

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС»

На правах рукописи

Маневич Александр Ильич

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПОЛЕЙ СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ И
ДЕФОРМАЦИЙ В РАЙОНЕ СТРОИТЕЛЬСТВА ПОДЗЕМНОЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ НИЖНЕ-КАНСКОГО
МАССИВА

Специальность 1.6.21 – Геоэкология

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: д.т.н., проф. Коликов Константин Сергеевич

Москва – 2026 г.

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ	2
ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ И ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ БЕЗОПАСНОЙ ПОДЗЕМНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОАКТИВНЫХ РАО	12
1.1 Подземная изоляция высокоактивных РАО	12
1.2 Геодинамические исследования при обосновании безопасности подземной изоляции РАО	16
1.3 Современное состояние геодинамической изученности района размещения ПИЛ в Красноярском крае	21
1.4 Выводы. Постановка цели и задач исследования.....	33
ГЛАВА 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДЕФОРМАЦИОННОГО АНАЛИЗА ГНСС- ДААННЫХ	36
2.1 Анализ скоростей современных движений земной коры по данным ГНСС	36
2.2 Методика деформационного анализа горизонтальных смещений земной поверхности	39
2.3 Характеристика сети и методика ГНСС-измерений	44
2.4 Выводы	49
ГЛАВА 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА СДЗК НА НИЖНЕ-КАНСКОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ.....	50
3.1 Скорости современных движений земной коры по данным ГНСС за 2012–2024 гг.....	50
3.2 Пространственно-временная изменчивость полей деформаций	53
3.3 Нормативная оценка степени опасности смещений	60
3.4 Выводы	66
ГЛАВА 4. ЦИКЛИЧНОСТЬ СОВРЕМЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В РАЙОНЕ РАЗМЕЩЕНИЯ ПИЛ	68
4.1 Модель учета цикличности деформационных процессов	68
4.2 Параметризация модели интенсивности активизаций λ СДЗК.....	74
4.3 Выделение временных интервалов активизации и цикличности современных деформаций	81
4.4 Оценка времени накопления опасной деформации с учетом модели цикличности.....	89
4.5 Выводы	93
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	95
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	98
ПРИЛОЖЕНИЕ А	109

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Результат эксплуатации объектов ядерного топливного цикла и деятельности предприятий оборонно-промышленного комплекса приводит к накоплению значительных объемов радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива. Наиболее существенную геоэкологическую угрозу для населения и окружающей среды представляют долгоживущие высокоактивные РАО 1 и 2 классов опасности, период радиобиологической опасности которых превышает 10 тыс. лет. Практически реализуемым способом их изоляции от биосферы является захоронение в глубоких геологических формациях. Окончательная изоляция высокоактивных РАО относится к наиболее сложным геоэкологическим задачам, поскольку ее реализация требует обоснования долговременной устойчивости геологической среды и системы инженерных барьеров на сверхдлительных временных интервалах.

В 2020 г. в Красноярском крае, в пределах пород Нижне-Канского гранитогнейсового массива, начато строительство уникального подземного объекта – пункта глубинного захоронения высокоактивных радиоактивных отходов. Согласно международной практике, первым обязательным этапом реализации подобных объектов является создание подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ), необходимой для уточнения свойств вмещающего массива горных пород, проверки прогнозных представлений о его устойчивости и получения дополнительной информации для обоснования долговременной безопасности изоляции. Для России это первый объект такого типа, поэтому он характеризуется не только высокой инженерной и экологической ответственностью, но и исключительными требованиями к полноте геологических, геодинамических и геоэкологических исследований.

Концепция безопасности глубинной изоляции РАО основана на мультибарьерном подходе, при котором долговременная защищенность биосферы обеспечивается совокупностью инженерных и природных барьеров. Срок эффективного функционирования инженерных барьеров ограничен, а основная барьерная функция на интервале в тысячи и десятки тысяч лет в конечном счете возлагается на геологическую среду. Следовательно, вопрос безопасности пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) и последующей подземной изоляции РАО является не только инженерной, но прежде всего геоэкологической задачей, связанной с оценкой способности массива сохранять изоляционные свойства в условиях длительного воздействия природных процессов. Особую роль здесь играют современные геодинамические процессы, поскольку именно они могут приводить к изменению напряженно-деформированного состояния пород, активизации разломных структур, развитию трещиноватости и, как следствие, к ухудшению изоляционных свойств вмещающей геологической среды.

