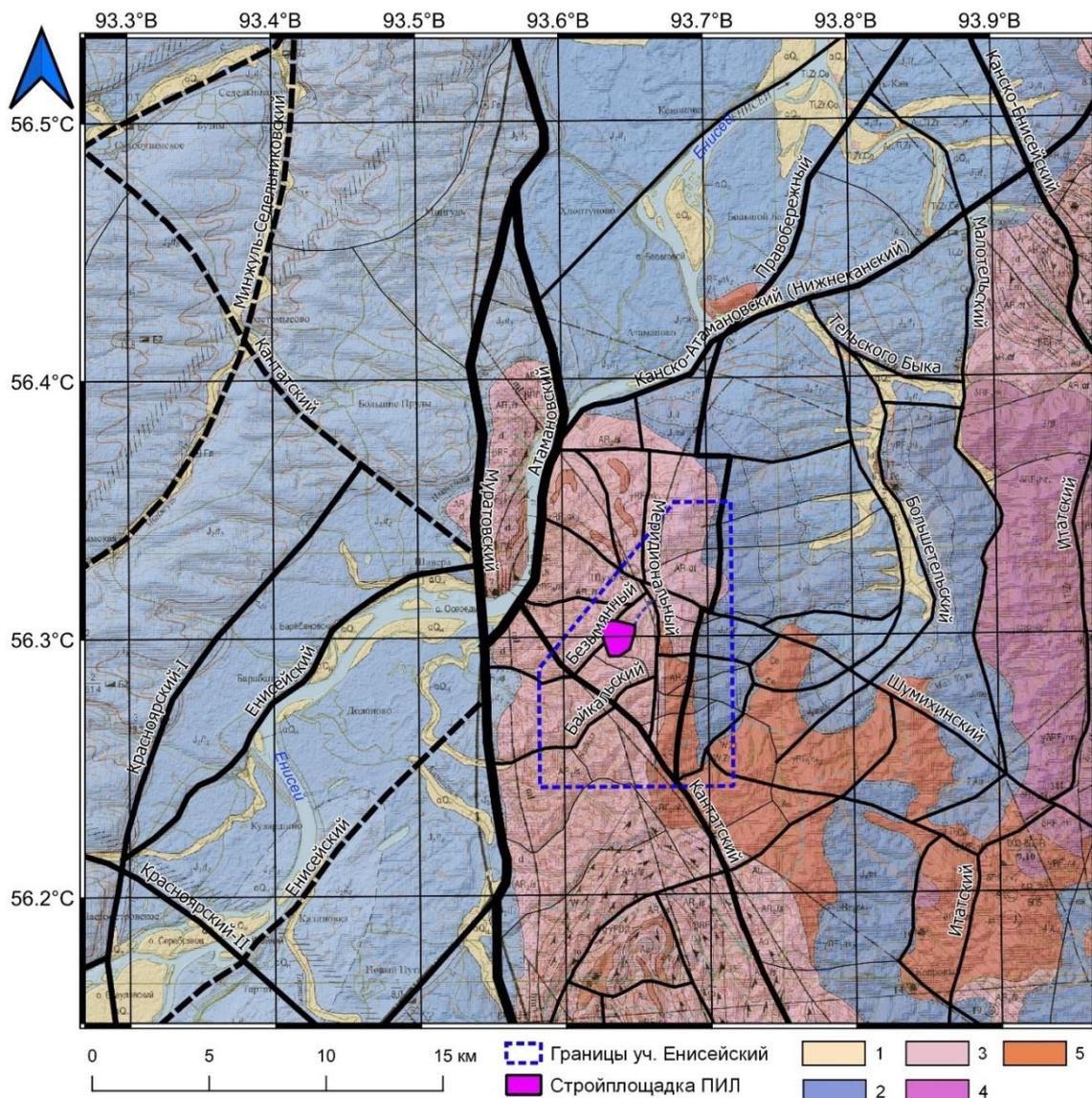


Рисунок 3.1 – Геологическая схема района размещения ПГЗРО. Толстые черные линии – главные разломы, черные линии средней толщины – региональные разломы, тонкие черные линии – локальные разломы, черные пунктирные линии – предполагаемые разломы. 1 – аллювиальные отложения поймы (галечники, пески); 2 – юрские отложения (песчаники, алевролиты, аргиллиты); 3 – раннеархейские гнейсы атамановской серии; 4 – позднерифейские диориты и гранодиориты; 5 – позднерифейские граниты

В северной части расположен Шумихинский субширотный сдвиг, отделяющий пониженный структурный блок от центральной части

участка. Эти два разрывных нарушения делят участок на три разновысотных структурных блока. Помимо названных, при анализе морфологических особенностей рельефа имеют четкое выражение более мелкие разломы и трещины. В 2—3 км к западу от границы участка проходит активный Муратовский разлом, который считается современной границей Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты. При этом плита опускается, а платформа медленно вздымается. Суммарная амплитуда вертикальных смещений по разлому превышает 3 мм/год. Это подтверждается результатами наблюдений на геодинимическом полигоне с использованием ГНСС [16].

Разрывные нарушения северо-восточного простирания являются, по-видимому, локальными внутриблоковыми структурами, среди которых выделяются как взбросы и сбросы, так и нарушения неустановленной морфологии. Разрывные нарушения северо-западного и северо-восточного простираний объединяются в одну группу крутопадающих молодых структур, в которой северо-западные являются правосторонними, а северо-восточные – левосторонними сдвигами [104]. Все нарушения сопровождаются трещиноватостью в пределах зоны динамического влияния. Средняя ширина зон влияния оценивается в 0.7-1.3 км для каждого из крыльев разломов (кроме Муратовского) [107, 108].

### **3.2 Исследование трещиноватости и динамических зон разломов**

Для задания граничных условий моделей в полевой период 2021-2022 годов выполнена геотехническая документация скальных обнажений пород. Был определен показатель качества пород RQD (методом треугольника на скальном обнажении), проведена съемка трещин обнажений для получения стереограмм и определены параметры индекса качества массива Q по Н. Бартону [35]. Измерения трещин проведены на 15 геологических площадках.

Для дифференциации категорий устойчивости горных пород площадки выбирались равномерно в различных геологических условиях. Подробно изучалась зона динамического влияния Муратовского разлома, на расстоянии до 1 км от него были выполнены измерения на четырех геологических площадках. Еще 3 площадки были выбраны на удалении от местных тектонических нарушений в массивах, не нарушенных интрузивными телами даек. Пять площадок исследований соответствовали разрывным нарушениям местного масштаба – Атамановский, Правобережный, Канско-Атамановский, Кантатский, Шумихинский, Меридиональный, Байкальский, Студейный, и Безымянный разломы. Еще 4 площадки были описаны в ходе рекогносцировочных маршрутов, в которых были зафиксированы интрузивные комплексы даек метадолеритов. Установлено, что имеется два генетических типа трещин (подтверждают выводы [16]):

1. Контракционные, связанные с внутренними напряжениями в горных породах, возникшими при их остывании и уменьшении объёма (рис. 3.2);

2. Тектонические поздненаложенные, возникшие при воздействии внешних тектонических усилий (рис. 3.3).



Рисунок 3.2 - Контракционная трещиноватость в гранитах Нижне-Канского массива (берег р. Кан)

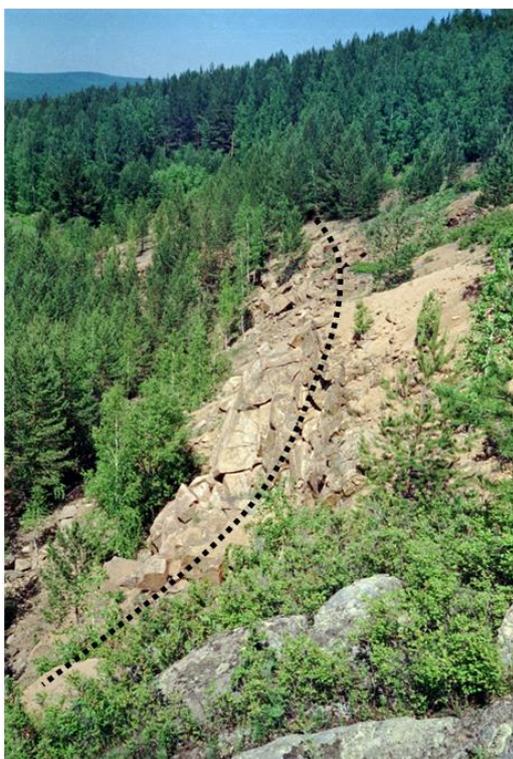


Рисунок 3.3 - Линейная трещинная зона, возникшая в результате наложенных тектонических процессов

На рис. 3.4 показаны фото определения *RQD* в массиве в полевых условиях.



Рисунок 3.4 – Геотехническая документация скальных обнажений

Для контракционных трещин в гранитах массива характерна классическая трещиноватость, типичная для многих гранитных плутонов. В теле гранитов развиты, прежде всего, две крутые и одна пологая, субгоризонтальная системы, которые формируют матрацевидную отдельность [16].

На рис. 3.5 приведены стереограммы трещиноватости пород Нижне-Канского массива в зонах динамического влияния Муратовского и Безымянного разломов.

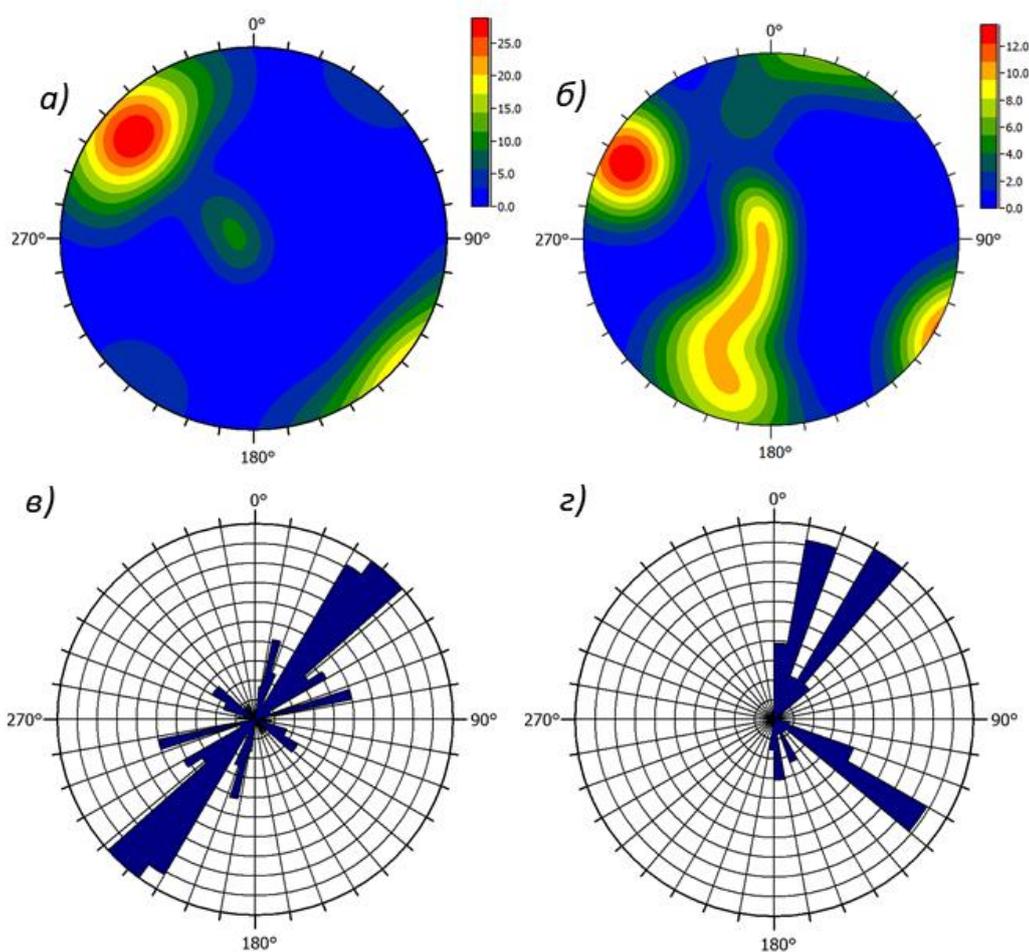


Рисунок 3.5 – Диаграммы трещиноватости (стереограмма трещиноватости верхняя полусфера) пород Нижне-Канского массива в зонах динамического влияния Муратовского (а) и Безымянного (б) разломов. Розы-диаграммы трещиноватости в зоне динамического влияния Муратовского (в), и Безымянного разломов (г)

Статистическая обработка результатов измерений показала, что трещины в зоне динамического влияния Муратовского разлома имеют северо-восточное направление около  $30^\circ$  и  $50^\circ$ , соответственно (рис. 3.5а, в), а трещины в зоне динамического влияния Безымянного разлома северо-восточного – юго-западного и юго-восточного – северо-западного направлений (около  $10^\circ$  и  $130^\circ$  соответственно) (рис. 3.5б, г).

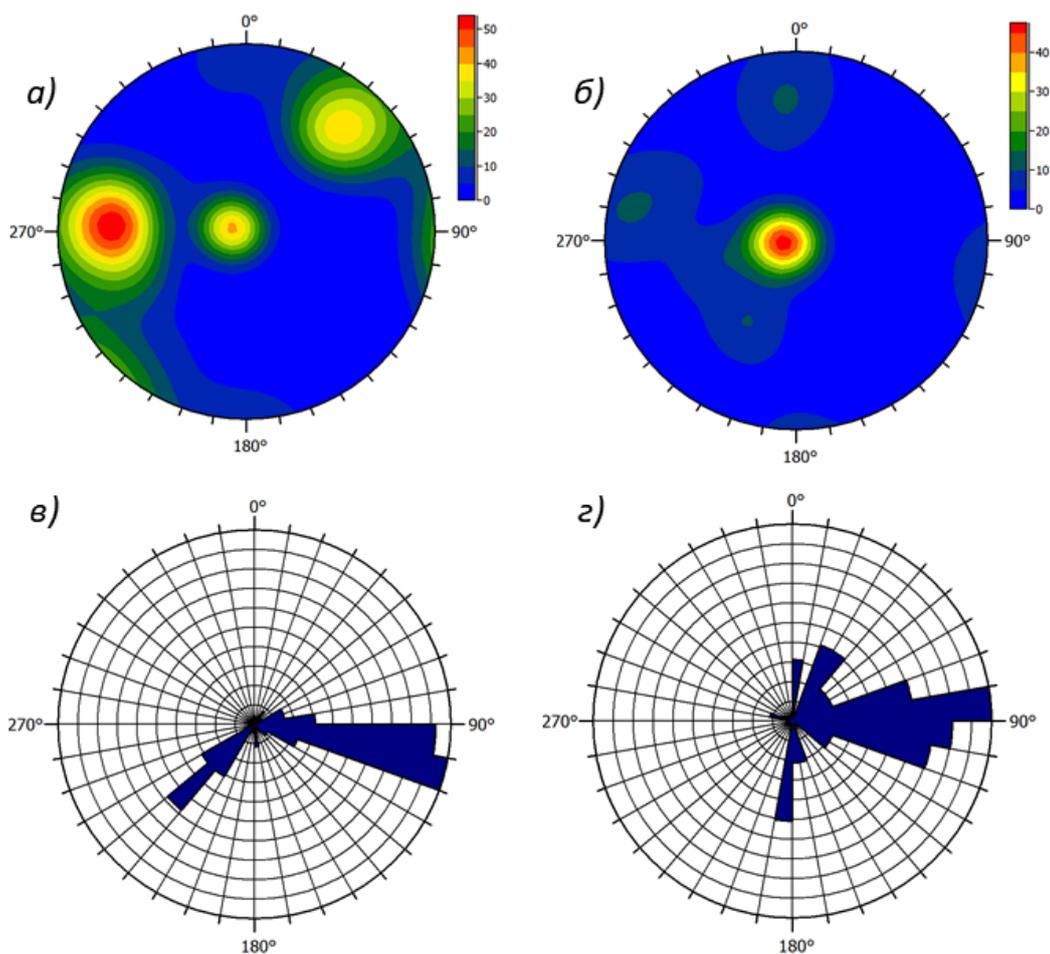


Рисунок 3.6 – Диаграммы трещиноватости (стереограмма трещиноватости верхняя полусфера) пород Нижне-Канского массива в зоне динамического влияния второстепенного разрывного нарушения (а), и вне зоны динамического влияния разрывных нарушений (б). Розы-диаграммы трещиноватости в зоне динамического влияния второстепенного разрывного нарушения долеритовых даек (в), и вне зоны (г)

Трещины в зоне динамического влияния второстепенного разрывного нарушений дайкового комплекса имеют преимущественно юго-восточное направление азимутами  $90^\circ$  и  $110^\circ$  (рис. 3.6а, в), а трещины вне зоны влияния разрывных нарушений имеют азимуты  $70^\circ$  и  $110^\circ$ , соответственно (рис. 3.6б, г). С уменьшением плотности и количества систем трещин по мере удаления от зоны влияния разрывных нарушений (рис. 3.6 в, г), дайковые комплексы, в отличие от гранитогнейсовых пород, менее трещиноватые [26, 29].

Результаты оценки трещиноватости пород на скальных выходах с учетом архивных данных были систематизированы и выделены следующие категории устойчивости: (табл. 3.1):

Tun 1. 500-метровая зона динамического влияния Муратовского разлома. Массивы представлены в основном гранитогнейсами с прожилками кварца и дайками долеритов малой мощности.

Tun 2. Зоны динамического влияния разрывных нарушений местного масштаба. Массивы представлены в основном гранитогнейсами с прожилками кварца и дайками долеритов малой мощности.

Tun 3. Интрузивные комплексы, представленные дайками долеритов мощностью до 10–20 метров.

Tun 4. Породы вне зоны динамического влияния разрывных нарушений. Массивы представлены в основном массивными выходами гранитогнейсов.

Исходя из полевых данных о разрывных нарушениях, были выделены различные классы, характеризующие разрывные нарушения в западной части Нижне-Канского массива (табл. 3.2).

Таблица 3.1 – Сводные категории устойчивости горных пород Нижне-Канского массива по системе Q'

Тип массива	Основные породы	RQD, %	Q'	Категория устойчивости
Тип 1.	Гранитогнейсы	44 – 72	13	Устойчивый
Тип 2.	Гранитогнейсы	68 – 87	86	Весьма устойчивый
Тип 3.	Долериты	79 – 90	22	Устойчивый
Тип 4.	Гранитогнейсы	69 – 88	68	Весьма устойчивый

Таблица 3.2 – Основные параметры разрывных нарушений

Название разлома, кинематический тип	Длина разлома, км	Порядок разлома	Ширина зоны динамического влияния разлома, по [5] (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

На основании вышеизложенного были вычислены зоны динамического влияния разломов по формуле (2.16). С использованием геологической карты и данных о разрывных нарушениях была создана трехмерная структурно-тектоническая модель Нижне-Канского массива, представленная в разделе 3.4.

### 3.3 Физико-механические свойства пород и внешнее поле напряжений

#### а) Физико-механические свойства пород.

На данный момент всего на участке «Енисейский» пробурено 17 скважин, по керну которых определены физико-механические свойства пород (табл. 3.3) [16, 111, 112].

Таблица 3.3 – Сводные физико-механические свойства горных пород на участке «Енисейский»

Наименование характеристик	Породы	
	гнейсы	метадолериты
Объемный вес, т/м <sup>3</sup>	2,75	2,91
Коэффициент Пуассона	0,27	0,29
Модуль упругости, МПа	7,0 x 10 <sup>4</sup>	9,15 x 10 <sup>4</sup>
Модуль деформации, МПа	5,9 x 10 <sup>4</sup>	7,09 x 10 <sup>4</sup>
Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	131,0	143,9
Предел прочности на растяжение, МПа	12,89	12,41
Предел прочности на сдвиг, МПа	57,15	99,6

По документации керна скважин (рис 3.7) было выделено 297 зон дробления [110,111], при этом более 70% зон имеют стволовую мощность от 0,1 до 0,7 м. «Зоны дробления со стволовой мощностью более 1 м составляют 20,5%, а их средняя мощность составляет 4,6 м. Максимальная мощность (38,1 м) наблюдается в скважине Р-3, а значительные интервалы раздробленных пород протяженностью 5,2-22,0 м выявлены в других скважинах» [110, 111].

«В северо-восточной части участка между сближенными зонами дробления сформировалось линзообразное тело тектонических брекчий мощностью около 30 м. В разрезе наблюдаются участки сгущения и разрежения зон дробления, характерные для тектонических структур» [110, 111].



Рисунок 3.7 – Интервалы развития зон дробления в керне буровых скважин P-4 и P-10 [125]

Зоны повышенной трещиноватости тесно связаны с зонами дробления и развиты по всему разрезу, достигая больших глубин. Иногда зоны повышенной трещиноватости развиты отдельно от зон дробления. «Модуль трещиноватости, характеризующий зоны повышенной трещиноватости, составляет от 10 до 45 трещин на 1 погонный метр керна. Более 35% протяженности скважин пересекает зоны повышенной трещиноватости» [110].