В этой связи геодинамические и сейсмотектонические исследования являются обязательной частью работ по обоснованию безопасности объектов использования атомной энергии. Нормативные документы Ростехнадзора и рекомендации МАГАТЭ прямо требуют изучения геодинамических условий участка и района размещения объекта, выделения геодинамических опасных зон и активных разломов, а также организации режимного мониторинга геологической среды в период строительства и эксплуатации ПГЗРО.

Вместе с тем практическая реализация этих требований сталкивается с рядом принципиальных трудностей. Для района Нижне-Канского массива отсутствует достаточный комплект геологических и тектонических материалов крупного масштаба, а существующие схемы разломов во многом различаются между собой и не всегда имеют достаточное геолого-геофизическое обоснование. В этих условиях прямое применение нормативного понятия «активный разлом» оказывается методически затрудненным, поскольку отсутствует однозначный объект параметризации и непротиворечивый переход от геологических представлений о разломной структуре к инженерным показателям долговременной безопасности. Поэтому особую актуальность приобретает подход, основанный на анализе современных движений и деформаций земной коры как на наиболее объективной и инструментально контролируемой информации о текущем состоянии геологической среды.

В настоящей работе анализ современных движений и деформаций земной коры рассматривается не как самостоятельная геодезическая задача, а как инструмент оценки состояния геологической среды в районе размещения радиационно опасного подземного объекта. В этой связи результаты ГНСС-мониторинга используются для геоэкологического обоснования безопасности подземной изоляции радиоактивных отходов, выделения участков с неблагоприятным деформационным режимом и определения направлений геоэкологического и геодинамического мониторинга в районе строительства подземной исследовательской лаборатории. В районе размещения ПИЛ уже создана система геодинамического мониторинга, включающая ГНСС-наблюдения, высокоточное нивелирование и сейсмологический контроль. Накопленные результаты указывают на циклический характер деформационного режима, пространственную неоднородность современных деформаций и необходимость их интерпретации не только как геодезических величин, но и как индикаторов состояния массива горных пород.

В этой связи, анализ цикличности современных движений и деформаций земной коры, разработка модели оценки критических деформаций и определение времени их накопления по данным ГНСС-мониторинга являются актуальной научной задачей, решение которой позволит повысить надежность геоэкологического обоснования безопасности подземной

изоляции радиоактивных отходов в районе строительства подземной исследовательской лаборатории Нижне-Канского массива.

Целью работы является выявление особенностей динамики современных движений геологической среды и оценка времени накопления критических деформаций по данным ГНСС-мониторинга для геоэкологического обоснования безопасности подземной изоляции высокоактивных радиоактивных отходов в районе строительства подземной исследовательской лаборатории в Красноярском крае.

Для достижения поставленной цели, решались следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ геоэкологических и геодинамических факторов обеспечения безопасности подземной изоляции высокоактивных РАО, отечественных и международных нормативных требований к геодинамическим исследованиям и оценку современного состояния геодинамической изученности района строительства ПИЛ.
2. Обосновать методическую основу обработки данных режимных ГНСС-наблюдений, включающую требования к точности измерений, геометрии сети наблюдений, оценить скоростные параметры современных движений земной коры и рассчитать компоненты тензора деформаций.
3. Выявить по данным ГНСС-наблюдений 2012–2024 гг. особенности пространственно-временной организации и динамики полей современных деформаций на Нижне-Канском геодинамическом полигоне, включая анализ ориентаций главных осей деформаций, деформационные режимы и локализацию аномалий в пределах структурно-тектонического блока, вмещающего ПИЛ.
4. Выполнить оценку аномалий деформаций и градиентов смещений, а также интерпретационное сопоставление полученных результатов с разломно-блоковым строением района и условиями размещения площадки ПИЛ.
5. Разработать и параметризовать модель оценки критических деформаций для объектов подземной изоляции РАО, учитывающую цикличность современных деформационных процессов, пространственную масштабируемость и сценарные параметры активизации интенсивности λ , количества активизаций N и длительности импульса ΔT_A .
6. Выделить среднюю интенсивность активизации современных деформационных процессов на Нижне-Канском геодинамическом полигоне, оценить наблюдаемую интенсивность активизаций и определить интервалы времени накопления критических деформаций на участках площадки ПИЛ.