*б) Внешнее поле напряжений.*

Важнейшим элементом модели является внешнее поле напряжений. Граничные условия задавались на основе литературных данных [13, 16, 86, 102] и результатов наблюдений за современными движениями земной коры (СДЗК) на геодинимическом полигоне [11, 16, 25, 117].

По результатам «геологических исследований поле напряжений Нижне-Канского массива определяется доминирующими напряжениями сжатия, ориентированных в северо-восточном направлении с азимутами 30-60<sup>0</sup> в позднеплейстоценовое и голоценовое время» [16].

Более детальное изучение современного напряженно-деформированного состояния Нижне-Канского массива было выполнено средствами ГНСС [25, 117]. В результате были оценены параметры современных движений и деформаций земной поверхности во временном интервале с 2012 по 2021 годы (рис. 3.8). Из анализа осей ориентации и скоростей деформации участка видно, что реальное поле тектонических напряжений достаточно неоднородно - «мозаично». Северная и восточная граница участка, западнее от Правобережного разлома преимущественно испытывает субмеридиональное растяжение. Западная граница участка, соответствующая оси Правобережного разлома, испытывает субмеридиональное сжатие и субширотное растяжение. Зона севернее разлома Безымянный испытывает растяжение, а структурно-тектонический блок, ограниченный Меркурьевским и Верхнешумихинским разломом – сжатие. Границы участка также находятся в неоднородном поле современных деформаций.

Поэтому было принято решение выполнить вариационное моделирование НДС с несколькими направлениями действия главных напряжений внешнего поля.

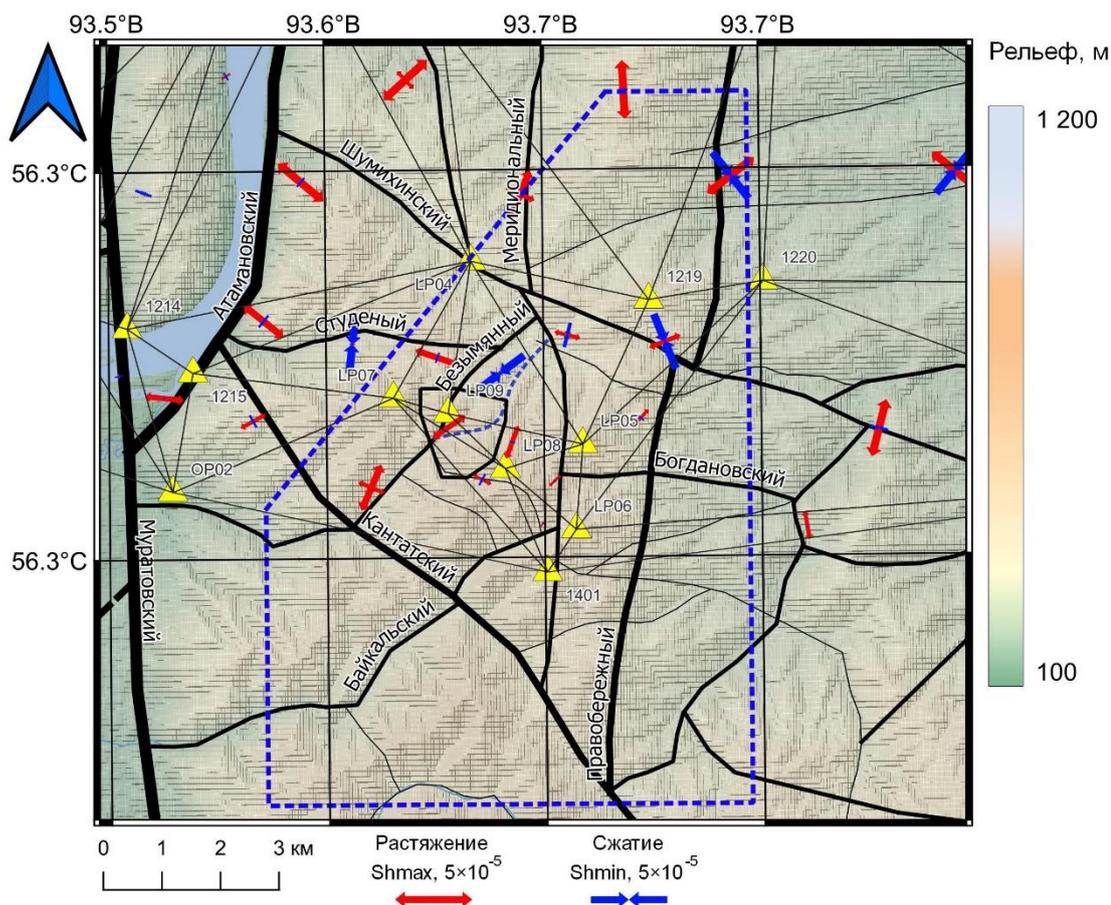


Рисунок 3.8 – Разломно-блоковая схема участка «Енисейский», главные оси и скорости деформаций, установленные по результатам ГНСС-наблюдений за период с 2012 по 2021 гг.

В районе участка «Енисейский» так же проводились работы по оценке абсолютных значений напряжений геофизическими методами и методом гидроразрыва [20]. Естественное поле напряжений на глубинах 450-500 м характеризуется следующими показателями:  $\sigma_{yy}=\sigma_{xx}=13.5$  МПа,  $\sigma_{zz}=12$  МПа. Сопоставление установленных величин максимальных напряжений в массиве ( $\sigma_{max}=21.4$  МПа) данных прочности горных пород (табл. 3.1) позволяет сделать вывод, что массив, по отношению к тектоническим напряжениям имеет существенный запас прочности.

### 3.4 Разработка трёхмерной структурно-тектонической модели участка «Енисейский»

Генерация структурной модели выполнялась в 2 этапа. На рис. 3.9 показан общий алгоритм построения геомеханической модели. Вначале создавалась геологическая модель, представляющая собой упрощенный вариант тектонических структур и геологических слоев, экстраполированных на глубину 500-800 м по разрезам (рис. 3.10 и 3.11) [102, 111, 114]. На втором этапе модель дополнялась зонами динамического влияния разрывных нарушений, ширина которых рассчитывалась по формуле (2.16).

На рис. 3.10 приведена геологическая схема [111], а на рис. 3.11 поперечный и продольный разрезы, которые были положены в основу разработки каркасной и блочной геолого-структурной 3D моделей участка «Енисейский».

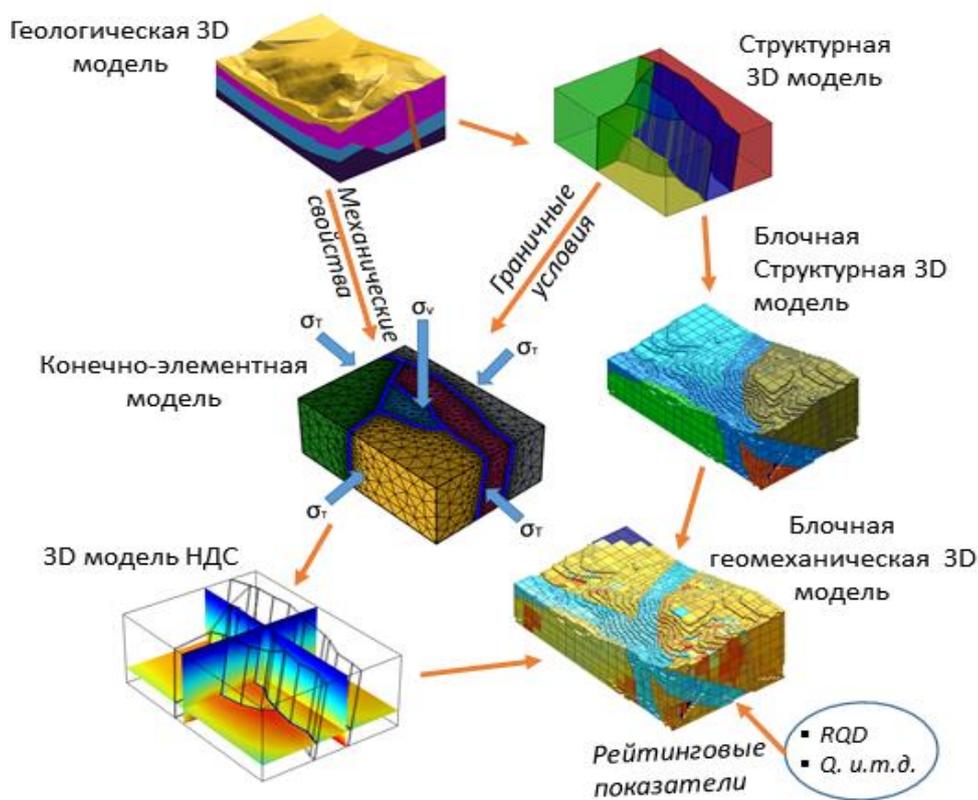


Рисунок 3.9 – Схема построения трехмерной геомеханической модели

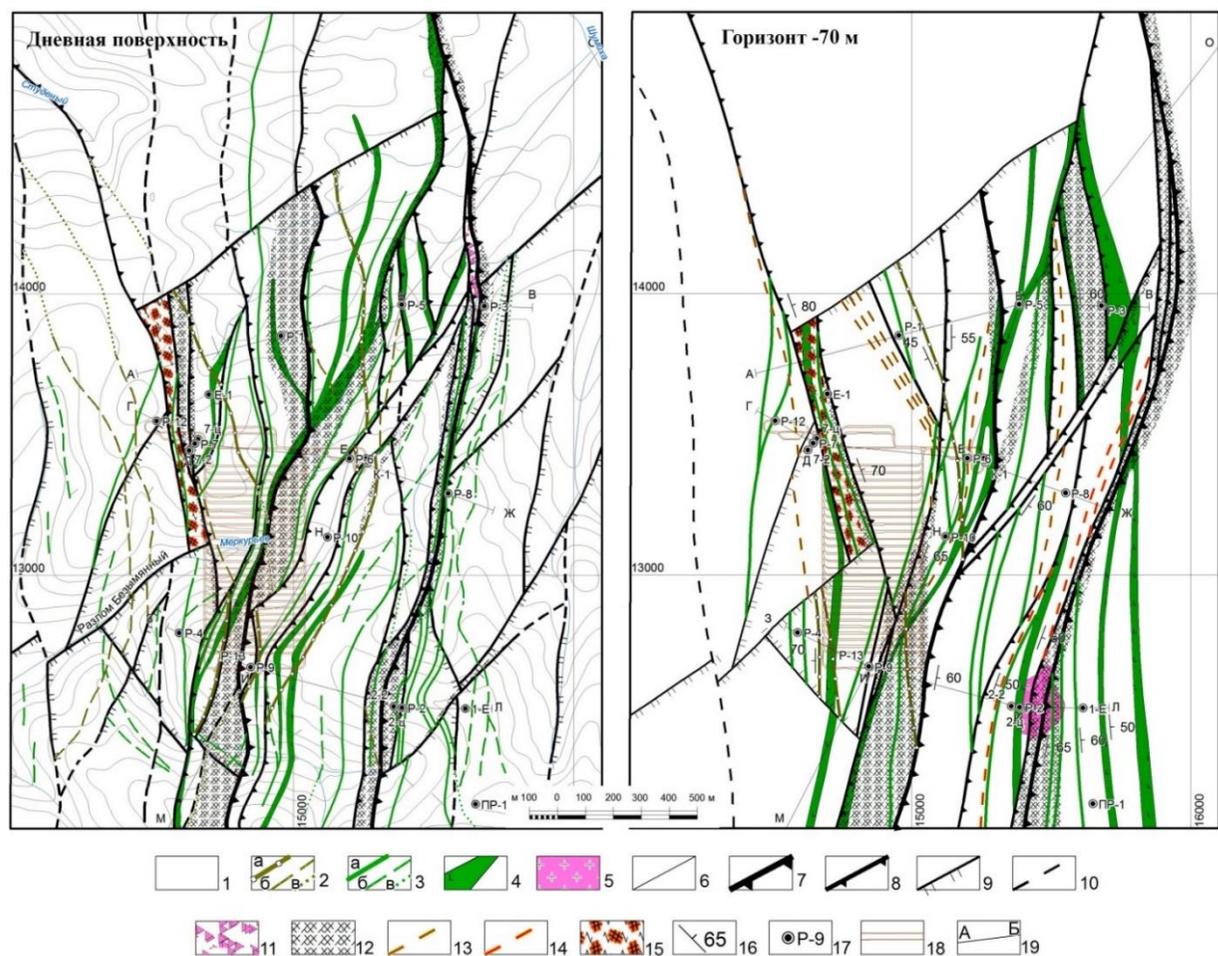
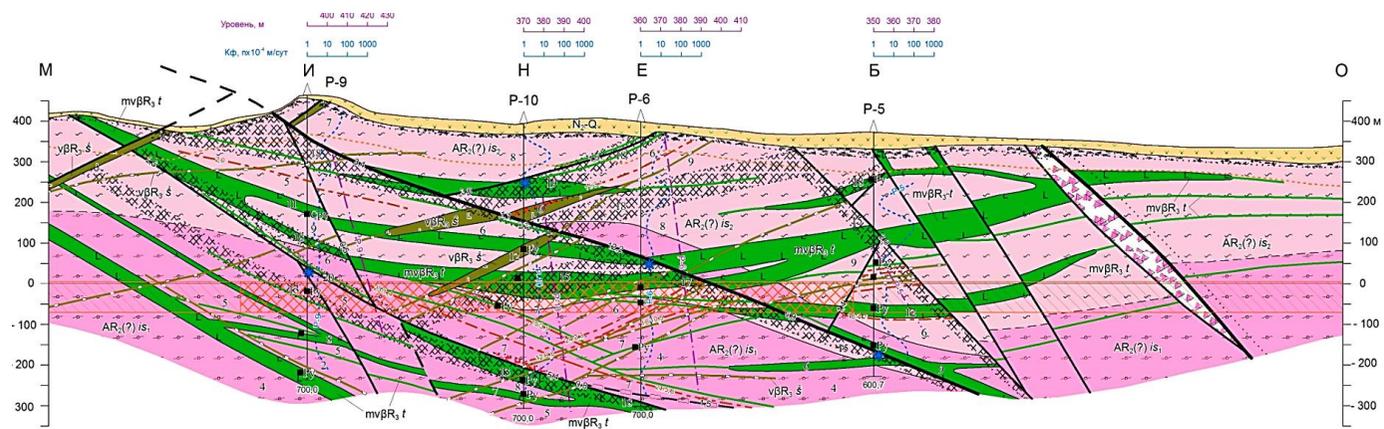
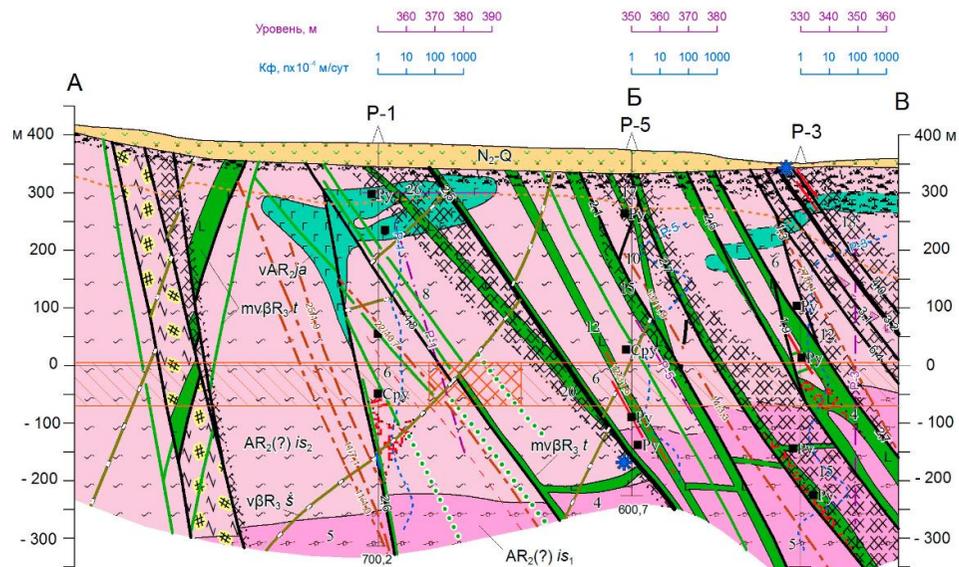


Рисунок 3.10 – Схема геологического строения участка размещения проектируемого ПГЗРО [111]

1 – архейские гнейсы и кристаллические сланцы, 2-4 – позднерифейские дайки: долериты, трахидолериты (2), метадолериты (3, 4) – установленные по данным бурения (а), по геофизическим данным (б), предполагаемые (в); 5 – раннепротерозойские гнейсо-граниты, 6 – геологические границы; 7-10 – разрывные нарушения: 7-8 – установленные по данным бурения главные (7) и второстепенные (8), 9 – установленные по геофизическим данным, 10 – предполагаемые; 11 – тектонические брекции, 12-13 – зоны повышенной трещиноватости, отражающиеся в масштабе схемы (12) и внесмасштабные (13); 14 – зоны милонитизации, 15 – зоны смятия, 16 – элементы залегания, 17 – буровые скважины и их номера, 18 – контур проектируемого ПГЗРО на горизонтах +5 и -70 м; 19 – линии геологических разрезов



Масштабы горизонтальный и вертикальный 1:10 000



Масштабы горизонтальный и вертикальный 1:10 000

Рисунок 3.11 – Геологические разрезы участка «Енисейский» по линиям М-Н-О и А-Б-В (см. рис. 3.9) [111]

Модель создавалась на основе результатов системного анализа геолого-геофизических данных, представленных в работах [2, 32]. Основываясь на геологической документации керна буровых скважин, результатах геофизических исследований в скважинах и материалах местных и региональных геологических карт было составлено подробное геологическое описание структурно-тектонического блока участка «Енисейский» [110].

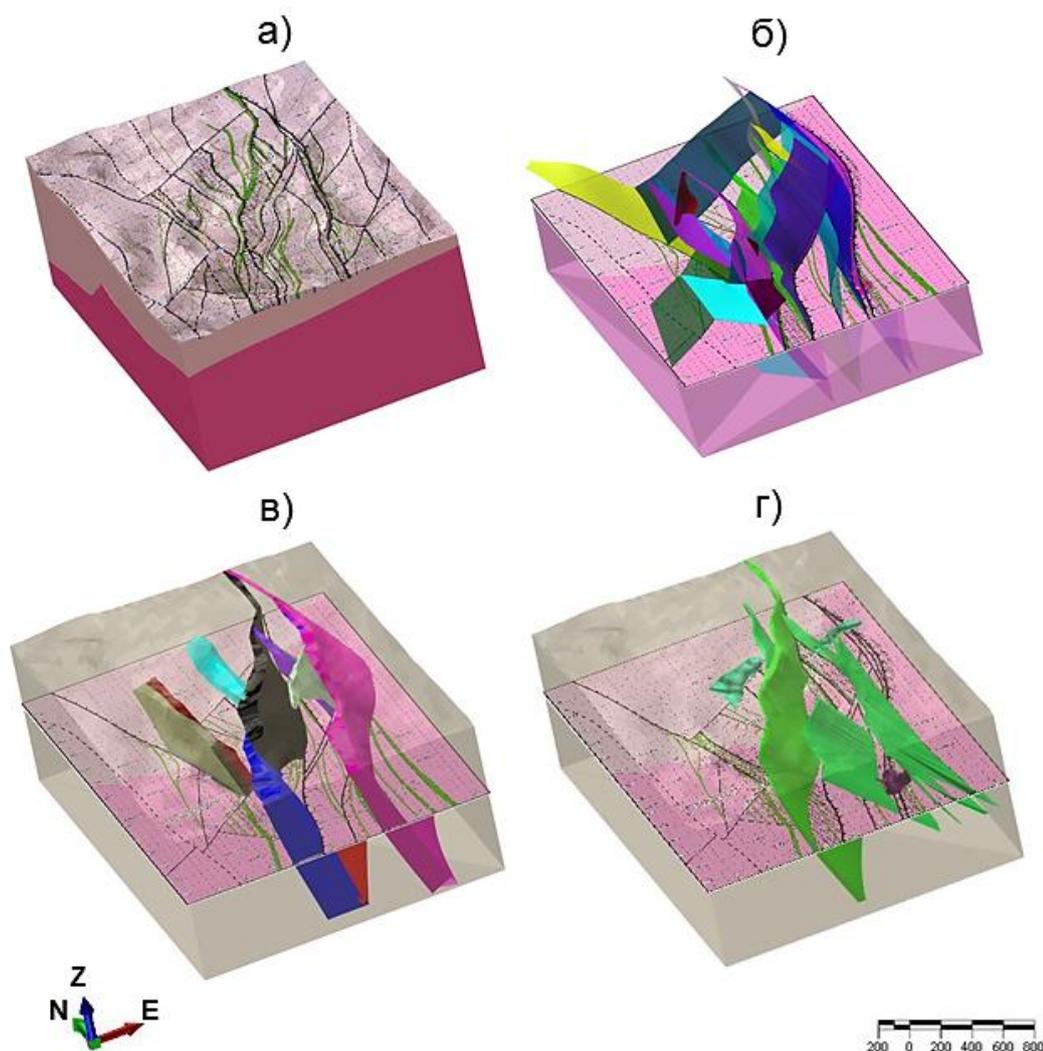


Рисунок 3.12 – Трехмерное представление основных геологических структур объемной модели участка «Енисейский»: а – литологическая модель; б – модель разрывных нарушений; в – зоны дробления, повышенной трещиноватости и брекчирования; г – интрузивные и дайковые комплексы

Литологическая модель включает в себя три основных слоя: четвертичные отложения и образования коры выветривания нерасчлененные мощностью 10–20 м, верхнюю толщу (плагиогнейсы, гнейсы биотитовые с прослоями кристаллических сланцев) и нижнюю толщу (гнейсы кордиерит-биотитовые с прослоями гнейсов биотитовых) (рис. 3.12а). Интрузивные и метаморфические образования представлены густой сетью крутопадающих позднорифейских даек метадолеритов с мощностью тел до 30 м (рис.3.12з). [105]. Тектонические разрывы модели подразделяются на главные и второстепенные нарушения. В каркасной модели разрывные нарушения строились в виде поверхностей (дислокаций) с нулевой шириной, в силу недостатка информации о мощности разломов рис. 3.12б [40-41]. Кроме этого, в модель были включены зоны дробления и смятия по данным геологических разрезов (рис. 3.12в). Эти зоны тесно коррелируют с главными разломами участка, достигая глубины до 700 м.