Степень разработанности темы. Начало исследованиям, направленных на выбор глубоких геологических формаций для подземной изоляции РАО в Российской Федерации было положено в 1970-80-х годах прошлого столетия. Финальная изоляция РАО в глубоких

геологических формациях – сложнейшая геоэкологическая проблема, решением которой на протяжении последних десятилетий занимались известные ученые: Лаверов Н.П., Мельников Н.Н., Кедровский О.Л., Юдинцев В.С., Андерсон Е.Б., Шишиц И.Ю., Рыбальченко А.И., Петров В.А., Камнев Е.Н., Гупало В.С. и другие.

Теоретические основы методологии оценки устойчивости геологической среды и методов ее изучения и системного анализа данных развиты в работах: А.Д. Гвишиани, В.И. Осипова, Г.А. Голодковской, В.Н. Морозова, В.Н. Татарина, С.А. Несмеянова, Е.М. Сергеева, В.Т. Трофимова, В.И. Уломова, А.С. Батугина и других. Существенный вклад в развитие представлений об геотехнических условиях освоения геологической среды, геоэкологических рисках, мониторинге и безопасности подземного строительства и обоснования устойчивости массива и подземных сооружений внесли П.М. Цимбаревич, Н.М. Покровский, И.Д. Насонов, Б.А. Картозия, И.В. Баклашов, М.Н. Шуплик, А.А. Шилин, А.В. Корчак, Г.С. Франкевич, Ю.П., Е.Ю. Куликова, Д.С. Конюхов, В.А. Еременко, Галченко, Л.А. Назаров и другие исследователи.

Большой вклад в изучение и обоснование геологических критериев безопасности подземной изоляции РАО внесли научные коллективы Радиевого института им. В.Г. Хлопина, Института безопасного развития атомной энергетики РАН, Института геологии рудных месторождений РАН, Института минерального сырья им. Н.М. Федорковского, АО «ВНИИПромтехнологии», Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева, Геофизического центра и другие.

Вместе с тем, несмотря на значительный уровень разработанности геологических, инженерно-геологических и геодинамических аспектов подземной изоляции РАО, остаются недостаточно разработанными вопросы количественной интерпретации данных длительного ГНСС-мониторинга применительно к району строительства ПИЛ. В наименьшей степени исследованы особенности пространственно-временной организации полей современных деформаций, методы выделения временных интервалов активизации деформационного режима, подходы к параметризации критических деформаций с учетом цикличности и пространственной масштабируемости, а также определение времени накопления критических деформаций в условиях неоднозначной разломно-блоковой модели. Несмотря на существенный уровень разработанности геодинамических, инженерно-геологических и геомеханических аспектов проблемы, вопросы использования данных длительного мониторинга современных движений и деформаций для геоэкологического обоснования безопасности подземной изоляции радиоактивных отходов разработаны недостаточно. В наименьшей степени исследованы особенности пространственно-временной организации деформационного поля, эпизоды активизации современных деформационных процессов, а

также оценка времени накопления критических деформаций как основы выделения зон приоритетного мониторинга природно-технической системы.

Указанные обстоятельства определили необходимость выполнения теоретических и экспериментальных исследований для геоэкологического обоснования безопасности подземной изоляции высокоактивных радиоактивных отходов в районе строительства подземной исследовательской лаборатории на основе моделирования и анализа цикличности современных деформаций и оценки времени накопления критических деформаций по данным ГНСС-мониторинга.