Блочная модель, составленная на основе каркасной модели (рис. 3.13), представляет геологические структурные особенности в виде блоков с заложенными физико-механическими свойствами данные о трещиноватости. По данным показателя трещиноватости в зонах разлома были определены размеры зон динамического влияния разрывных нарушений, в диапазоне от 20 до 70 метров (рис. 3.13б). Важно подчеркнуть, что для более детальной проработки блочной геомеханической модели требуется провести анализ горных пород с использованием оценочных показателей качества, таких как RQD, Q-Бартона, GSI – Хука-Браун. На основе блочной модели далее проводилось моделирование различных сценариев расположения камер выработок ПИЛ.

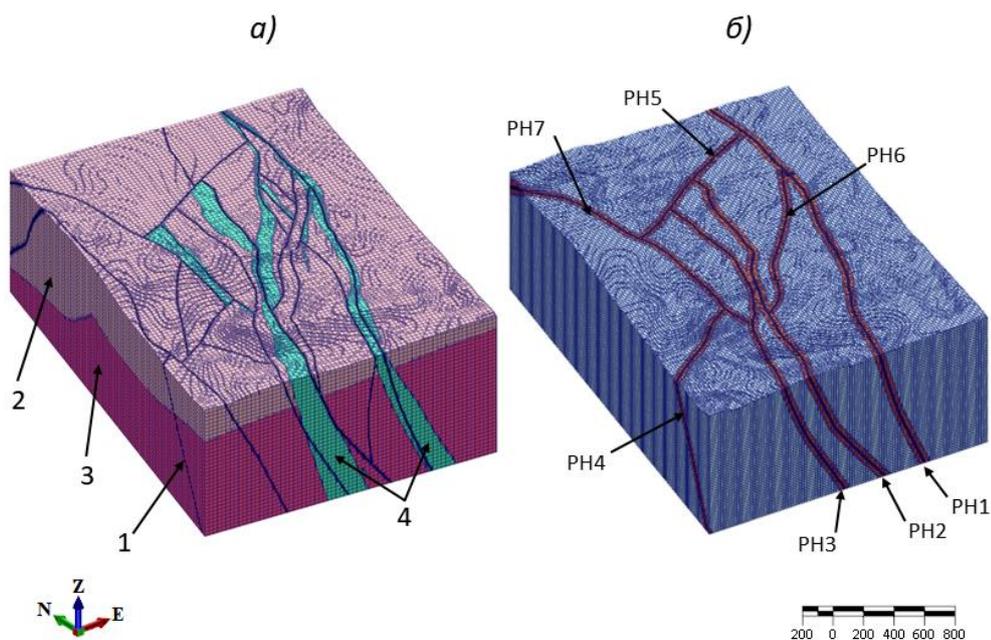


Рисунок 3.13 – Блочная структурно-геологическая модель, а – структурная блочная модель; б - зоны динамического влияния главных разрывных нарушений. 1 – разрывные нарушения; 2 – верхняя толща (плагинейсы, гнейсы биотитовые с прослоями кристаллических сланцев); 3 – нижняя толща (гнейсы кордиерит-биотитовые с прослоями гнейсов гранатсодержащих); 4 – зоны повышенной трещиноватости; PH1 – Верхнешумихинский разлом; PH-2 – Верхнемеркурьевский разлом; PH-3 – Меркурьевский разлом; PH-4 – Безымянный разлом; PH5 – Разлом №5; PH6 – Разлом №6; PH7 – Разлом №7

### Выводы по главе 3

1. В пределах участка «Енисейский» выделено 10 разломов с длиной более 3 км. Ввиду отсутствия необходимых данных об их активности проведены полевые измерения трещиноватости на выходах скальных пород. Подтверждено, что породы в зоне динамического влияния главных тектонических разломов более нарушены и относительно менее устойчивы, а массивы дайкового комплекса долеритов наиболее устойчивы. Разломы классифицированы по устойчивости на четыре категории. Установлены

размеры зон динамического влияния основных разломов, в т.ч. Муратовского глубинного разлома, расположенного на расстоянии 3-4 км от площадки ПИЛ. Площадка также оказывается в зоне влияния Безымянного разлома класса *B*, что влечет за собой определенные ограничения для размещения выработок, предназначенных для захоронения РАО.

2. Собраны и обобщены данные по физико-механическим свойствам пород и по изучению направления действия главных напряжений. Данные, полученные с использованием средств ГНСС, показали на нелинейный характер внешних тектонических сил, действующих по границам создаваемой модели. Кроме этого, направление действия главных напряжений определено неоднозначно в интервале азимутов от 30 до 60°. Это обуславливает необходимость вариационного моделирования.

3. На основе анализа геологических архивных и картографических материалов разработана структурно-тектоническая модель участка «Енисейский», включающая систему разрывных нарушений, литологическую модель, модели интрузивных образований, зоны повышенной трещиноватости и дробления, физико-механические свойства пород и зоны динамического влияния крупных тектонических разломов. Построенная трёхмерная структурно-тектоническая модель участка «Енисейский» позволяет учесть при моделировании НДС такое важнейшее свойство разломов как угол падения и может быть использована при многовариантном моделировании НДС в окрестностях горных выработок ПИЛ с целью прогноза сохранности изоляционных свойств вмещающего массива.

## ГЛАВА 4. Трехмерная геомеханическая модель участка «Енисейский»

Геомеханическая блочная модель участка «Енисейский» является главным инструментом при проектировании расположения, выполнении натуральных геомеханических экспериментов и систематизированного накопления геопространственно привязанной цифровой информации о состоянии геологической среды. С ее помощью планируется решить следующие задачи:

а) выявление потенциальных (ослабленных, нарушенных или сильнонапряженных) зон массива, способных в длительной перспективе стать каналами инфильтрации подземных вод к РАО;

б) расчет НДС и устойчивости массива;

в) планирование и контроль проведения геомеханических экспериментов в ПИЛ;

г) использование в качестве интерактивно пополняющейся базы данных о состоянии породного массива.

Геомеханическая модель включает в себя следующие составляющие.

1. Геологическая и структурно-тектоническая модель позволяют визуально представить в 3D-варианте основные тектонические нарушения, динамические зоны их влияния и упруго-прочностные свойства горных пород.

2. Рейтинговая классификация качества породного массива дает основание до проходки выработок оценить устойчивость горных пород и выявить потенциально опасные и ослабленные зоны.

3. Модель напряженно-деформированного состояния позволяет рассчитать соотношение прочностных свойств и действующих напряжений и оценить вероятность их разрушения.

Первый этап рассмотрен выше, результаты разработки последних двух компонент геомеханической модели представлены в настоящей главе.

#### 4.1 Рейтинговая классификация породного массива

Рейтинговая классификация массива выполнялась на основе расчета трехмерного распределения индекса  $Q^R$  по формуле (2.23). В нее входят 8 параметров: тепловой эффект ( $C_T^R$ ); химический состав подземных вод ( $C_{chm}^R$ ); гидравлическая проводимость ( $J_w^R$ ); соотношение прочностных свойств пород и напряжений ( $SRF^R$ ); индекс качества горных пород ( $RQD$ ); показатель количества систем трещин ( $J_n$ ); показатель шероховатости поверхностей стенок трещин ( $J_r$ ); показатель выветрелости трещин ( $J_a$ ). Это основные характеристики, от которых зависит длительная сохранность естественных изоляционных свойств массива, в котором планируется захоронение РАО.

Структурная модель включает в себя 11 разломов различного иерархического ранга, образующих структурные блоки (рис. 4.1). Два разлома относятся к региональным и имеют длину до 30 км. Помимо них также выявлены локальные разломы длиной от 300 м до 1200 м. Для разломов были рассчитаны размеры зон динамического влияния, учтенные затем в 3D-визуализации. В пределах этих зон упругие и прочностные свойства уменьшались по отношению к средним значениям. Из-за отсутствия данных о показателе  $RQD$  в скважинах (кернх), показатель  $RQD$  был определен расчетом количества трещин на единицу объема по формуле, позволяющей преобразовать  $Jv$  в  $RQD$ .

$$RQD = 115 - 3,3Jv, \quad (4.1)$$

где  $Jv$  – количество трещин на 1 метр кубический.

Показатель  $Jv$  определяется следующим образом

$$Jv = \sum_{i=1}^J \left( \frac{1}{Si} \right) \quad (4.2)$$

где  $Si$  – среднее расстояние между трещинами в метрах для каждой системы трещин;  $J$  – количество систем трещин.

Анализ результатов поинтервального усреднения показателя  $RQD$  также подтвердили хорошее качество пород на уровне 90% по скважинам P 2, 3, 5, 7, 10, 13 [111, 112]. График на рис. 4.2 демонстрирует распределение значений  $RQD$ , рассчитанных на основе количества трещин на единицу объема в образцах керна до глубины 600 м на территории строительной площадки. Значения показателя  $RQD$  лежат в диапазоне от 75÷90% [122].

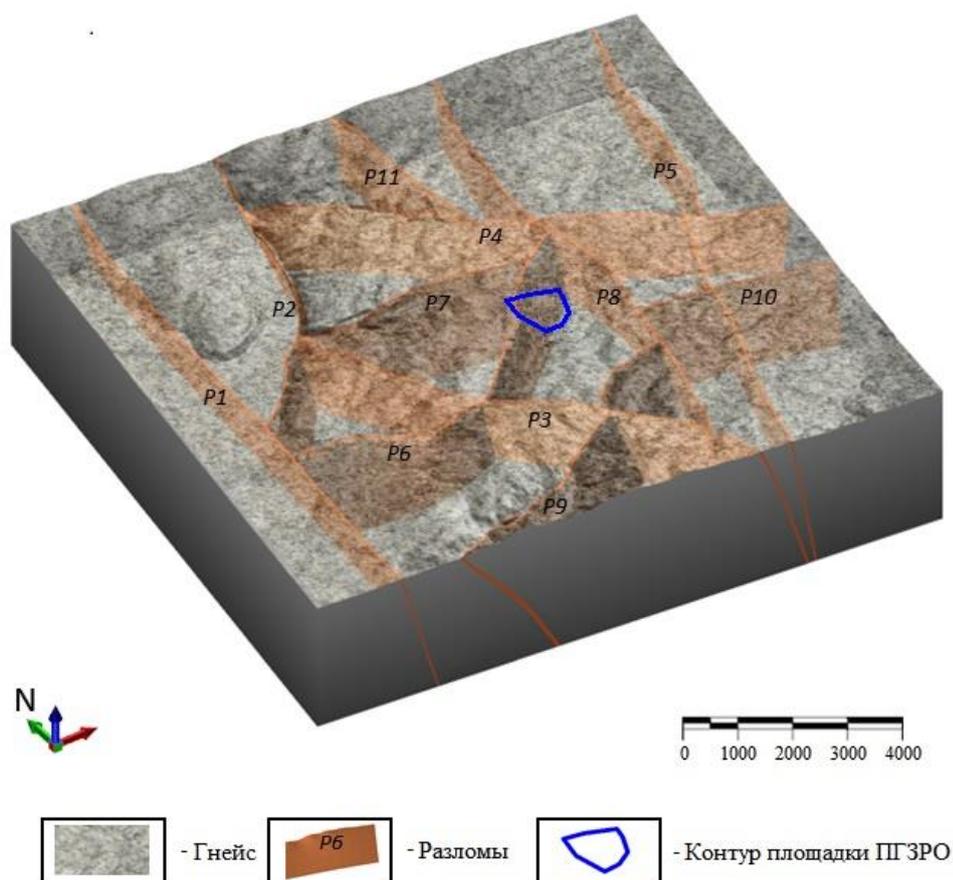


Рисунок 4.1 – Трехмерная модель основных тектонических нарушений:  $P1$  – Муратовский разлом;  $P2$  – Атамановский разлом;  $P3$  – Кантатский разлом;  $P4$  – Шумихинский разлом;  $P5$  – Правобережный разлом;  $P6$  – Безымянный разлом;  $P7$  – Студенный разлом;  $P8$  – Меридиональный разлом;  $P9$  – Байкальский разлом;  $P10$  – Богдановский разлом,  $P11$  - Меридиональный разлом 2.

Далее были определены показатели  $J_n$ ,  $J_r$ ,  $J_a$ , входящие в формулу (2.19). Величина  $J_n$  определялась на основе анализа характеристик распределения трещин, полученных с использованием специализированного видео-каротажного оборудования [111, 112]. Обобщенный анализ этих данных позволил сделать вывод о том, что в большинстве обследованных скважин трещины имеют наклонное падение. Параметры  $J_r$  и  $J_a$  определены по результатам картирования разломов по керну скважин на различных глубинах.

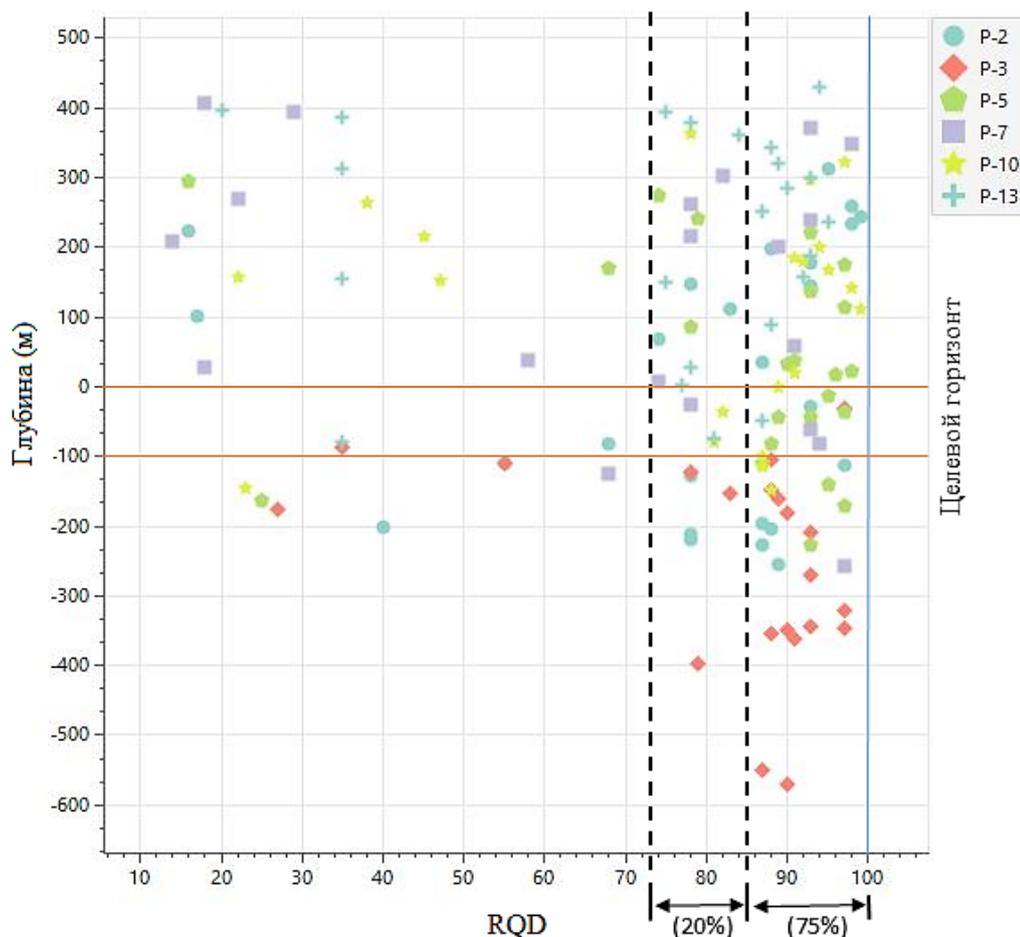


Рисунок 4.2 – Распределение  $RQD$  на участке «Енисейский» в зависимости от глубины

#### *Химический индекс подземных вод $C_{chm}^R$*

Гидрохимические исследования показали, что воды поверхностных водотоков и источников по общей минерализации являются исключительно пресными. Общая минерализация 50–450 мг/л. По составу солей воды

гидрокарбонатно-кальциевые при резко подчиненном количестве магния, натрия и калия [36]. Среднее значение рН составляет 8.1, общая жесткость не превышает  $6.25^{\circ}\text{Ж}$ , содержание нитрат-иона ниже 3.76 мг/л, содержание хлоридов находится в пределах 0.9–7.5 мг/л.

$$6 < \text{pH} < 10, \text{TDS} < 50 \text{ г/л}, \text{Cl} < 20 \text{ г/л}$$

Следовательно, все требования к геохимическим параметрам приведенные в табл. 2.3 (см. главу 3.3), выполняются и геохимический параметр может принят как 1.0.

#### *Индекс теплового эффекта.*

Влияние температуры на механическое поведение Нижне-Канского массива было изучено в работе [123]. Изучение петрографического состава образцов показало, что они представлены преимущественно силлиманит-кордиеритовыми и биотит-кордиеритовыми гнейсами с прослоями биотитовых плагиогнейсов и гиперстен-гранат-кордиеритовых гнейсов.

Полученные результаты экспериментов, направленных на анализ влияния нагрева на прочность пород, противоречивы. В пяти случаях наблюдается значительное увеличение прочности образцов (в среднем на 30%), тогда как у трех образцов проявляется заметное снижение прочности (в среднем на 30%). У четырех образцов изменения остаются в пределах  $\pm 10\%$ . Вероятно, различия связаны с индивидуальными свойствами пород и их составами, которые ведут себя по-разному в ответ на изменения температуры. Индекс теплового эффекта был оценен величиной  $C_T^R=0,88$  для гнейсов, а для метадолеритов -  $C_T^R=0,72$ . [11]. Таким образом, метадолериты составляют приблизительно 12% от общего содержания в массиве. Согласно уравнению (2.18), используется значение 0,86 для проведения оценки.

### *Индекс гидравлической проводимости пород $J_w^R$*

Согласно [26, 37], коэффициент гидравлической проводимости для гранитогнейсовых пород в неповрежденном массиве изменяется в интервале от  $1 \cdot 10^{-8}$  до  $10^{-11}$  м/сут, в то время как для областей с ослабленными структурами, связанными с зонами разрывных нарушений, значение коэффициента варьируется в диапазоне от  $3 \cdot 10^{-5}$  м/сут до  $8 \cdot 10^{-7}$  м/сут. В связи с полученными данными, исследования в данном массиве позволили дифференцировать коэффициент водопроницаемости»

### *$SRF^R$ – индекс отношения прочности к напряжению*

Согласно [117, 120], в пределах целевой глубины захоронения РАО ~ 500 м подтверждается средний уровень интенсивности напряжений. Как показано на рисунке максимальное главное напряжение, измеренное на глубине 650 м составляет порядка 25 МПа. Физико-механические характеристики различных типов пород взяты по результатам лабораторных исследований [110,123]. На участке «Енисейский» предел прочности пород при одноосном сжатии для гнейсов 130 Мпа, а для метадолеритов 144 Мпа. Конкретное значение определяется показателем  $SRF^R$ , приведенным в табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Значения показателя  $SRF^R$

Наименование пород	$\sigma_c$ МПа	$\sigma_1$ , МПа	$(\sigma_c/\sigma_1 > 5)$	$SRF^R$
Гнейсы	130	21.4	100% (6,19 > 5)	0.5
Метадолериты	144	21.4	100% (6,72 > 5)	0.6

### *Итоговые результаты оценки рейтинга пород – $Q^R$*

Классификация участка «Енисейский» основана только на данных, полученных в пределах шести скважин [111, 112]. Поэтому она, безусловно, нуждается в дальнейшем уточнении по мере получения новой информации.

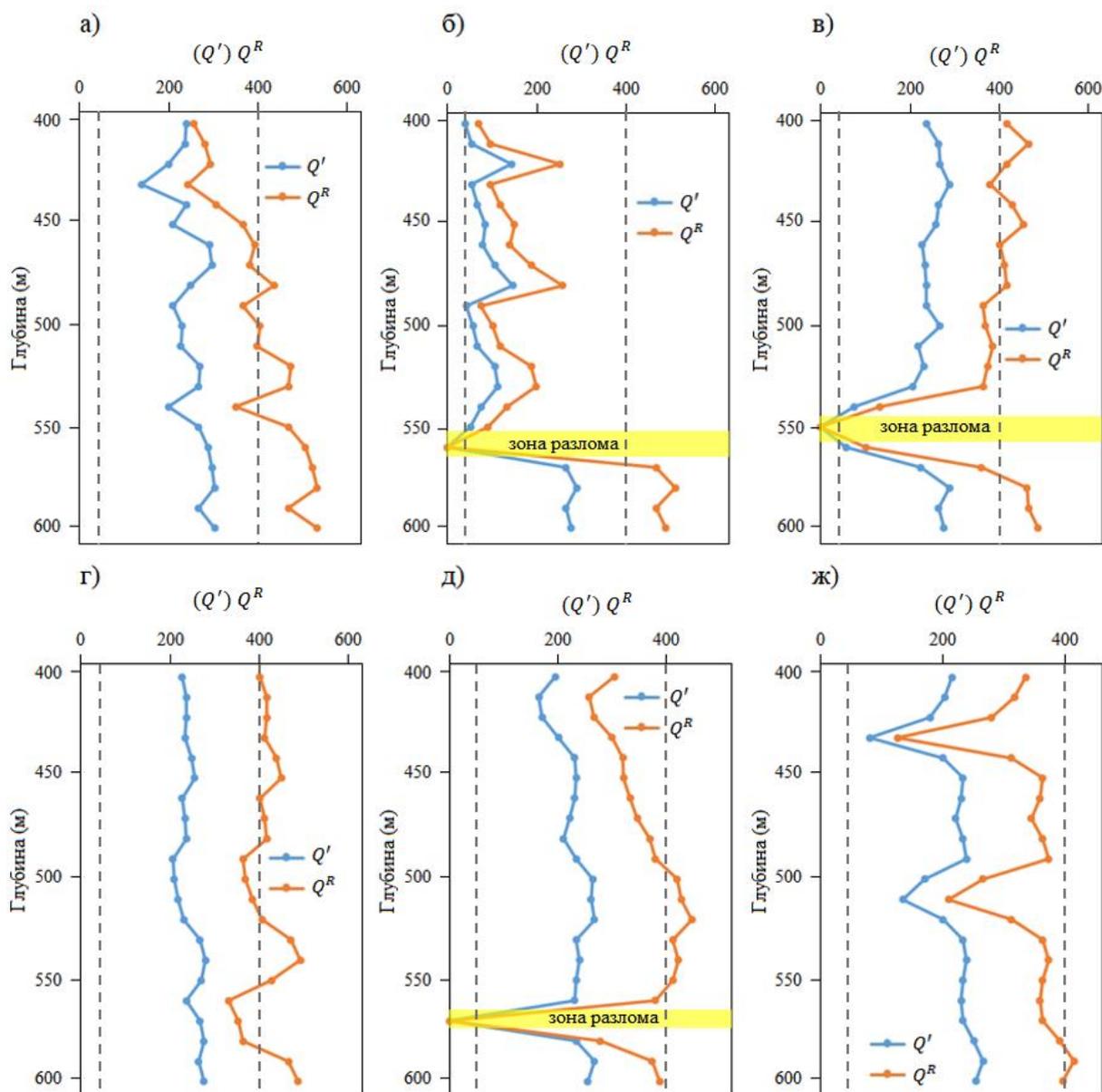


Рисунок 4.3 – Распределение величин  $Q'$  и  $Q^R$  : а) - по данным скважины Р-2; б) - по данным скважины Р-3; в) - по данным скважины Р-5; г) - по данным скважины Р-7; д) - по данным скважины Р-10; ж) - по данным скважины Р-13. Пунктирными линиями выделены интервалы: (0-40) – низкая устойчивость, (40-400) умеренная устойчивость, (>400) высокая устойчивость

Значения  $Q^R$  показаны на графиках (рис. 4.3). Можно отметить, что значения показателя  $Q^R$  в скважине Р-2 в зонах разломов достаточно низкие. Тем не менее, в скважине Р-2 как  $Q'$ , так и  $Q^R$  превышают значения в

интервалах скважины Р-3 за счет высокого соотношению прочности и напряжения  $SRF^R$ . Также низкие значения в скважине Р-3 обусловлены наличием метаморфических пород. В скважинах Р-5, Р-7, Р-10 и Р-13 наблюдается аналогичная тенденция по двум показателям. Большинство интервалов относятся к категории «умеренная устойчивость» (40-400) или «высокая устойчивость» (>400).

## **4.2 Многовариантное моделирование напряженно-деформированного состояния**

### **4.2.1 Граничные условия модели**

В работе реализован подход, «позволяющий сформировать адекватную гетерогенно-блочную модель геологической среды на основе физических представлений о свойствах горных пород с привлечением метода конечных элементов. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния пород, прежде всего, предусматривает соблюдение условий подобия» [98].

«Первым важным обстоятельством является геометрическое подобие структурно-тектонической модели реальному массиву, отраженному на геологической карте» [121]. Для реализации этого условия была построена структурно-тектоническая модель участка (см. раздел 3.4).

«Вторым требованием подобия является ориентировка главных усилий, соответствующая выявленной при расшифровке геодинамической эволюции геологической среды в районе исследования» [121].

Третьим, значимым для окончательной картины распределения полей напряжений в 3D-модели, фактором являются условия ее закрепления.

#### ***Параметры каркасной модели.***

Каркасная модель представляет собой некоторый объем массива в виде призмы, внутри которой планируется проходка горных выработок ПИЛ. Ее размеры в плане приблизительно 3х2 км и 1 км по вертикали (рис. 4.4).

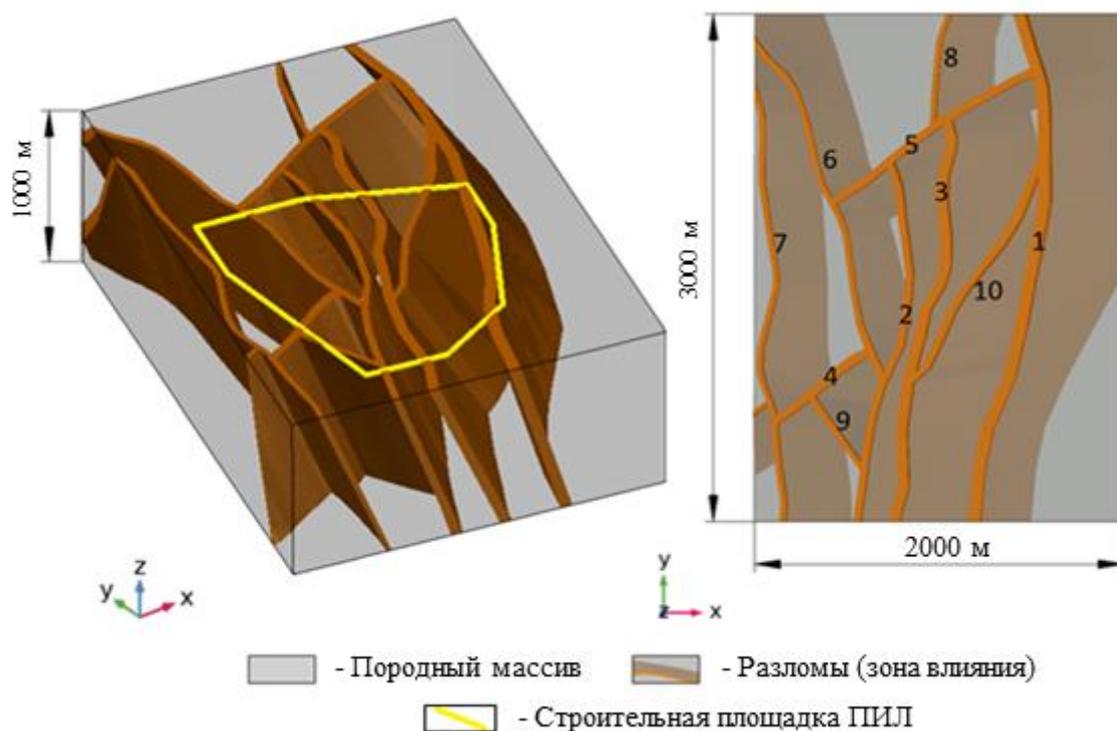


Рисунок 4.4 – Общий вид каркасной модели в интерфейсе *COMSOL Multiphysics*. 1 – Верхнешумихинский разлом; 2 – Меркурьевский разлом; 3 – Верхнемеркурьевский разлом; 4 – Безымянный разлом; 5 – Безымянный разлом 2; 6 – РН6; 7 – РН7; 8 – РН8; 9 – РН9; 10 – РН10

Интересующий объем породного массива, находящийся внутри этой фигуры, имеет размеры -  $2 \times 1.5 \times 0.6$  км. Размеры призмы приняты немного больше для снижения краевых эффектов, возникающих при расчете напряжений на границах каркасной модели [15].

Обоснование каркасной модели изложено в 3-й главе. Общий вид модели в интерфейсе *COMSOL Multiphysics* представлен на рис. 4.4. Она включает в себя литологическую часть, разрывные тектонические нарушения, интрузивные образования, зоны трещиноватости и дробления. В модель также заложены данные, полученные по результатам анализа комплекса геолого-геофизических характеристик, включая схемы разломной тектоники, результаты геофизических и ГНСС-наблюдений, параметры, физико-

механические свойства пород, результаты определения трещиноватости пород.

Модель разбита на четырехугольные конечные элементы (КЭ) (тетраэдры) методом триангуляции Делоне. При разбиении минимальный размер ребра КЭ задавался равным 6 м на наиболее важных участках - зонах сочленения разрывных нарушений, изгибах и т.д. Остальные размеры КЭ последовательно увеличивались к границам модели, где ее структура становится более однородной. Всего в каркасной модели содержится ~ 125 тыс. КЭ. Сетка КЭ оптимизировалась параметрами сглаживания для увеличения степени равномерности и регулярности геометрических элементов. Кроме этого, оптимизация геометрии сети позволила снизить общее количество конечных элементов, что положительно отразилось на времени вычислений. Общий вид КЭ-модели представлен на рис. 4.5.

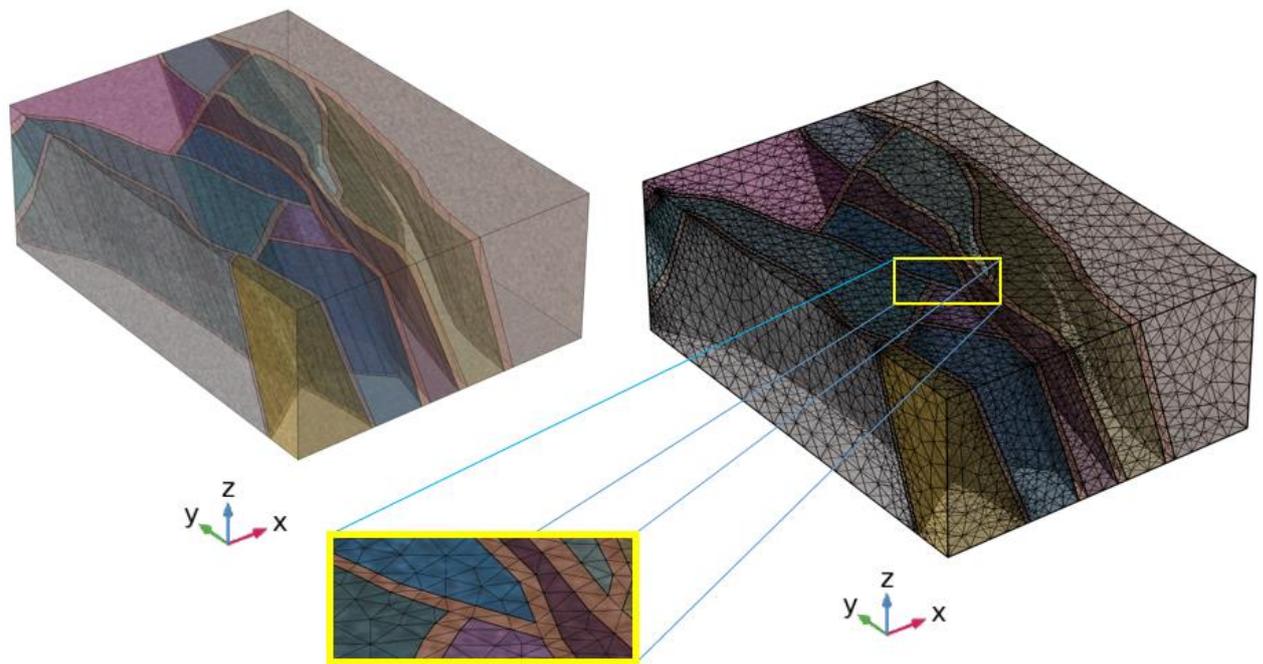


Рисунок 4.5 – Разбиение каркасной модели на конечные элементы (*COMSOL Multiphysics*)

### *Ориентировка внешних усилий.*

Вторым условием, от которых зависит окончательное распределение полей напряжений в модели, является направление вектора главных тектонических напряжений. Важность этого условия подчеркивалось в работах [16, 118, 119, 120 и др.]. В отношении района исследования такая оценка сделана на основе структурно-геологических, геоморфологических, геофизических и геодезических исследований. Так анализ истории тектонической эволюции Нижне-Канского массива, приведенный в [118, 119] показал, что при формировании массива ось максимального сжатия  $\sigma_3$  была ориентирована с СВ на ЮЗ под углом около  $40^\circ$ , ось  $\sigma_2$  была параллельна генеральному северо-западному простиранию докембрийских толщ, а  $\sigma_1$  имела субмеридиональную ориентировку. В ходе дальнейшей геологической эволюции территория развивалась в условиях древней платформы. На основании анализа морфологии складок было установлено, что вектор сжимающих напряжений и ось  $\sigma_3$  была ориентирована в З-ЮЗ азимутах ( $240-260^\circ$ ), а тектонические усилия исходили со стороны жесткого основания Сибирской платформы. Сейсмотектонические данные также свидетельствуют о доминирующих напряжениях субгоризонтального сжатия в северо-восточном направлении и в голоценовое время.

Исходя из этого, был сделан вывод, что напряженно-деформированное состояние земной коры в этом районе определяется сжимающими усилиями, ориентированными в ЮЗ-СВ направлении поперёк простирания жёсткой глыбы Енисейского кряжа.

Кроме этого, были проанализированы данные, полученные средствами ГНСС [11, 16, 126, 129] и построены графики напряжений по контуру участка (рис. 4.6). Графики (рис. 4.6 а-г) сложны для функционально ввода в программу численного анализа, поэтому они были упрощены путем усреднения значений для каждого из структурных блоков на границах модели (рис. 4.6д).

Значения, использованные для задания граничных условий внешних усилий для 4-х вариантов приведены в табл. 4.2. Они подтверждаются данными натурных измерений напряжений в массиве пород методом гидроразрыва [20].

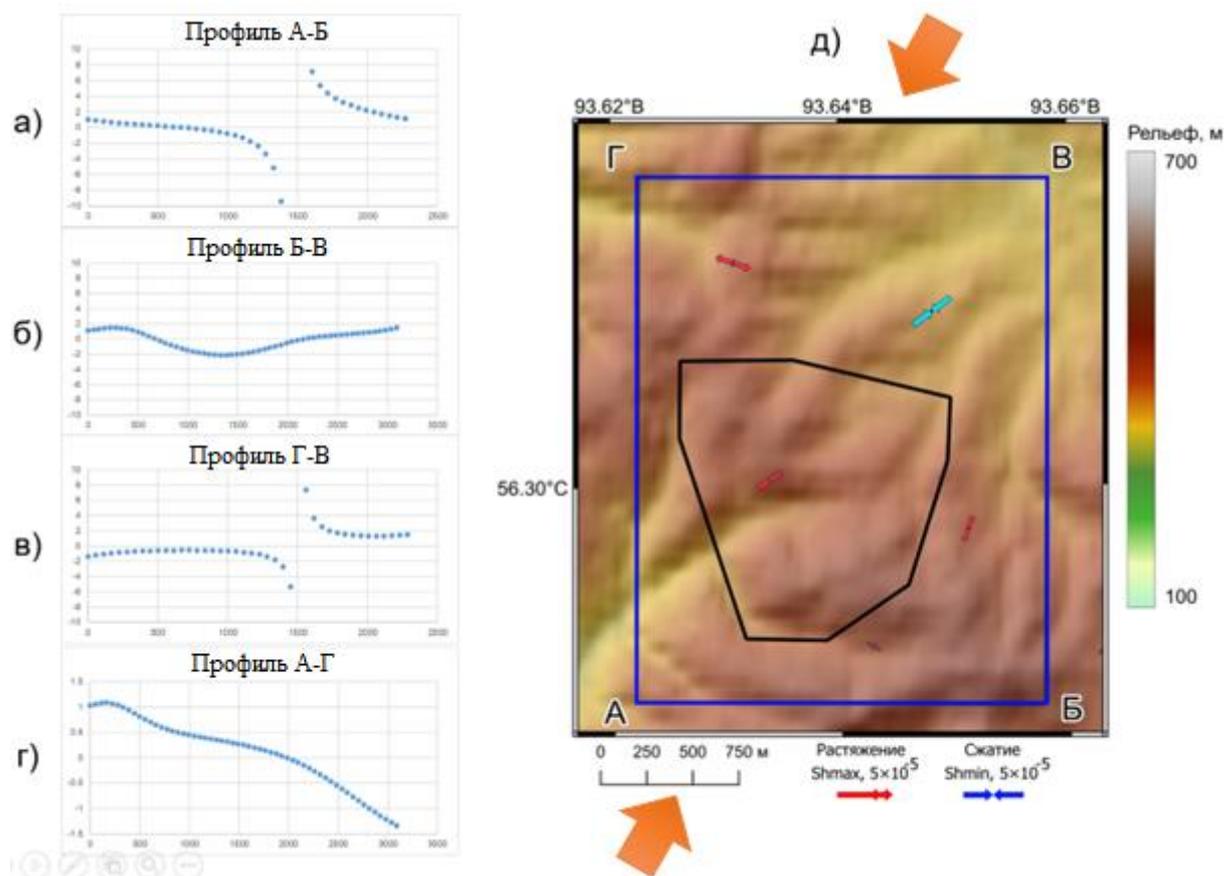


Рисунок 4.6 – Графики соотношения главных действующих деформаций по границам области моделирования, построенные по ГНСС-данным. а – профиль А-Б; б – профиль Б-В; в – профиль Г-В; г – профиль А-Г; д – соотношение границ области моделирования и строительной площадки ПИЛ. Стрелками показаны оси главных напряжений, установленные геологическими методами.

Таблица 4.2 – Условия задания тектонических усилий на границах модели

Вариант	$P_y$	$P_x$
1. Только гравитационное давление (рис. 4.7а)	0	0
2. На основе геологических данных $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 1/2$ (рис. 4.7б)	$0.5 \times \gamma h$	$\gamma$
3. Пессимистичный прогноз. $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 2$ (рис. 4.7в)	$\gamma h$	$0.5 \times \gamma h$
4. Результаты ГНСС-измерений (см. рис. 4.7г)	$a-b = 0.3 \times \gamma h$ $b-c = 0.2 \times \gamma h$ $c-d = -0.8 \times \gamma h$ $d-e = -2 \times \gamma h$ $e-f = -1.8 \times \gamma h$ $g-h = -2.0 \times \gamma h$ $h-i = -2.0 \times \gamma h$ $i-j = -0.6 \times \gamma h$	$f-g = -0.83 \times \gamma h$ $j-k = 1.42 \times \gamma h$ $k-l = 1.67 \times \gamma h$ $l-n = 2.0 \times \gamma h$ $n-a = 2.0 \times \gamma h$

#### Условия закрепления модели на контуре.

Условия закрепления модели были приняты исходя из следующих соображений - отсутствие вертикальных смещений, но возможность горизонтальных перемещений в нижней плоскости, отсутствие горизонтальных перемещений, но возможность вертикальных перемещений на боковых границах модели. Принятый тип закрепления – «Roller», реализующий указанные условия в *COMSOL Multiphysics*. Верхняя плоскость модели остается свободной от закреплений и нагрузок. Напряжения бокового отпора задаются по вертикальным границам модели, гравитационная составляющая задается как площадная нагрузка каждого элемента модели. Схемы задания граничных условий для расчетных вариантов показаны на рис. 4.7.