Идея работы заключается в том, что в условиях структурной неопределенности района строительства ПИЛ оценку состояния геологической среды и ее потенциально неблагоприятных участков целесообразно основывать не на прямом отождествлении наблюдаемых деформаций с «активными разломами», а на анализе пространственно-временной изменчивости полей современных деформаций, цикличности деформационного режима, параметров активизаций и времени накопления критических деформаций, определяемых по данным режимных ГНСС-наблюдений. Такой подход обеспечивает переход от инструментально наблюдаемых параметров деформационного поля к задачам геоэкологического мониторинга природно-технической системы и обоснования безопасности подземной изоляции РАО.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Установленные особенности пространственно-временной изменчивости полей современных деформаций на Нижне-Канском геодинамическом полигоне по данным ГНСС-наблюдений 2012–2024 г., выражаются в постоянной перестройке ориентации главных осей деформаций, смене деформационных режимов, локализации аномалий которые компенсируются на длительных интервалах наблюдений в пределах структурно-тектонического блока вмещающего площадку ПИЛ.

2. Разработанная и параметризованная модель учитывающая цикличность современных деформационных процессов, пространственную масштабируемость и сценарные параметры активизации интенсивности λ , количества активизаций N и длительность импульса современного деформационного процесса ΔT_A позволяет выполнить оценку критических деформаций для геоэкологического обоснования безопасности подземной изоляции радиоактивных отходов.

3. Установленная средняя интенсивность современных деформационных процессов на Нижне-Канском геодинамическом полигоне $\lambda_{obs} \approx 0.09 \div 0.20$ год⁻¹ позволяют выделять зоны приоритетного геоэкологического и геодинамического мониторинга, определить интервалы времени накопления критических деформаций на участках площадки ПИЛ.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Установлены особенности пространственно-временной изменчивости полей современных деформаций на Нижне-Канском геодинамическом полигоне по данным ГНСС-наблюдений 2012–2024 г., выражающиеся в постоянной перестройке ориентации главных осей деформаций, смене деформационных режимов, локализации аномалий, которые компенсируются на длительных интервалах наблюдений в пределах разломно-блоковой структуры и площадки ПИЛ;
2. Предложен новый подход к оценке опасности деформационных процессов на основе разработанной и параметризованной модели, учитывающая цикличность современных деформационных процессов, пространственную масштабируемость и сценарные параметры активизации интенсивности λ , количества активизаций N и длительности импульса ΔT_A для геоэкологического обоснования безопасности объектов подземной изоляции РАО.
3. Для района строительства ПИЛ впервые оценена средняя интенсивность активизации современных деформационных процессов и дана количественная оценка наблюдаемой интенсивности активизаций $\lambda_{obs} \approx 0.09\text{--}0.20 \text{ год}^{-1}$ по данным пространственно-временного анализа полей деформаций;
4. Получены регрессионные зависимости, связывающие расчетные пороговые значения средней критической деформации ε_{avg} с площадью нормируемого элемента для межгодового, десятилетнего и векового сценариев цикличности современных деформационных процессов. Использование уравнений впервые позволило выполнять оценку критических деформаций для промежуточных пространственных масштабов и определять интервалы времени их накопления на участках площадки ПИЛ.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается:

- Использованием представительного массива режимных ГНСС-наблюдений на Нижне-Канском геодинамическом полигоне за длительный период с 2012 по 2024 г.;
- Применением классических геодезических методов обработки ГНСС-измерений, статистического анализа, пространственного моделирования и деформационного анализа на основе дискретных геодезических наблюдений;
- Согласованностью интерпретации результатов с разломно-блоковым строением района, данными геодинамического мониторинга и нормативными требованиями к исследованиям в районе размещения ПИЛ;

- Воспроизводимостью вычислений, обеспеченной использованием разработанных автором программных средств для пространственного моделирования, деформационного анализа и визуализации результатов.