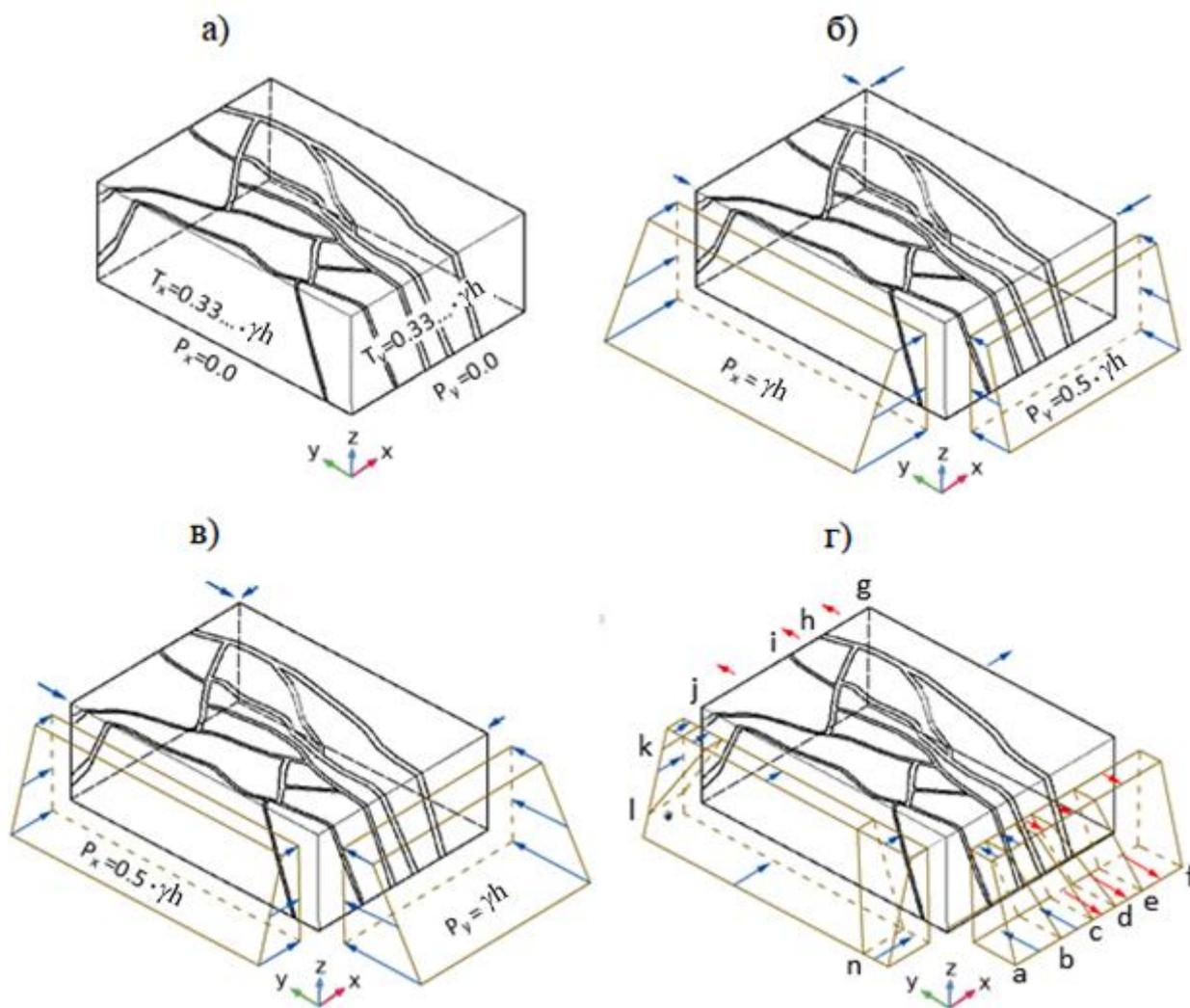


Рисунок 4.7 – Схемы задания граничных условий для расчетных вариантов (см. табл. 4.3): а – только гравитационное давление; б – на основе геологических данных  $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 0,5$ ; в – пессимистичный прогноз  $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 2$ ; г – дифференцированное по контуру, по результатам ГНСС-измерений (табл. 4.2, строка 4)

#### 4.2.2 Варианты моделирования

*Вариационное моделирование* было выполнено в программе *Comsol Multiphysic 5.6*, визуализация и статистический анализ результатов выполнялись в ГГИС *Micromine*.

Расчет НДС проводился для 4-х вариантов (рис. 4.7):

- Вариант 1 – является «классическим» и включает в себя только гравитационное давление  $\gamma H$  и давление бокового отпора равное  $1/3 \gamma H$  (рис. 4.7а). Тектоническая составляющая в первой модели принята равной нулю.
- Вариант 2 – с учетом тектонических напряжений, определенных по результатам геологических исследований. Соотношение главных действующих напряжений при ориентации оси компрессионного сжатия в  $100-110^\circ$  принималось равным  $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 0,5$  [16, 118] (рис. 4.7б).
- Вариант 3 – выбран исходя из принципа «пессимистичного» прогноза: в нем главные горизонтальные напряжения принимались равными  $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 2$  при азимуте оси компрессионного сжатия равного  $90^\circ$  (вдоль простирания главных тектонических нарушений) (рис. 4.7в). Эта ситуация наиболее опасна с точки зрения деструкции породного массива.
- Вариант 4 – дифференцированные значения по контуру участка, задавались по результатам геодезических измерений [11, 13] (рис 4.7г). Результаты ГНСС-измерений показывают постоянную миграцию поля деформации [116], поэтому измеренные средствами ГНСС величины средних скоростей деформаций верхней части геологического разреза за последние 10 лет приняты как наиболее вероятные.

### 4.2.3 Результаты вариационного моделирования НДС

Ниже представлены результаты численного моделирования НДС на глубине 450 м для целевого горизонта 500 м. Для примера на рисунке 4.8 представлено распределение интенсивности напряжения  $\sigma_i$  для четырех вариантов граничных условий для глубины 450 м. Как показано в гл. 2 этот параметр наиболее полно отражает суммарное поле в каждой точке массива.

Компоненты, характеризующие интенсивность напряжения  $\sigma_i$ , выражены отчетливо, но наблюдается сложное их распределение с присутствием зон концентрации напряжений в каждом из вариантов [121]. На

рис. 4.8 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.

На рисунке 4.8а показаны максимальные значения интенсивности напряжений на стыке двух тектонических разломов в северо-западной части Верхнешумихинского разлома с Безымянным разломом 2, достигая 18 МПа. Рисунок 4.8б также показывает максимальные значения, приуроченные к Верхнешумихинскому разлому и достигающие 20 МПа, аналогичные значения наблюдаются на стыках Верхнешумихинского и Безымянного разломов. На рисунках 4.8в и 4.8г 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 - это параметр, характеризующий отношений  $\sigma_{yy}/\sigma_{xx}$ . Чем больше это соотношение, тем больше градиент перепада напряжений и вероятность разрушения пород. На рисунке 4.9 показано распределение отношения действующих напряжений  $\sigma_{yy}/\sigma_{xx}$  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 4.9а видно, что в северной части модели и на юго-востоке Верхнешумихинского разлома имеются знакопеременные градиенты напряжений. Рисунки 4.9б и 4.9в в принципе повторяют распределение, показанное на рисунке 4.9а. На рисунке 4.9г знакопеременные градиенты напряжений в юга-восточной части строительной площадки. Область строительной площадки ПИЛ располагается в зоне низких градиента перепада напряжений.

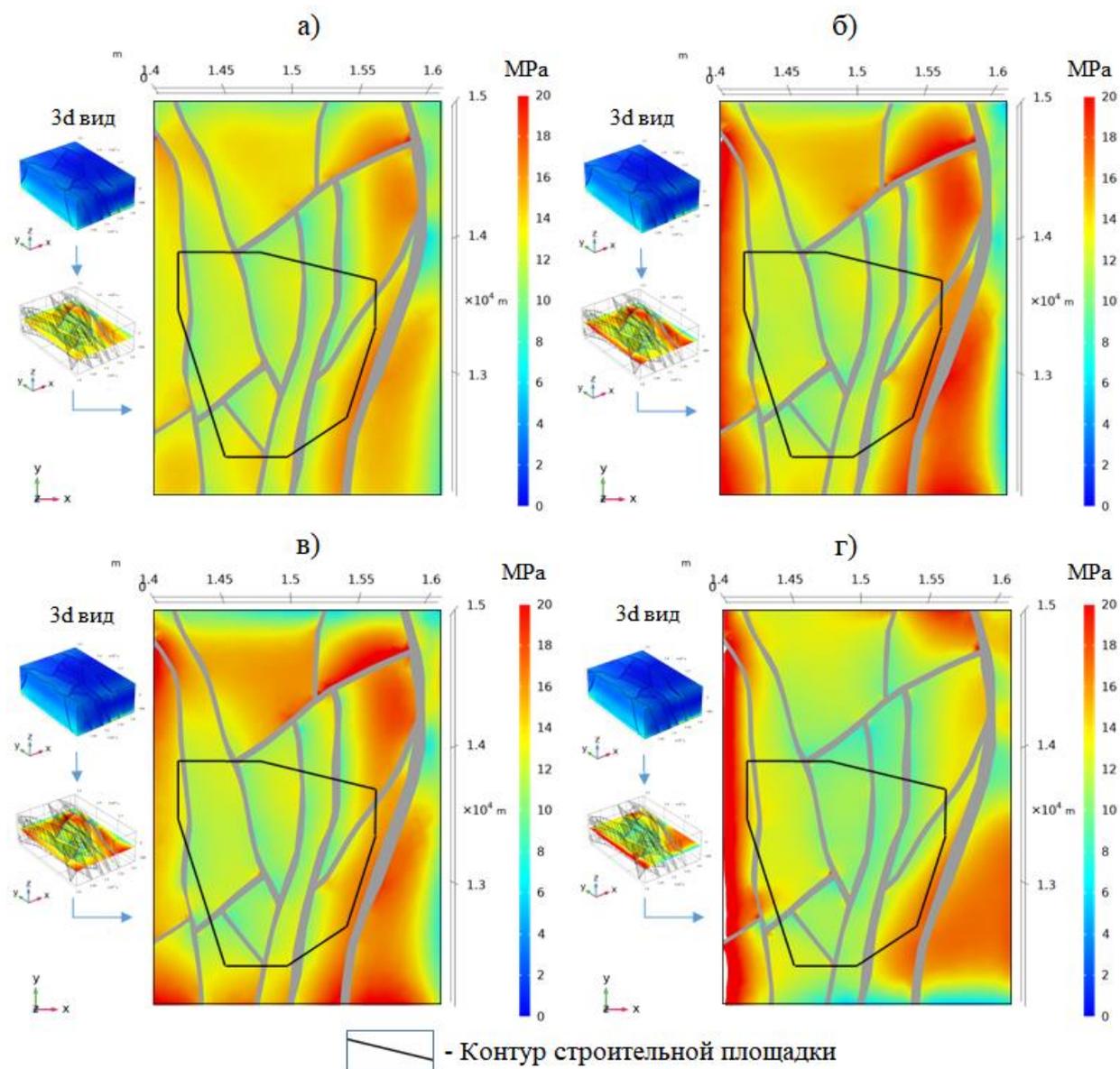


Рисунок 4.8 – Распределение интенсивности напряжений  $\sigma_i$  на глубине 450 м для вариантов: а) – только гравитационное давление; б)  $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 0,5$ ; в)  $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 2$ ; г) по результатам ГНСС-измерений (табл. 4.2, строка 4)

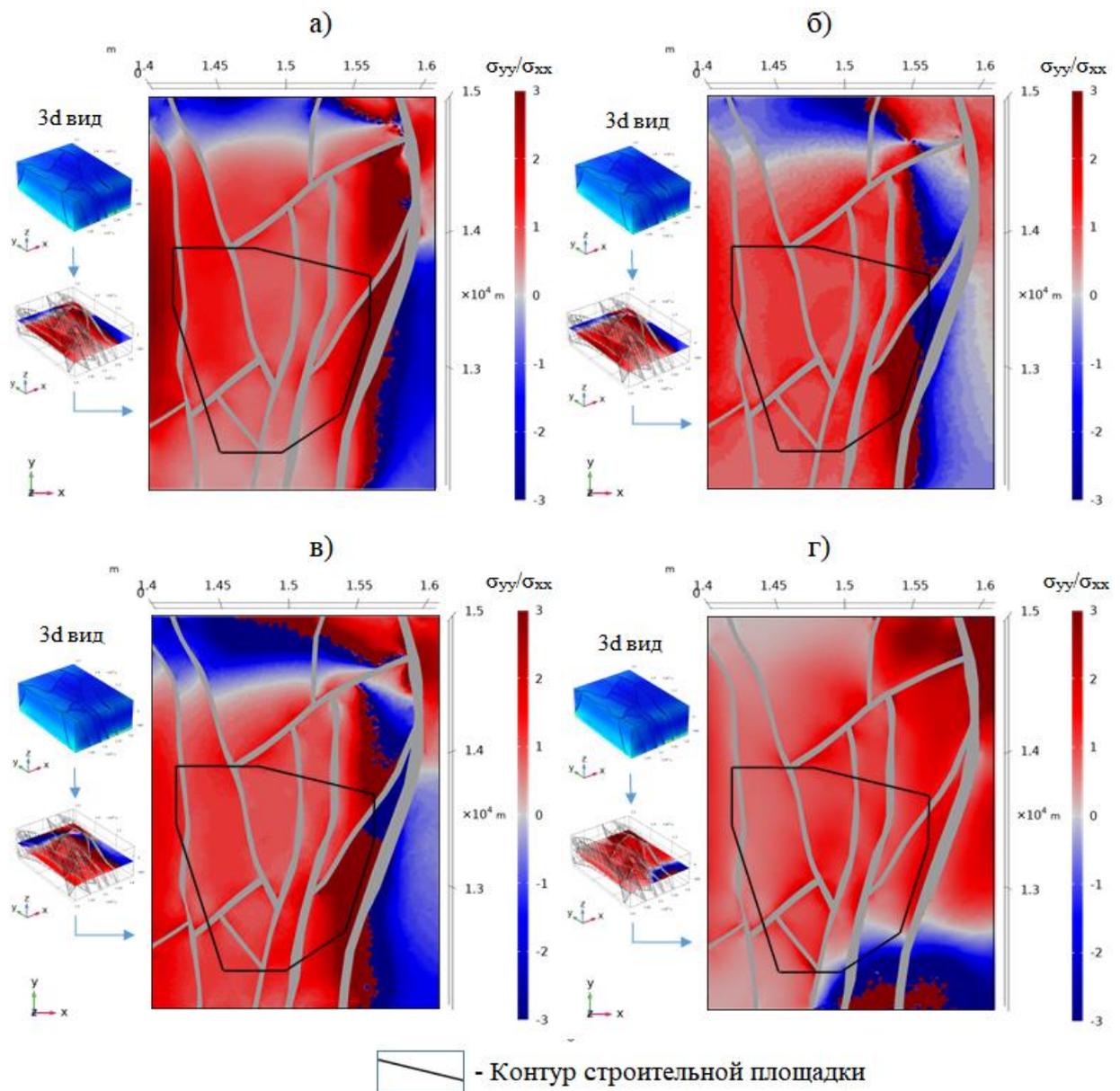


Рисунок 4.9 – Распределение отношения действующих напряжений  $\sigma_{yy}/\sigma_{xx}$  на глубине 450 м для вариантов: а) – только гравитационное давление; б)  $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 0,5$ ; в)  $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 2$ ; г) по результатам ГНСС-измерений (табл. 4.2, строка 4)

### **4.3 Комплексный анализ геомеханической модели и оценка устойчивости породного массива**

Трехмерные геомеханические модели показывают, как распределяются свойства пород и напряжения в пространстве в зависимости от внешнего поля напряжений, обеспечивая важную основу для проектирования подземных сооружений. Выше были представлены результаты многовариантного моделирования НДС на глубине 450 м. В данном разделе представлены результаты сравнения полученных эффективных напряжений с известными критериями разрушения. Необходимо подчеркнуть, что этот анализ не является основой для расчетов крепления или параметров выработок, как это делается на горнорудных объектах. В данном случае целью является качественная оценка распределений полей напряжений для рекомендаций - где поставить детальные геомеханические эксперименты.

#### **4.3.1 Оценка прочности горных пород**

Критерия Хука-Брауна представляет собой модель поведения горных пород, которая является обобщением критерия Кулона-Мора. «Он включает дополнительные параметры, позволяющая более точно определять прочность горных пород в естественных условиях. Этот критерий основан на результатах множества экспериментальных исследований и широко применяется в горнопромышленном производстве, строительстве и геотехнике» [121, 124].

Для определения прочности пород Нижне-Канского массива участка «Енисейский» использованы следующие параметры: геологический индекс прочности ( $GSI$ ) и структурный индекс ( $m_i$ ), а коэффициент техногенной нарушенности массива не был использован так как характеризует техногенную нарушенность в процессе проходки выработок ( $D$ ) [78, 79].

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 [91].

Для определения  $GSI$  могут использоваться различные рейтинговые системы, такие как Rock Mass Rating ( $RMR$ ),  $Q$ -индекс Бартона и  $RQD$  [91]:

$$GSI = 1,5 \cdot J_{cond_{89}} + \frac{RQD}{2}, \quad (4.3)$$

где  $J_{cond_{89}}$  — коэффициент трещиноватости горных пород (из системы  $RMR_{89}$ )

$$\text{для } RMR_{89} > 23: GSI = RMR_{89} > -5; \quad (4.4)$$

$$\text{для } RMR_{89} < 23: GSI = RMR_{89}; \quad (4.5)$$

$$GSI = 9 \cdot \log_e Q' + 44; \quad (4.6)$$

На основе уравнений, связывающих геологический индекс прочности  $GSI$  с рейтинговыми показателями, было произведено его вычисление по формуле 4.6. Расчетный показатель  $GSI$  для гранита-гнейсовых пород равняется 80, что соответствует значениям, приведенным в работе [123]. Значения предела прочности горных пород был использован с учетом влияния тепла, где прочность снижается на 14% и составляет 112 МПа. Структурный индекс  $m_i = 25$  для гранита-гнейсов и метадолеритов. Модуль деформаций 68,25 ГПа (табл. 3.1).

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, такие как сцепление ( $c'$ ), угол внутреннего трения ( $\varphi'$ ) и прочностные свойства пород в массиве, такие как прочность на растяжение, одноосное и объемное сжатие, а также модуль деформации» [121, 124]. Значение показателей приведены в таблице 4.3. Графическое представление

обобщенного метода Хука-Брауна представлено на рисунке 4.10. Данные параметры будут использованы в разделе 4.4 для анализа напряженного состояния.

Таблица 4.3 – 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

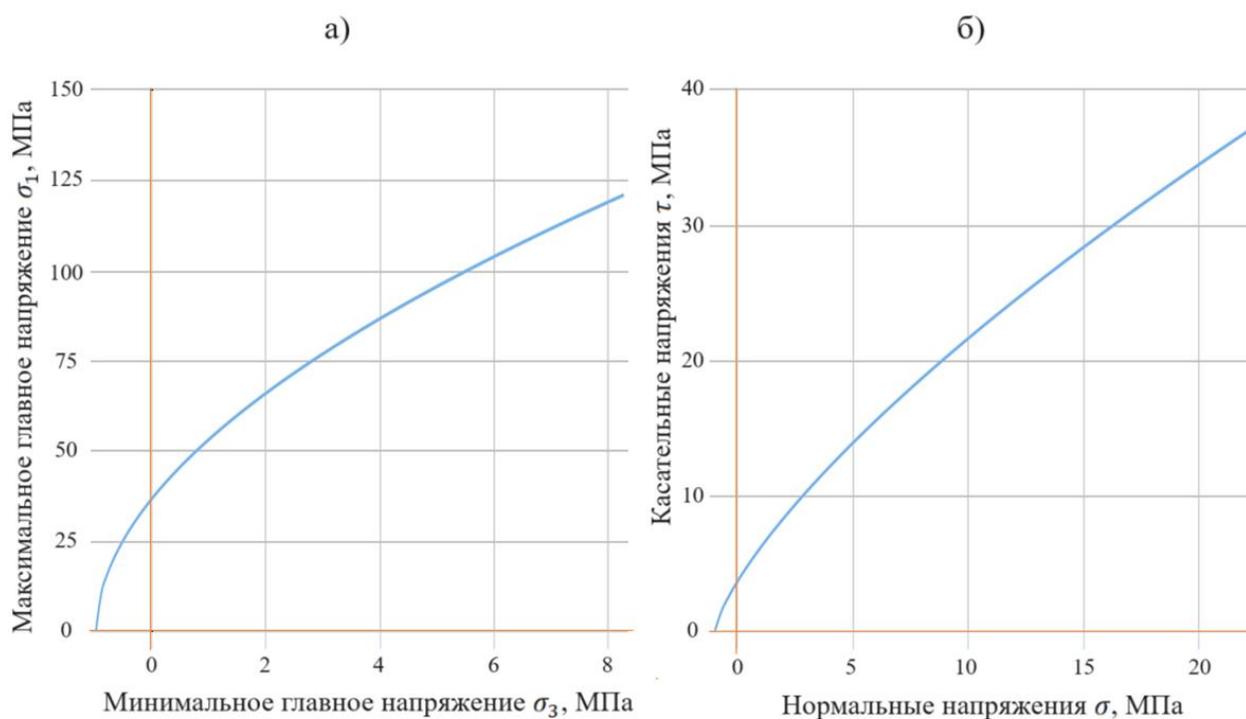


Рисунок 4.10 – Определения параметров прочности горных пород на основе обобщенного метода Хука-Брауна [127, 128] — гнейс, метадолерит, в массиве горных пород участка «Енисейский»: в пространстве главных напряжений (а); в пространстве касательных и нормальных напряжений (б).