Методы исследований включают анализ и обобщение научно-технической литературы, инструментальные наблюдения современных движений земной поверхности с использованием глобальных навигационных спутниковых систем, статистическую обработку результатов измерений, пространственное моделирование, деформационный анализ дискретных геодезических данных, а также геодинамическую и тектонофизическую интерпретацию полученных результатов. Расчетные процедуры и визуализация данных выполнялись с применением программных средств QGIS, SAGA GIS и Python.

Практическое значение и реализация результатов работы. В рамках диссертационного исследования разработаны критерии выявления аномальных деформаций земной поверхности. Применение полученных критериев позволит выполнить рекомендации МАГАТЭ «Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations» в части оценки сейсмической опасности площадок строительства радиационно-опасных объектов, и позволит учесть эффект пространственной масштабируемости деформаций земной поверхности в соответствии с п. 53 РБ-019-18 (утвержденного приказом Ростехнадзора от 02.03.2018 №90). Результаты деформационного анализа и геодинамической интерпретации, представленные в диссертационном исследовании, входят в состав программы геодинамических исследований, проведение которых предусмотрено рядом нормативных документов Ростехнадзора для района размещения подземной исследовательской лаборатории и направлено на обоснование долговременной безопасности подземной изоляции высокоактивных РАО. Практическая значимость результатов определяется возможностью их использования при организации геоэкологического и геодинамического мониторинга района размещения ПИЛ, при обосновании долговременной безопасности подземной изоляции радиоактивных отходов и при принятии решений, связанных с безопасным использованием подземного пространства.

Личный вклад автора. Автор диссертации с 2019 г. непосредственно участвовал в выполнении полевых ГНСС-измерений и последующей обработке результатов наблюдений. Для пространственного моделирования движений земной поверхности, оценки эффективности алгоритмов, выполнения деформационного анализа и визуализации данных автором разработаны необходимые программные средства (библиотека PyGeoStrain – <https://doi.org/10.5281/zenodo.7948241>). С помощью разработанных программ автором были выполнены все расчеты, получены оценки точности пространственного моделирования, получены карты движений и деформаций земной поверхности. Автором лично проведена геодинамическая интерпретация параметров современных движений земной поверхности и

деформационного поля в районе строительства подземной исследовательской лаборатории, расположенной в пределах Нижне-Канского массива.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были доложены: Всероссийская молодежная конференция «Строение литосферы и геодинамика», Секция «Современная геодинамика, тектонофизика и сейсмология» (Иркутск, 2019, 2021 г.); Научная конференция молодых ученых и аспирантов Института Физики Земли РАН (Москва, 2018, 2019, 2020, 2022 г.); XXI международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы экологии и природопользования: партнерство в целях устойчивого развития и экологической безопасности» (Москва, РУДН, 2020 г.); Международный научный симпозиум «Неделя горняка» (Москва, 2018–2025 г.); Шестая международная научно-практическая конференция «Индикация состояния окружающей среды: теория, практика, образование», (Москва, МПГУ, 2018 г.). Результаты работы докладывались на семинарах лаборатории геодинамики Геофизического центра РАН и кафедры «Безопасности и экологии горного производства» НИТУ «МИСиС».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 статей в научных журналах, из которых 9 статей опубликованы в журналах рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ, 6 индексируются в базе данных Scopus и 4 индексируются в базе данных Web of Science и получены 2 авторских свидетельства (РИД), 1 на базу данных и 1 на программу для ПК.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 129 наименований, одного приложения. Работа изложена на 119 страницах машинописного текста и содержит 37 иллюстрации и 8 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю д.т.н., доц. Коликову К.С., а также чл.-кор. РАН, д.т.н. Татаринovu В.Н. за неоценимую помощь, постоянное внимание и поддержку в ходе работы над диссертацией. Отдельную благодарность автор выражает академику РАН, д.ф.-м.н. Гвишиани А.Д. за инициативу развития данного направления исследований и организационную поддержку работы. Автор признателен коллегам за неоценимую помощь в проведении и организации полевых геодезических работ – д.ф.-м.н. Дзедобову Б.А., к.т.н. Лосеву И.В., к.т.н. Шевчуку Р.В., Забродину С.М. Особую благодарность автор выражает своим коллегам из лаборатории геодинамики Геофизического центра РАН – д.т.н., проф. Морозову В.Н., д.т.н. Кафтану В.И., к.т.н. Акматову Д.Ж. за ценные консультации в области геодинамики, геомеханики, геодезии и анализа данных, а также постоянное внимание и поддержку в работе. Автор признателен всем своим коллегам и друзьям в лице сотрудников Геофизического центра РАН, кафедры «Безопасность и экология горного производства», «Геология и маркшейдерское дело» Горного института НИТУ «МИСиС», Института геологии рудных месторождений РАН,