### **4.3.2 Анализ прочности горных пород, находящихся в естественных условиях массива, с использованием критерия Хука-Брауна**

Полученные вариационные модели НДС были проанализированы с использованием критерия разрушения Хука-Брауна (см. раздел 4.3.1). На рисунке 4.11 показано распределение напряжений по данному критерию. При наличии только трех направлений главных напряжений породы будут разрушаться в том случае, если максимальное значение из трех главных напряжений достигнет критического, которое зависит от их прочности при растяжении и сжатии, описанных в главе 2 (раздел 2.1).

На рисунке 4.11 общая тенденция показывает, что все варианты демонстрируют относительно большой запас прочности по сжатию (19,5 МПа). На рисунке 4.11а можно также наблюдать, что максимальные значения сжатия (18,6 МПа) наблюдаются в северо-восточной части Верхнешумихинского разлома и северной части Безымянного 2 разлома. Рисунок 4.11б 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, приуроченной к Верхнешумихинскому разлому. На рисунке 4.11в максимальные значения сжатия превышают 20 МПа и проявляются в зоне ПИЛ.

Рисунок 4.11г демонстрирует такое же распределение напряжений, как и на рисунке 4.11б 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 4.3). 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.

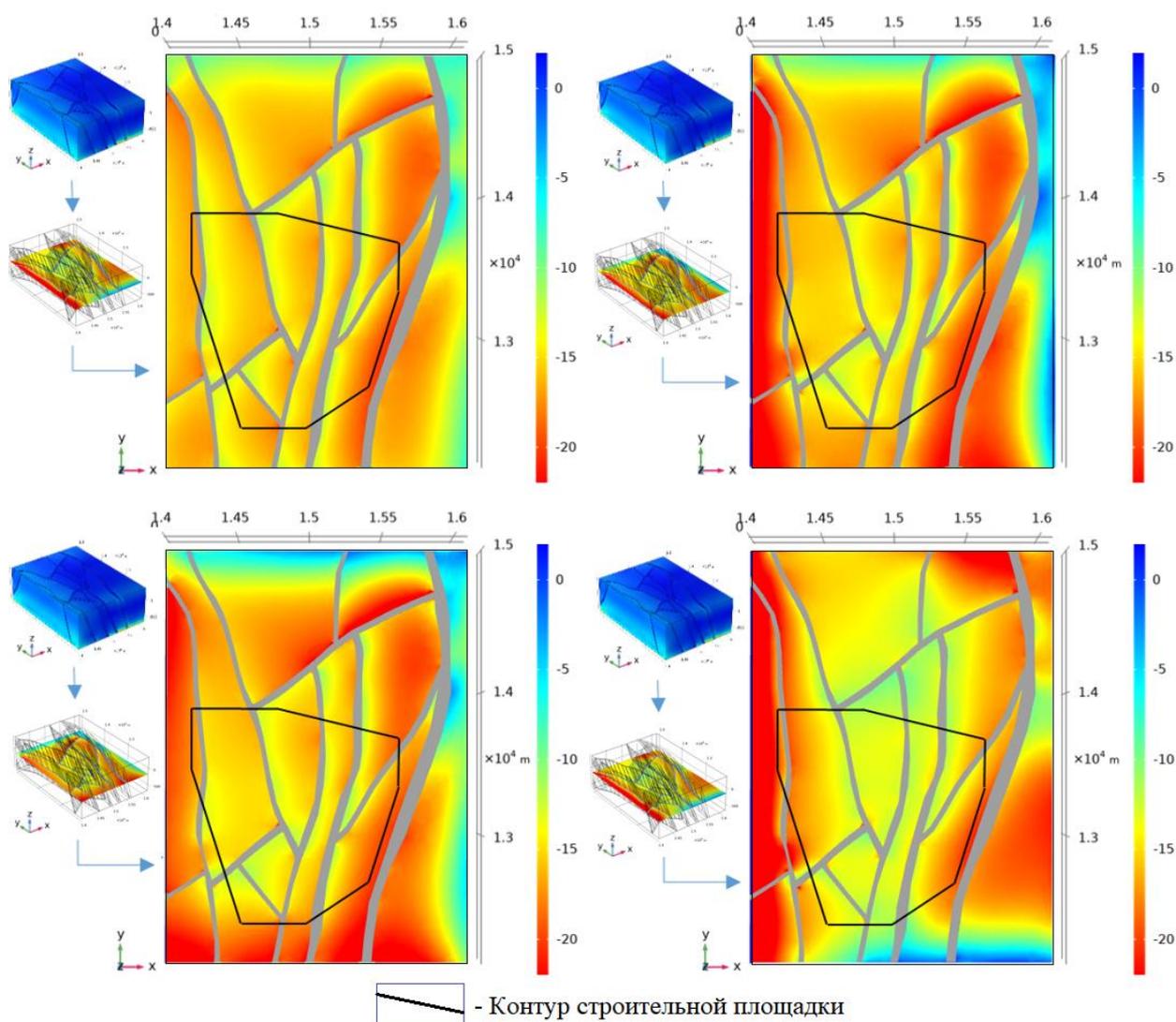


Рисунок 4.11 – Распределение напряжений по критериям Хука-Брауна на глубине 450 м для вариантов: а) – только гравитационное давление; б)  $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 0,5$ ; в)  $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 2$ ; г) по результатам ГНСС-измерений (табл. 4.3, строка 4)

### 4.3.3 Анализ результатов, полученных на основе энергетического подхода

Полученные вариационные модели НДС были проанализированы на предмет устойчивости с использованием энергетического подхода (см. раздел 2.3).

На рисунке 4.12 представлено распределение критерия концентрации интенсивности энергии  $\delta$ , который был получен путем суммирования показателей  $\alpha(x, y)$ ,  $\beta(x, y)$  и  $\gamma(x, y)$ , описанных в главе 2.4.

Из результатов видно, что участок строительства ПИЛ попадает в область, где величина концентрация интенсивности энергии  $\delta = 0.4-0.5$ . На рисунке 4.12а можно наблюдать, что максимальные концентрация интенсивности энергии  $\delta$  находятся на стыке двух тектонических разломов в северо-западной части Верхнешумихинского разлома с Безымянным разломом 2. На рисунке 4.12б наблюдаются максимальные значения концентрация энергии  $\delta$ , приуроченные структурным блокам, большинство из которых связаны с Верхнешумихинским и Безымянным разломами 2. Похожие значения также наблюдаются на стыках разломов РН6 и РН7 в западной части строительной площадки.

Рисунок 4.12в полностью повторяет рисунок 4.12б. На рисунке 4.12г максимальный показатель концентрация интенсивности энергии  $\delta$  наблюдается в юго-западной части строительной площадки и связан с Безымянным разломом. Также наблюдается аномальная зона 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 Безымянным 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.

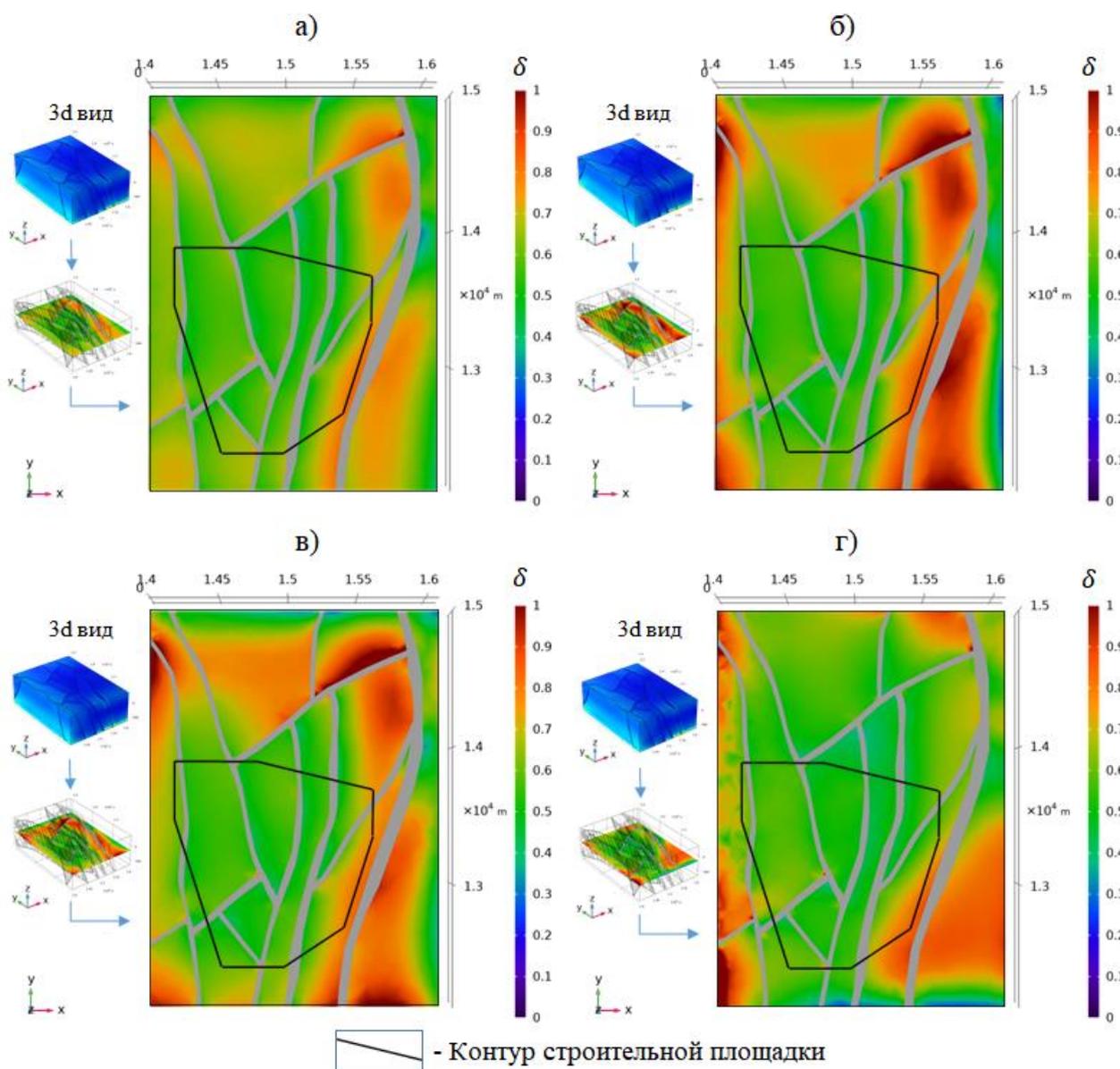


Рисунок 4.12 - Распределение критерия концентрации интенсивности энергии  $\delta$  по [102] (формула 2.30) на глубине 450 м для вариантов: а) – только гравитационное давление; б)  $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 0,5$ ; в)  $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 2$ ; г) по результатам ГНСС-измерений (табл. 4.3, строка 4)

#### 4.3.4 Корреляционный анализ результатов моделирования

Корреляционная матрица в контексте многомерного моделирования является важным инструментом для изучения взаимосвязей между переменными в многомерном наборе данных. Она предоставляет информацию о степени линейной зависимости между всеми парами переменных. Для решения поставленной задачи были рассчитаны корреляционные матрицы по четырем вариантам моделирование.

Для характеристики взаимосвязи между всеми измеряемыми параметрами используется шкала Чеддока. По показателю интенсивности напряжений связь между первыми тремя вариантами является очень высокой и составила от 0.9 до 1, в то время как для варианта 4 этот показатель равен 0.6 – 0.7, ближе к уровню средней связи.

Распределение действующих напряжений также показывает высокую связь для первых трех вариантов (0.7 – 0.9), в то время как для варианта 4 этот показатель равен 0.4, что характеризует связь как слабую. Распределение напряжений, оцениваемое согласно критериям Хука-Брауна, демонстрирует высокую степень взаимосвязи между всеми вариантами, характеризуемыми коэффициентами корреляции в диапазоне от 0,8 до 0,9. Эти значения свидетельствуют о сильной статистической взаимосвязи между рассматриваемыми переменными, что подчеркивает тесные взаимосвязи между ними. Критерий концентрации интенсивности энергии также подтверждает высокую связь между первыми тремя вариантами (0.7 – 0.9), в то время как для варианта 4 этот показатель составляет 0.4 - 0.5, что свидетельствует о переходе от слабой связи к связи умеренного уровня. Корреляционная зависимость между вариантами моделирование показана в таблице 4.4.

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 4.4 – Корреляционная зависимость между вариантами моделирование

<b>Распределение интенсивности напряжений</b>				
	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	
<b>Распределение отношения действующих напряжений <math>\sigma_{yy}/\sigma_{xx}</math></b>				
	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	
<b>Распределение напряжений по критериям Хука-Брауна <math>\sigma_1</math></b>				
	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	
<b>Распределение критерия концентрации интенсивности энергии <math>\delta</math></b>				
	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	

#### 4.4 Создание блочной геомеханической модели

Для комплексного пространственного анализа была создана блочная геомеханическая модель. Для создания модели породный массив был разбит на блоки размером 10x10x10 метров. Для более детального описания

геологических различий на контактах между блоками был использован метод субблокирования, с разбиением блока еще на 10 частей.

На рисунке 4.13 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, 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, что характеризует степень устойчивости как низкую. Закономерно, что с увеличением расстояния от разрывных зон значения начинают увеличиваться и превышают 20, что свидетельствует о переходе от средней к высокой степени устойчивости. В ненарушенных блоковых структурах массива фоновые значения колеблются от 100 до 300, что характеризует степень устойчивости как высокую и очень высокую. 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.

В трехмерной блочной модели также были интегрированы данные о напряжениях, полученные в результате численного моделирования с использованием программного обеспечения COMSOL Multiphysics. Для примера на рисунке 4.14 представлена блочная модель исследуемого участка, визуализированная по рейтинговым показателям и напряженного состояния, с использованием цветовой разметки [121].

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

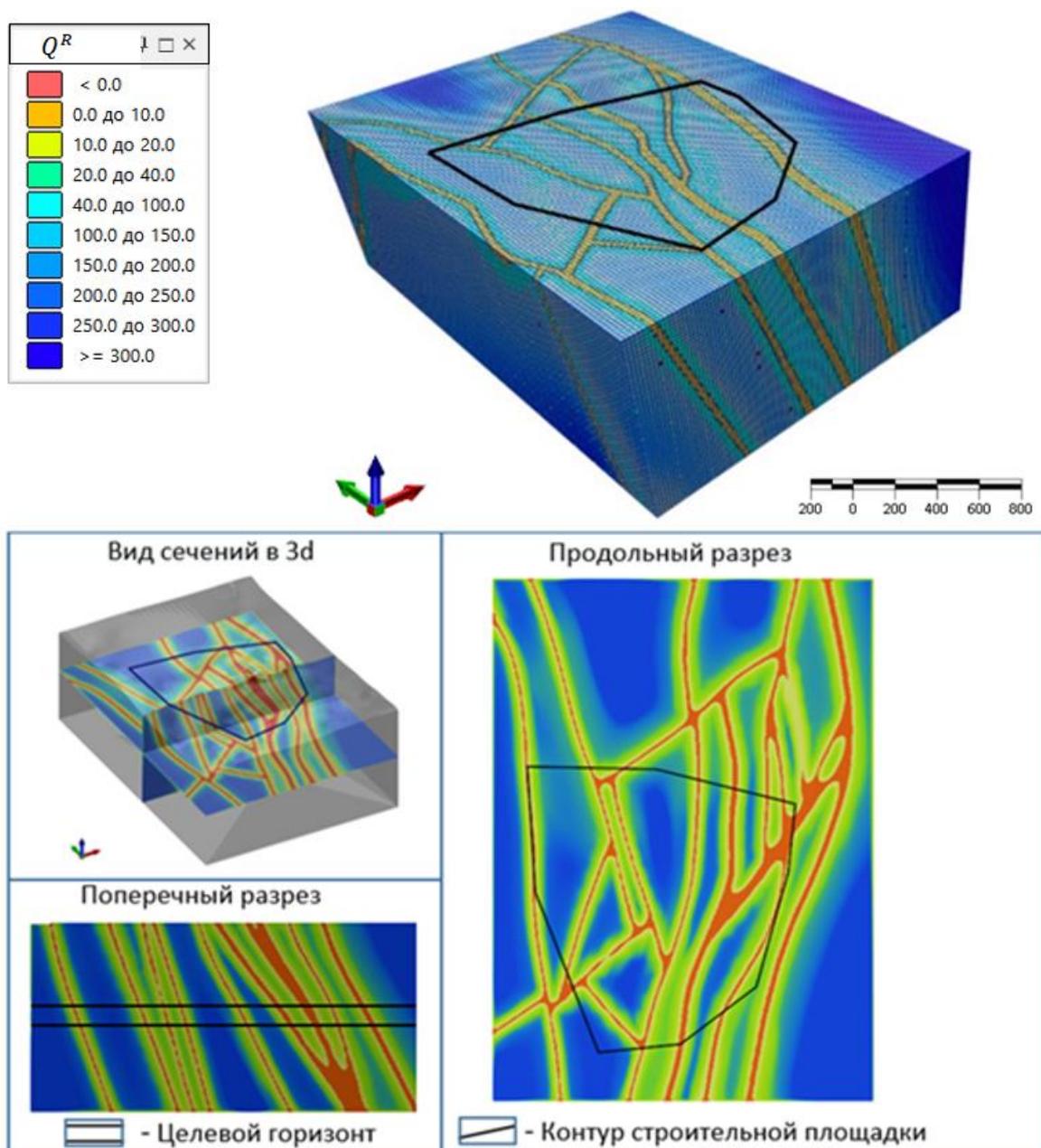


Рисунок 4.13 – Объединённая блочная геомеханическая модель раскрашенная в соответствии с системой  $Q'$

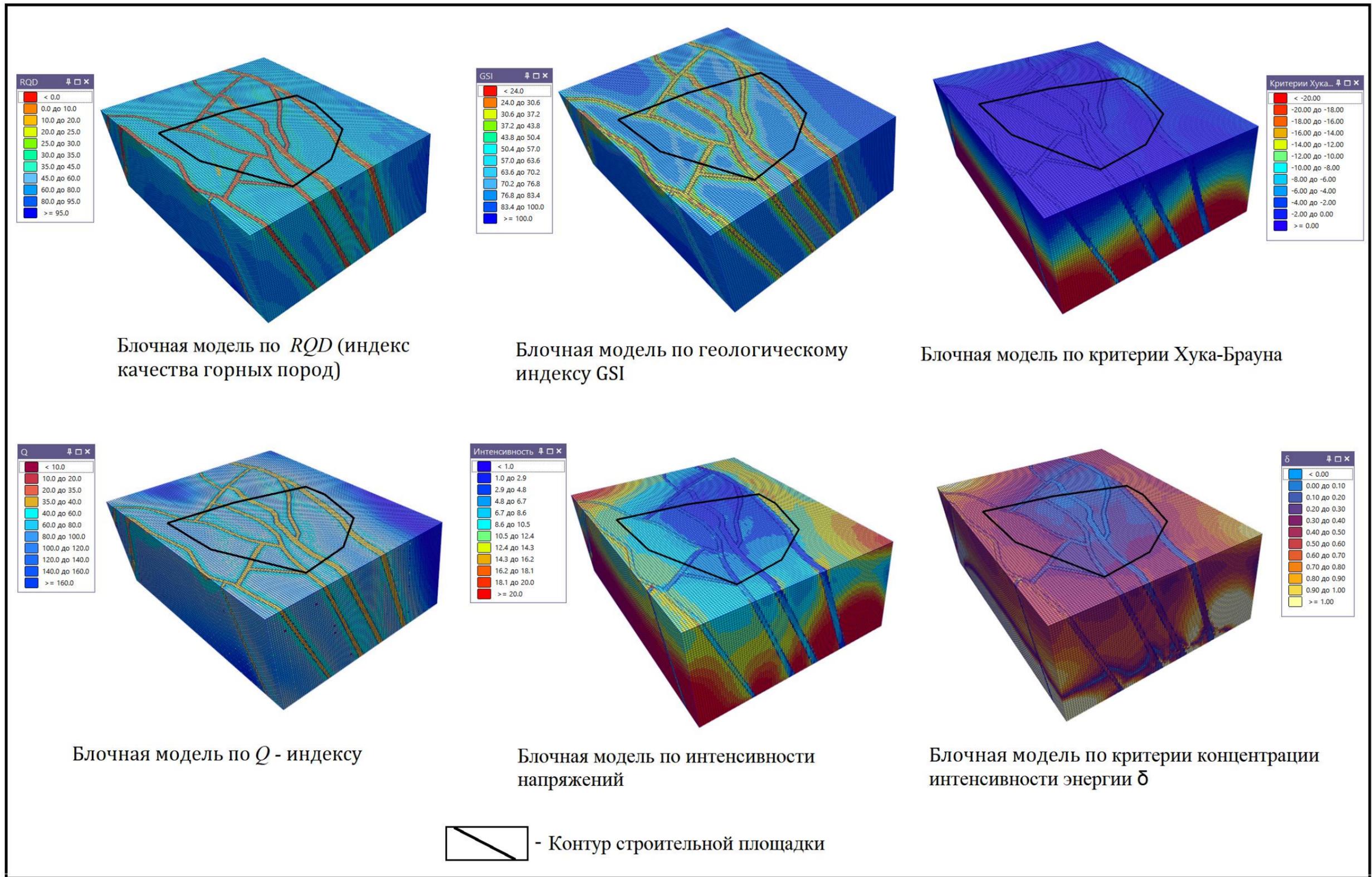


Рисунок 4.14 – Трёхмерная блочная модель по геомеханическим параметрам (Цифровой двойник Нижне-Канского гранита-гнейсового массива участка «Енисейский»)

## 4.5 Рекомендации по проведению экспериментальных геомеханических исследований при строительстве и эксплуатации ПИЛ

Проведение экспериментальных геомеханических исследований при строительстве и эксплуатации подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) требует тщательного планирования и методологического подхода.

Интеграция различных моделей в одну пространственную среду для оценки параметров напряженного состояния и устойчивости геологической среды — важный и сложный процесс. Для преобразования расчетной модели НДС в регулярную точечную модель с показателями напряженного состояния в программном продукте *Micromine Origin & Beyond* помогает выполнить комплексный анализ исследуемого участка.

Для рекомендации по расположению камер необходимо рассматривать данный вопрос на различных уровнях (иерархический уровень). В качестве примера на рис. 4.15 представлена блочная модель в соответствии с  $Q$ -системой Бартона. Комплексное использование блочной рейтинговой модели и модели напряженно-деформированного состояния (НДС) обеспечивает возможность точной оценки безопасного расположения камер выработок, а также оценки их устойчивости. Этот подход также позволяет подбирать определенные типы креплений, учитывая разнообразные параметры пород и их устойчивость.

Важно отметить, что при проектировании выработок также требуется провести полную рейтинговую оценку по системе  $Q$  (оценка устойчивости выработок). Необходимо подчеркнуть, что системы классификации, как правило, основаны на эмпирических зависимостях, требующих проверки геологами и геомеханиками с помощью соответствующих лабораторных и натурных инструментальных исследований.

Также с учетом уникальности исследуемого объекта предлагается связать предложенную модифицированную рейтинговую классификацию  $Q^R$  с другими показателями и параметрами (таблица 4.5), влияющими на

устойчивость выработок, может быть весьма полезным, особенно в контексте захоронения РАО в геологической формации. Такой подход позволяет создать более комплексную систему оценки и выбора креплений, учитывая специфические параметры захоронения радиоактивных отходов и их влияние на геологическую формацию.

Таблица 4.5 – Категории устойчивости выработок в зависимости от класса качества массива

Значение рейтинговых показателей	Класс качества массива				
	Класс I	Класс II	Класс III	Класс IV	Класс V
	Очень хороший	Хороший	Удовлетворительный	Плохой	Очень плохой
Q-system	$40 < Q$	$10 < Q \leq 40$	$4 < Q \leq 10$	$1 < Q \leq 4$	$Q \leq 1$
RMR	$100 \div 81$	$80 \div 61$	$60 \div 41$	$40 \div 21$	$< 20$
GSI	$80 < GSI$	$72 < GSI \leq 80$	$60 < GSI \leq 72$	$51 < GSI \leq 60$	$GSI \leq 51$
$Q^R$	$100 < Q^R$	$40 < Q^R \leq 100$	$20 < Q^R \leq 40$	$10 < Q^R \leq 20$	$Q^R \leq 1$
Категория устойчивости выработки по рейтингам GSI, RMR и Q-system					
Q-system	Весьма устойчивый	Устойчивый	Умеренно устойчивый	Неустойчивая	Весьма неустойчивая
RMR	Весьма устойчивый	Устойчивый	Умеренно устойчивый	Неустойчивая	Весьма неустойчивая
GSI	Весьма устойчивый	Устойчивый	Умеренно устойчивый	Неустойчивая	Весьма неустойчивая
Категория устойчивости массива по $Q^R$					
$Q^R$	Весьма устойчивый	Устойчивый	Умеренно устойчивый	Неустойчивая	Весьма неустойчивая

Также для изучения НДС рекомендуется выполнять на следующем – иерархическом уровне, который позволяет моделировать НДС вокруг выработок, ПИЛ (рис. 4.16). Конечным итогом работ стали рекомендации по организации комплекса геомеханических инструментальных наблюдений в наиболее неустойчивых местах сопряжений массива и горных выработок.

Такой подход помогает инженерам и специалистам, вписывается в концепцию создания «цифровых двойников» промышленных объектов, и, в перспективе, позволяет создать единый пространственно-информационный контекст геомеханической части моделирования жизненного цикла ПИЛ-ПГЗРО и учитывать параметры пород при планировании и проведении горных работ, увеличивая безопасность и эффективность процесса.

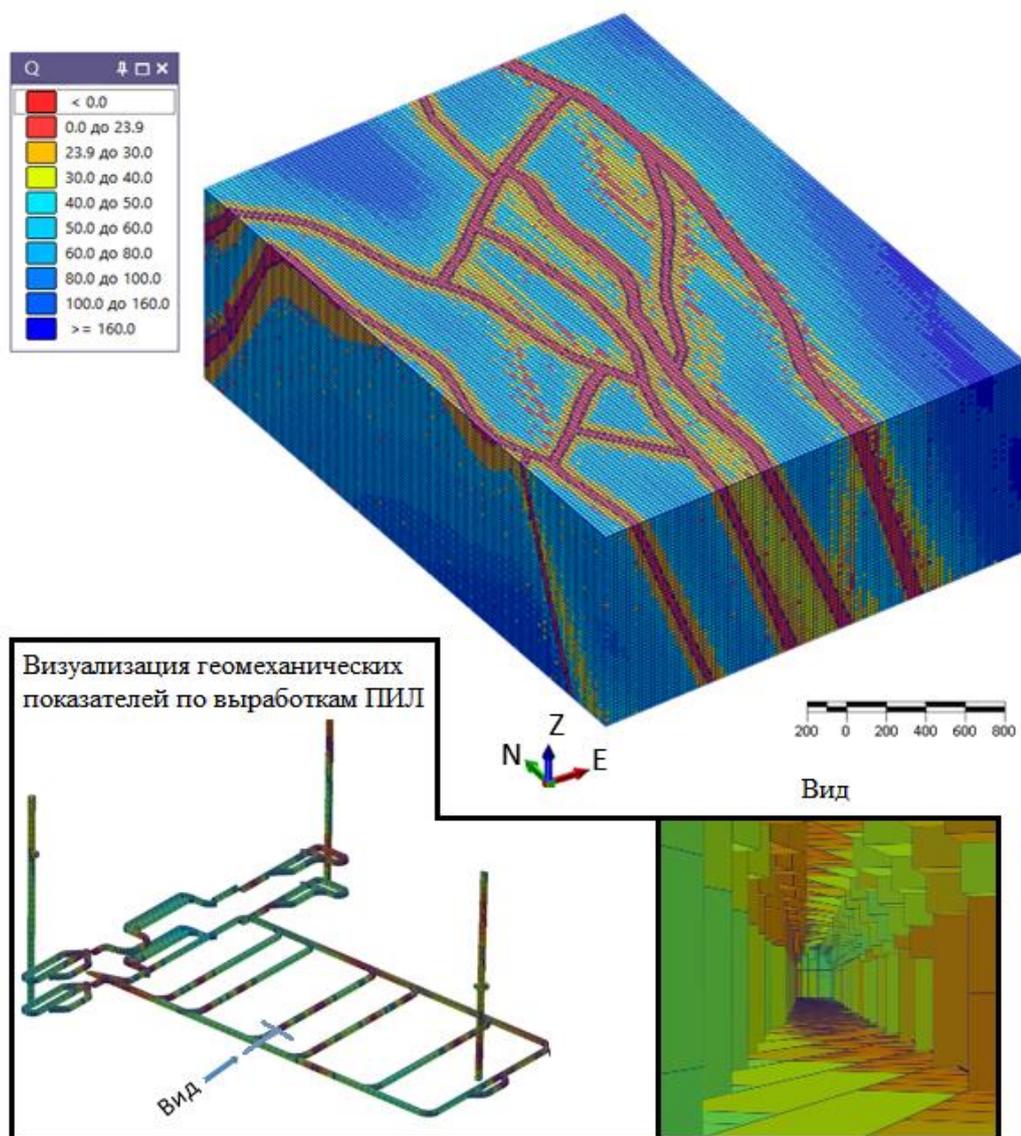


Рисунок 4.15 – Визуализация параметров напряженного состояния и устойчивости геологической среды в виде трехмерной блочной геомеханической модели ГГИС «*Micromine Origin & Beyond*»

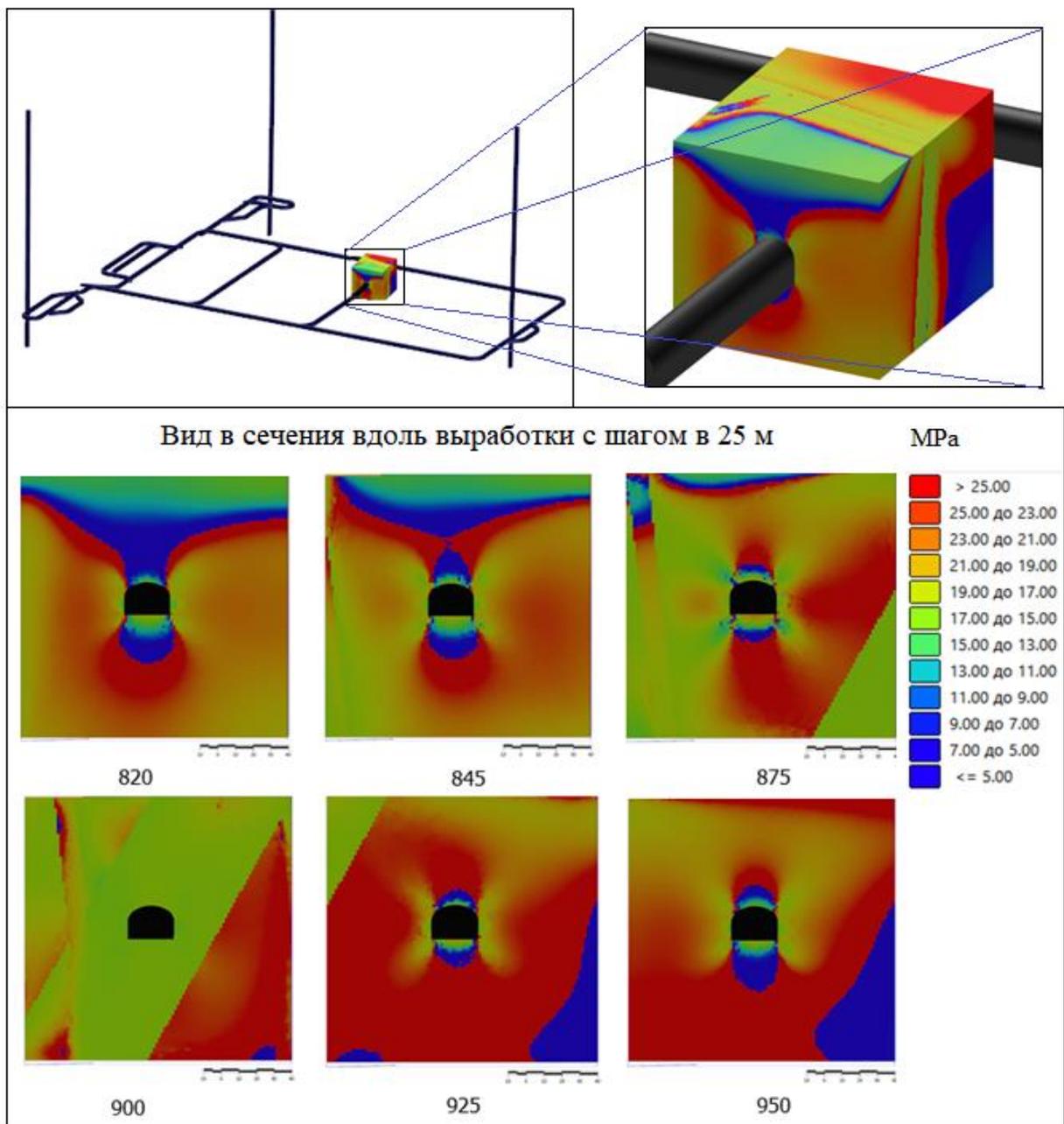


Рисунок 4.16 – Моделирование НДС на самом низком уровне – соотношение горизонтальных действующих напряжений  $\sigma_y/\sigma_x$  для выработок ПИЛ

## Выводы по главе 4

1. По предложенной рейтинговой классификации была выполнена оценка устойчивости геологической среды участка Енисейского Нижне-Канского массива. Согласно данной классификации, выбранный участок представляет собой подходящее место для захоронения РАО. Из-за относительно высокой плотности трещиноватости в зонах воздействия динамических разломов и присутствия метаморфических пород, предполагается провести дополнительную оценку массива после проведения подземных горных работ.

Однако важно отметить, что данная классификация основана на текущих данных, которые до сих пор относительно ограничены. Классификация участка Енисейского массива опирается лишь на информацию, полученную из шести скважин. Следовательно, полученные результаты классификации требуют дальнейшей проверки с учетом дополнительной характеристики данной территории по мере ее изучения.

2 Для многовариантного моделирование главной задачей является задание граничных условий. Ключевым фактором создания геомеханических моделей являются граничные условия модели: условия внешних и внутренних источников нагрузок, закрепления модели; сетка конечных элементов, учет краевых эффектов при моделировании, принятые физико-механические свойства и т.д. Были приняты следующие варианты граничных условий:

а) Только гравитационное давление, что представляет собой естественное воздействие влияния силы тяжести на объект.

б) Основано на геологических данных  $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 1/2$ , отражающее отношение между вертикальным и горизонтальным напряжениями в соответствии с геологическими характеристиками.

в) Пессимистичный прогноз  $\sigma_{yy}/\sigma_{xx} = 2$ , отображающий более высокое отношение между вертикальным и горизонтальным напряжениями в геологической среде.

г) Основано на результатах ГНСС-измерений, вероятно, учитывающих актуальные значения напряжений на местности по результатам измерений с использованием глобальных навигационных систем.

Эти варианты граничных условий позволяют оценить различные сценарии воздействия на геологическую среду и позволяют учесть различные физические и геомеханические факторы в моделировании с целью более точного предсказания поведения горной среды.

3. Проведенный анализ результатов моделирования выявил наличие локальных областей повышенных напряжений в геологическом массиве, которые коррелируют с тектоническими структурами. Однако, в целом, результаты численного моделирования указывают на значительный запас прочности в области строительной площадки.

Помимо этого, было выполнено интегрирование различных геомеханических параметров в единую цифровую среду с целью комплексной оценки устойчивости геологической среды с использованием программного обеспечения Micromine Origin & Beyond.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся завершённой научно-квалификационной работой, на основе выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований проведена оценка устойчивости породного массива с использованием трёхмерной 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 трёхмерных 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 (Приложение А), 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.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кочкин Б.Т. Геологический подход к выбору районов захоронения радиоактивных отходов. М.: Наука, 2005. – 115 с.
2. Борнеманн О., Мингерцан Г., Белау Й., Шрамм, Й., Хаммер Й. Соляной диапир Горлебен как потенциальный могильник для радиоактивных отходов в Германии. Основные результаты // Геоэкология. 2004. М. С. 65-85.
3. Абалкина И. Л., Большов Л. А., Капырин И. В., Линге И. И., Савельева Е. А., Свительман В.С., Уткин С. С. Обоснование долговременной безопасности захоронения ОЯТ и РАО на 10 000 и более лет: методология и современное состояние. Препринт ИБРАЭ № 2019-03 — М: ИБРАЭ РАН, 2019. — 40 с.
4. Лаверов Н.П., Величкин В.И., Омеляненко Б.И., Петров В.А., Тарасов Н.Н. и др. Новые подходы к подземному захоронению высокоактивных отходов в России // Геоэкология. № 1. 2000. С. 3-12.
5. Дорофеев А.Н., Большов Л.А., Линге И.И., Уткин С.С., Савельева Е.А. Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2017. №1. С.33-42.
6. НП-100-17. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов.
7. НП-064-17. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии.
8. НП-055-14. Федеральные нормы и правила. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности.
9. РБ-003-21. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Оценка долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов.

10. РБ-019-18. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Оценка исходной сейсмичности района и площадки размещения объекта использования атомной энергии при инженерных изысканиях и исследованиях.

11. Татаринov В.Н., Морозов В.Н., Кафтан В.И., Маневич А.И. Современная геодинамика южной части Енисейского кряжа по данным ГНСС наблюдений // Геофизические исследования. 2018, том 19, № 4. С.64-79. <https://doi.org/10.21455/gr2018.4-5>. ИФ РИНЦ- 0,608.

12. Морозов В.Н., Татаринov В.Н., Кафтан В.И., Маневич А.И. Подземная исследовательская лаборатория: геодинамические и сейсмотектонические аспекты безопасности // Радиоактивные отходы. - 2018. - №3(4). - С.16-29.

13. Гвишиани А.Д., Татаринov В.Н., Кафтан В.И., Маневич А.И., Минаев В.А., Устинов С.А., Шевчук Р.В. Геодинамическая модель северной части Нижнеканского массива: разломная тектоника, деформации и дефицит смещений // Доклады академии наук. Науки о Земле. 2022, том 507, №1. С. 67-74.

14. Татаринov В.Н. Геодинамическая безопасность на объектах ядерного топливного цикла // Бюллетень «Использование и охрана природных ресурсов в России». № 1. 2006. С. 46-51.

15. Баклашов И.В. Геомеханика: учебник для вузов. В 2-х т. т.1. Основы геомеханики. - М.: МГГУ, 2004. - 208 с.

16. Андерсон Е. Б., Белов С.В., Камнев Е.Н., Колесников И.Ю., Лобанов Н.Ф., Морозов В.Н., Татаринov В.Н. Подземная изоляция радиоактивных отходов. М.: Издательство «Горная книга». 2011. 592 с.

17. Захоронение радиоактивных отходов, Конкретные требования безопасности № SSR-5, Нормы МАГАТЭ по безопасности, МАГАТЭ, – Вена, 2011 г.

18. NEA/RWM/R (2013)1. Radioactive Waste Management. The Nature and Purpose of the Post-Closure Safety Cases for Geological Repositories – OECD, 2013.
19. Требования к разведке места для захоронения ВАО в скальной горной породе (АСТЕР) // ДБЕ Технолоджи ГмбХ, ВНИПИ ПТ. 2005. 473 с.
20. Цебаковская Н. С., Уткин С. С., Пронь И. А., Коновалов В. Ю. Зарубежные проекты захоронения ОЯТ и РАО. Зарубежные проекты захоронения ОЯТ и РАО. Часть 3. Зарубежный опыт создания и эксплуатации подземных исследовательских лабораторий / Препринт ИБРАЭ № ИБРАЭ-2017-12. Москва: ИБРАЭ РАН, 2017. — 34 с.
21. IAEA (International Atomic Energy Agency) 2001. The use of scientific and technical results from underground research laboratory investigations for the geological disposal of radioactive waste, IAEA-TECDOC1243, International Atomic Energy Agency, Vienna, September 2001.
22. NEA (Nuclear Energy Agency) 2013. Underground Research Laboratories (URLs), NEA Report No. 78122, Radioactive Waste Management, NEA/RWM/R (2013) 2, February 2013, [www.oecdnea.org](http://www.oecdnea.org), Paris, France: OECD 2013.
23. Дорофеев А.Н., Большов Л.А., Линге И.И., Уткин С.С., Савельева Е.А. Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2017. №1. С.33-42.
24. Коваленко А.А., Захаров Н.Е., Пул Е.К., Золотин В.Г. Геомеханические аспекты разработки кимберлитового месторождения трубки «Интернациональная» // Горный журнал. 2019. №2. С. 27-31. DOI: 10.17580/gzh.2019.02.05.
25. Tatarinov V.N., Kaftan V.I., Seelev I.N. Study of the Present-Day Geodynamics of the Nizhnekansk Massif for Safe Disposal of Radioactive Wastes

// Atomic Energy. 2017. Vol. 121. Iss. 3. P. 203-207. DOI:10.1007/s10512-017-0184-5.

26. Morozov V.N., Tatarinov V.N., Batugin A.S. An underground research laboratory: new opportunities in the study of the stress-strain state and dynamics of rock mass destruction (problem Definition) // Russian Journal of Earth Sciences. 2019. Vol 19. No. 2. P. 1-13. DOI:10.2205/2019ES000659.

27. Manevich A.I., Tatarinov V.N., Kolikov K.S. Detection of crustal deformation anomalies with regard to spatial scale effect // Eurasian mining. 2019. №2. P. 19-22. DOI: 10.17580/em.2019.02.04.

28. Joutsenvaara J., Holma M., Kotavaara O., Puputti J. Callio Lab – the deep underground research centre in Finland, Europe // Journal of Physics Conference Series. 2021. Vol. 2156. 012166. DOI:10.1088/1742-6596/2156/1/012166.

29. Zhang Q., Liu C., Duan K., Zhang Z., Xiang W. True three-dimensional geomechanical model tests for stability analysis of surrounding rock during the excavation of a deep underground laboratory // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2020. Vol. 53. P. 517-537. DOI:10.1007/s00603-019-01927-0.

30. Цебаковская Н.С., Уткин С.С., Капырин И.В., Медянцев Н.В., Шамина А.В. Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО. – М.: Комтехпринт, 2015. – 208 с.

31. Koyama T., Chijimatsu M., Shimizu H., Nakama S., Fujita T., Kobayashi A., Ohnishi Y. Numerical modeling for the coupled thermo-mechanical processes and spalling phenomena in Äspö Pillar Stability Experiment (APSE) // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2013. Vol. 5. P. 58-72. DOI: 10.1016/j.jrmge.2013.01.001.

32. Cristina M.S., Adriana P., Robert W.Z., Diego M.I. Fracture growth leading to mechanical spalling around deposition boreholes of an underground nuclear waste repository // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2022. Vol. 152. P. 105038. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2022.105038.

33. Иофис М.А., Певзнер М.Е., Попов В.Н. Геомеханика. Учебник для вузов // Бюллетень московского общества испытателей природы. Отделение геологии., Москва, 2005 г., 438 стр., УДК: 622.831.31, ISBN: 5-7418-0384-9.
34. Варга А.А. Эмпирические классификации скальных массивов. Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, № 2, 1995, стр. 27-43.16.
35. Barton, N., Lien, R., Lunde, J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mech.* 1974. 6, 189–236 DOI:10.1007/BF01239496.
36. Deere, D.U., 1964. Technical description of rock cores for engineering purposes. *Rock Mech. Eng. Geol.* 1 (1), 17–22.
37. Булычев, Н.С. Механика подземных сооружений/Н.С. Булычев//Москва: «Недра», 1994. -382 с.
38. СНиП 2.02.02-85. Основания гидротехнических сооружений. М.: Госстрой СССР, 1988. 48 с.
39. Al-Harathi A. A., Hencher S. R. Modelling stability of the Pen-Y-Clip Tunnel//UK. Eurock'93, Ribeiro e Sousa and Grossmann (eds). V. 1. Balkema, Rotterdam, 1993. P. 451-459.
40. Angelidis C., Konmantakis I., Zakas M. Contribution to the modelling of a new classification system of rock mass, concerning superficial works//Eurock'93, Ribeiro e Sousa and Grossmann (eds). V. 1. Balkema, Rotterdam, 1993. P. 461-466.
41. Antunes S., Infanti N. Erosion masses subject to flow action: Some geomechanical and hydraulic aspects//Int. Cong, Eng, Geol. Buenos Aires, 1986, Balkema, Post Congress Vol.
42. Barton N. Characterising rock masses to improve excavation design//Proc. IV Int. Congr. IAEG. India, New. Delhi, V. IX. 1982.
43. Bieniawski Z. T. The Geomechanics Classification in Rock Engineering Applications//Proc. IV ISRM. V. 2. Montreux, 1979. P. 41-48.

44. Brito S. et al. Studies of erosion processes downstream of concrete spillways//Proc. VII. Int. Congr. on RM. Aachen. V. 2. 1991. Balkema. P. 1261-1266.
45. Hack H. R. G. K., Price D. G. A rock mass classification system for the design and safety analysis of slopes//Eurock'93/Eds Ribeiro e Sousa and Grossman. Balkema, Rotterdam, 1993. P. 803-810.
46. Haines A., Terbrugge P. J. Preliminary estimation of rock slope stability using rock mass classification systems//Proc. VII Congr. of ISRM, Aachen. V. 2. Balkema, Rotterdam, 1991. P. 887-892.
47. Homma N., Kamemura K. Observational methods on large underground structures//Proc. of the Int. Symp. on Engineering in Complex Rock Formations, Beijing, China, 1986. P. 959-965. V
48. Hwong Ting-cheng. Classification of the rock mass structures and determination of rock mass quality//Bull. IAEG. N 18. Kpfeld. 1978. P. 139-142.
49. Kendorski F. S., Cummings R. A., Bieniawski Z. T., Skinner E. H. Rock mass classification for block caving mine drift support//Proc. 5th Int. Congr. on Rock Mech. ISRM, Melbourne, 1983. Section B. 42.
50. Kikuchi K., Saito K., Kusunoki K. Geotechnically integrated evaluation on the stability of dam foundation rocks//XIV ICOLD. 1982. V. 2. Q. 53. R. 4. P. 49-74.
51. Laubscher D. H. Geomechanics classification of jointed rock masses -- mining applications//Trans. Inst. Min. Metall. 1977. Section. A. P. 86.
52. Romana M. SMR classification//Proc. VII Int. Congr. on Rock Mech. V. 2. Balkema, Rotterdam, Aachen, 1991. P. 955-960.
53. Spurr K. Energy approach to estimating scow downstream of a large dam //W. P. and D. C. 1985. N 7. P. 81-89.
54. Wanhe D., Nianxin X. Collapse of surrounding rock: analysis of mechanism and approach to prediction//Proceedings of analysis of mechanism and approach to prediction//Proceedings of the Int. Symp. on Engineering in Complex Rock Formations, Science Press, Beijing, China, 1986. P. 846-854.

55. Xuecheng Dong. Rock mechanics investigations related to the Three Gorges Dam Project//ISRM News Journal. 1994. V. 1. N 4. P. 6-15.
56. Hagros, A., 2006. Host Rock Classification (HRC) System for Nuclear Waste Disposal in Crystalline Bedrock. (PhD thesis). University of Helsinki, Helsinki.
57. McEwen, T., Aro, S., Kosunen, P., et al., 2012. Rock suitability classification RSC 2012. POSIVA 2012-24. Posiva Oy, Olkiluoto.
58. Chen L., Wang J., Zong Z.H., Liu J., Su R., Guo Y.H., Jin Y.X., Chen W.M., Ji R.L., Zhao H.G., Wang X.Y., Tian X., Luo H., Zhang M. A new rock mass classification system  $Q_{HLW}$  for high-level radioactive waste disposal // Engineering Geology. 2015. Vol. 190. P. 33-51. DOI: 10.1016/j.enggeo.2015.02.006.
59. Barton N. 1982. Modelling rock joint behavior from in situ block tests: Implications for nuclear waste repository design.
60. McEwen, T., Susanna A., Paula K., Jussi M., Tuomas P., Asko K., Pirjo. H. Rock Suitability Classification - RSC 2012. [https://www.researchgate.net/publication/264548536\\_Rock\\_Suitability\\_Classification\\_-\\_RSC\\_2012](https://www.researchgate.net/publication/264548536_Rock_Suitability_Classification_-_RSC_2012).
61. Wang J., Chen L., Su R., Zhao X. The Beishan underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China: Planning, site selection, site characterization and in situ tests // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. Vol. 10. Iss. 3. 2018. P. 411-435. DOI.org/10.1016/j.jrmge.2018.03.002.
62. Zhang Y., Zhang Q., Duan K., Yu G., Jiao Y. Reliability analysis of deep underground research laboratory in Beishan for geological disposal of high-level radioactive waste // Computers and Geotechnics. Vol. 118. 2020. DOI.org/10.1016/j.compgeo.2019.103328.
63. Glamheden R., Fredriksson A., Associates G., Roshoff K., Karlsson J., Bygg B., Hakami Hossein., Geomekanik I., Christiansson R. Rock Mechanics

Forsmark Site descriptive modelling Forsmark stage 2.2. Svensk Kärnbränslehantering AB 2007.

64. Yong Y., Liang C., Jian L. Study on Rock Mass Classification Methods Used in the Geological Disposal of High-level Radioactive Waste // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 861 (2021) 042118 IOP DOI:10.1088/1755-1315/861/4/042118.

65. Козырев А.А., Широ́в Д., Климов С.А., Семенова И.Э., Аветисян И. М., Савченко С. Н. 3d-моделирование структурных неоднородностей породных массивов центрального типа Фенноскандинавского кристаллического щита. 2019 V. 2. P. 117-160.

66. Методические указания по созданию постоянно действующих геолого-технологических моделей нефтяных и газонефтяных месторождений. Ч. 1. Геологические модели. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2003.

67. ONKALO POSE Experiment — Phase 1&2: 3D Thermo-Mechanics Prediction, Working Report 2012-68, Matti Hakala, Jouni Valli, Posiva. 2014.

68. ASPO Hard Rock Laboratory, C. Svemar, S. Pettersson, T. Hedman, WM'03 Conference, February 23-27, 2003, Tucson, AZ.

69. Татаринов В.Н., Морозов В.В., Колесников И.Ю., Каган А.И., Татаринова Т.А. Устойчивость геологической среды как основа безопасной подземной изоляции радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива // Надежность и безопасность энергетики. 2014. №1(24). С. 25-29.

70. Садовский М.А. О распределении размеров твердых отдельностей // Докл. АН СССР. 1983. Т. 269. № 1. С. 69-72.

71. Айнбиндер И.И., Пацкевич П.Г., Красюкова Е.В., Аверин А.П. Обоснование стратегии поддержания устойчивости подземных горных выработок в условиях действующих повышенных анизотропных напряжений. Горный журнал. 2022;(1):34–40. <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.01.06>

72. Ливинский И.С., Митрофанов А.Ф., Макаров А.Б. Комплексное геомеханическое моделирование: структура, геология, разумная достаточность. Горный журнал. 2017. №2. С. 51-55.
73. Стратегия создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. - 2018. - №2(3). - С.114-120.
74. Дорофеев А.Н., Большов Л.А., Линге И.И., Уткин С.С., Савельева Е.А. Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2017. №1. С.33-42.
75. Ставрогин А. Н., Протосеня А. Г. Механика деформирования и разрушения горных пород. — М.: Недра, 1992. — 224 с.: ил.— ISBN 5-247-00752-2.
76. Каркашадзе, Г. Г. Механическое разрушение горных пород: учебное пособие / Г. Г. Каркашадзе. — Москва.: Горная книга, 2004. — 222 с.
77. Hoek, E., Brown, E.T. Practical estimates of rock mass strength // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 1997. Vol. 34. Iss. 8. P. 1165-1186. DOI:10.1016/S1365-1609(97)80069-X.
78. Hoek E., Caranza-Torres C.T., Corcum B. HoekBrown failure criterion-2002 edition//Proc. of the North American Rock Mechanics Society (NARMSTAC'2002). – Toronto: Mining Innovation and Technology, 2002. – v. 1. – pp. 267-273 104.
79. Hoek E. Strength of rock and rock masses // ISRM News Journal. – 1994. 2. 4–16.
80. Садовский М.А. Избранные труды: Геофизика и физика взрыва / М.А. Садовский; Отв. ред. В.В. Адушкин. – М.: Наука, 2004. - 440 с.
81. Ливинский И. С., Митрофанов А. Ф., Макаров А. Б. Комплексное геомеханическое моделирование: структура, геология, разумная достаточность // Горный журнал. №8. 2017. С.51-55.

82. Chandler, Neil A., Rodney S. Read, C. Derek Martin. In Situ Stress Measurement for Nuclear Fuel Waste Repository Design. Proc. 2nd North American Rock Mechanics Symposium, Montreal, 1996, pp. 929-936, Balkema: Rotterdam.
83. Секулович М. Метод конечных элементов. М.: Стройиздат, 1993. 664с.
84. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М.: Недра. 1987. 221 с.
85. Тимурзаев А.И., Ластовецкий В.П. 3D моделирование напряженно-деформированного состояния земной коры нефтегазоносных структур // IV тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. Тектонофизика и актуальные вопросы о Земле. 2016. Т.2. 630 с.
86. Морозов В.Н., Колесников И.Ю., Белов С.В., Татаринов В.Н. Напряженно-деформированное состояние Нижнеканского массива – района возможного захоронения радиоактивных отходов // Геоэкология. 2008. №3. С. 232-243.
87. Bye A. The strategic and tactical value of a 3D geotechnical model for mining optimization, Anglo Platinum, Sandsloot open pit. The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, v. 106, 2006.
88. Hormazabal E., Rovira F., Walker M., Carranza-Torres C. Analysis and design of slopes for Rajo Sur, an open pit mine next to the subsidence crater of El Teniente mine in Chile. Slope Stability, Santiago Chile. - November 2009.
89. Еременко В.А., Айнбиндер И.И., Пацкевич П. Г., Бабкин Е.А. Оценка состояния массива горных пород на рудниках ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 1. С. 5-17.
90. Протосеня А. Г., Вербило П.Э. Оценка прочности блочного массива методом численного моделирования // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2016. № 4. С. 47-54.

91. Хажыылай Ч.В., Еременко В.А., Косырева М.А., Янбеков А.М. Расчет паспорта прочности горных пород, находящихся в естественных условиях массива, с использованием критерия Хоука-Брауна и программы Rockdata. ГИАБ. 2018. № 12. С. 92–101.
92. Кузьмин Е.В., Узбекова А.Р. Рейтинговые классификации массивов горных пород и их практическое применение. ГИАБ. 2005. С.181-185.
93. Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. Российская академия наук. Институт динамики геосфер. М.: ГЕОС, 2016, 424 с.
94. Гвишиани А.Д., Кафтан В.И., Красноперов Р.И., Татаринов В.Н. Геоинформатика и системный анализ в геофизике и геодинамике // Физика Земли. №1. С. 42-60. 2019.
95. Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1983. 110 с.
96. Scholz C. H. Physical explanation for displacement-length relationship of faults using post-yield fracture mechanics model. *Journal of Structural Geology*.1992. 14(10):1133-1148. DOI: 10.1016/0191-8141(92)90065-5.
97. Карташов Ю. М., Матвеев Б. В., Михеев Г. В., Фадеев А. Б. Прочность и деформируемость горных пород. М., Недра, 1979, 269 с.
98. 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.
99. Dwivedi R.D., Goel R.K., Prasad V.V.R., Sinha A. Thermo-mechanical properties of Indian and other granites // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2008. V. 45, Issue 3, P. 303-315. DOI:10.1016/j.ijrmms.2007.05.008.
100. Andersson, J., Strom, A., Svemar, C., et al., 2000. What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock? *Geoscientific suitability*

indicators and criteria for siting and site evaluation. SKB Report TR-00-12. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB), Stockholm.

101. Barton, N., 2002. Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 39, 185.

102. Морозов В.Н., Колесников И.Ю., Татаринов В.Н. Моделирование уровней опасности напряженно-деформированного состояния в структурных блоках Нижнеканского гранитоидного массива (к выбору участков захоронения радиоактивных отходов) // *Геоэкология*. 2011, № 6, с. 524–542.

103. Akmatov D.Zh., Evloev N.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.

104. Лобацкая Р.М. Неотектоническая разломно-блоковая структура зоны сочленения Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты. *Геология и геофизика*, 2005. Т. 46, №12, с. 141-150.

105. Кочкин Б. Т., Мальковский В. И., Юдинцев С. В. Научные основы оценки безопасности геологической изоляции долгоживущих радиоактивных отходов (Енисейский проект). М., ИГЕМ РАН, 2017. 384с.

106. Кочкин Б. Т. Задачи изучения геологической среды участка Енисейский на текущем этапе реализации проекта захоронения // *Радиоактивные отходы*. 2019. № 2 (7). С. 76—91. DOI: 10 25283/2587-9707-2019-2-76-91.

107. Андерсон Е. Б., Даценко В. М., Кирко В. И. и др. Результаты комплексных геологических исследований Нижнеканского массива для обоснования возможности его использования для захоронения отвержденных радиоактивных отходов // *Исследования гранитоидов Нижнеканского массива для захоронения РАО: Материалы КНТС. г. Железногорск, 16—20 марта 1998 г., ГХК, НПО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина», СПб, 1999. С. 14—23.*

108. Андерсон Е. Б., Савоненков В. Г., Любцева Е. Ф. Результаты поисковых и научно-исследовательских работ по выбору площадок для подземной изоляции ВАО и ОЯТ на Нижнеканском массиве гранитоидов (Южно-Енисейский кряж) // Труды Радиевого института им. В. Г. Хлопина. 2006. Т. XI. С. 8—64.

109. А.Д. Гвишиани, В.Н. Татаринов, В.И. Кафтан, И.О. Лосев, А.И. Маневич, В.А. ГИС-ориентированная база данных для системного анализа и прогноза геодинамической устойчивости Нижне-Канского массива // Исследования Земли из космоса, 2021, № 1, с. 53–66 DOI: 10.31857/S020596142101005X.

110. 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.

111. Морозов О. А., Расторгуев А. В., Неуважаев Г. Д. Оценка состояния геологической среды участка Енисейский (Красноярский край) // Радиоактивные отходы. 2019. №4(9). С. 46—62. DOI:10.25283/2587-9707-2019-4-46-62.

112. Гупало В.С., Казаков К.С., Минаев В.А., Озерский Д.А., Устинов С.А., Нафигин И.О. Результаты исследований в существующих скважинах на участке недр «Енисейский», в т. ч. для определения основных систем трещин и анизотропии массива пород // Радиоактивные отходы. 2021. № 1 (14). С. 76—86. DOI: 10 .25283/2587-9707-2021-1-76-86.

113. Отчет о НИР «Разработка структурной модели трещиноватого пространства Нижне-Канского геологического массива (участок «Енисейский»)». СПБО ИГЭ РАН). С.-П. 2016. 149 с.

114. Батугина И. М. Горное дело и окружающая среда. Геодинамика недр: учебное пособие / И. М. Батугина, А. С. Батугин, И. М. Петухов. Москва: Горная книга, 2012. 121 с.

115. Батугин А.С. Возможности и опыт оценки напряженного состояния горного массива в горнопромышленных районах методами тектонофизики / А.С. Батугин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № S1. С. 180-194.

116. В.Н. Татаринов, В. И. Кафтан, А.И. Маневич, Р.В. Шевчук, С.М. Забродин. Подземная исследовательская лаборатория: результаты 12-летних наблюдений за современными движениями земной коры средствами ГНСС // Радиоактивные отходы. 2022. №4 (21). С. 58-69. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-4-58-69.

117. Read J., Stacey P. Guidelines for open pit slope design. Australia: CSIRO, 2009. p. 496.

118. Белов С.В., Морозов В.Н., Татаринов В.Н., Камнев Е.Н., Хаммер Й. Изучение строения и геодинамической эволюции Нижнеканского массива в связи с захоронением высокоактивных радиоактивных отходов // Геоэкология. №3. 2007. С.227-238.

119. Андерсон Е.Б., Любцева Е.Ф., Оганезов А.В. и др. Геофизические исследования Енисейского кряжа с целью поисков участков захоронения ВАО // Разведка и охрана недр. 1999. № 9-10. С. 61-63.

120. В.Н. Татаринов, В.Н. Морозов, Т.А. Татарина. Механизм деформирования приконтурной зоны горных выработок с тепловыделяющими технологиями // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 10. С. 141–152. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_10\_0\_141.

121. 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.

122. 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.

123. Озерский Д. А., Орлова А. И. Анализ прочностных характеристик горной породы для обоснования безопасности строительства подземных сооружений ПИЛ // Радиоактивные отходы. 2023. № 1 (22). С. 70—76. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-1-70-76.

124. Singh M., Rao K.S. Rammamurthy T. Strength and deformation behaviour of a jointed rock mass. *Rock Mech. and Rock Engng.* 2002 35 (1), 45-64.

125. Рубан А.В. Исследование и прогноз миграции радионуклидов при захоронении РАО на участке «Енисейский» Нижнеканского гранитогнейсового массива. Магистерская диссертация по направлению 020300 «Геология». СПбГУ, Кафедра гидрогеологии. СПб, 2017.

126. 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

127. Hoek E., Brown E.T. *Underground excavation in rock.* Institution of Mining and Metallurgy, 1980, U.K.

128. Zienkiewicz O.C., Pande G.N. Time dependent multi-laminate model of rocks—a numerical study of deformation and failure of rock masses. *Int J Num Anal Meth Geomech* 1977; 1:219–47.

129. 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.

130. 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 10.30686/1609-9192-2022-1-133-137.

# ПРИЛОЖЕНИЕ А



## ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ГЦ РАН)

Молодежная ул., д. 3, Москва, 119296  
Тел.: +7 (495) 930-05-46; факс: +7 (495) 930-05-06  
e-mail: gcras@gcras.ru; http://gcras.ru  
ОКПО 02699240; ОГРН 1037739048489;  
ИНН/КПП 7736053773/773601001

«25» декабря 2023 г.

### СПРАВКА

В рамках научно-исследовательских работ Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геофизического центра Российской академии наук были апробированы результаты диссертационного исследования Акматова Д.Ж. на тему «Оценка устойчивости породного массива на основе разработки трехмерной геомеханической модели при захоронении радиоактивных отходов».

Разработанная Акматовым Д.Ж. трехмерная геомеханическая модель позволяет определить зоны изменения напряженного состояния массива пород, оценить их категории устойчивости и повысить достоверность сохранности изоляционных свойств породного массива при захоронении высокоактивных радиоактивных отходов в гранитогнейсовых породах Нижне-Канского массива.

Заместитель директора по науке  
ГЦ РАН, д.ф.-м.н.  
(должность)

(подпись)

Дзедоев Б.А.  
(ФИО)