Института безопасного развития атомной энергетики РАН, за моральную поддержку, мотивацию, постоянное внимание и ценные советы по теме исследования. Отдельную благодарность автор выражает членам экспертной комиссии и рецензентам диссертации за высказанные ценные замечания и предложения, способствующие развитию данной работы.

Материалом для данной диссертационной работы послужили результаты, полученные автором лично при выполнении исследований в рамках темы государственного задания выполнена в рамках Государственного задания Геофизического центра РАН, тема № 122080300206-4: «Фундаментальные исследования и разработка методов прогнозирования и мониторинга устойчивости геологической среды для предупреждения угроз от объектов использования атомной энергии и природных опасностей», утвержденного Минобрнауки России, и гранта РФФИ «Исследование устойчивости породных массивов на основе системного анализа геодинамических процессов для геоэкологически безопасной подземной изоляции радиоактивных отходов» (проект №18-17-00241).

ГЛАВА 1. ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ И ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ БЕЗОПАСНОЙ ПОДЗЕМНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОАКТИВНЫХ РАО

1.1 Подземная изоляция высокоактивных РАО

На всех стадиях функционирования объектов ядерного топливного цикла (ЯТЦ) образуются радиоактивные отходы (РАО) различного уровня активности. Они представлены твердыми, жидкими и газообразными формами, формируют дополнительную экологическую нагрузку на окружающую среду и создают потенциальную опасность для человека и природных компонентов. Наиболее значимую геоэкологическую угрозу создают высокоактивные радиоактивные отходы¹, обладающие наиболее высокими удельными активностями радионуклидов. По оценке Госкорпорации «Росатом» общий объем РАО к концу 2024 года составил 5.72×10^8 м³ [Итоги..., 2025], что соответствует и другим оценкам [Особые..., 2015; Объемы..., 2024]. В том числе за 2024 г. было накоплено 6.76×10^5 м³ твердых и 5.97×10^5 м³ жидких РАО (таблица 1.1). В результате интенсивного развития промышленности в России количество РАО будет только расти, что подтверждается статистикой МАГАТЭ [Status..., 2022].

Таблица 1.1 – Объем образованных РАО в 2024 году, м³ [Итоги..., 2024]

Вид РАО	Очень низкоактивные	Низкоактивные	Среднеактивные	Высокоактивные
Твердые	6.72×10^5	1.08×10^4	3.22×10^3	3.58×10^2
Жидкие	–	5.91×10^5	3.20×10^4	2.21×10^4

Согласно Федеральному закону «Об обращении с радиоактивными отходами», радиоактивные отходы это - не подлежащие дальнейшему использованию материалы и вещества, а также оборудование, изделия (в том числе отработавшие источники ионизирующего излучения), активность радионуклидов в которых превышает уровни, установленные в соответствии с критериями приведенных в Постановлении Правительства РФ от 19.10.2012 №1069.

Относительно широкое распространение получила классификация РАО на низкоактивные (не требующие применения защитных и дистанционно управляемых средств

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

обращения), среднеактивные (требующие применения защитных и дистанционно управляемых средств обращения) и высокоактивные (которые помимо требования использования защитных и дистанционно управляемых средств обращения, характеризуются значительным тепловыделением из-за радиационного саморазогрева) [Особые..., 2015]. Именно образование высокоактивных радиоактивных отходов является значительной геоэкологической проблемой. Так как именно на высокоактивные РАО, не смотря на их меньший объем приходится большая часть ионизирующего излучения. И в соответствии со стратегиями развития ГК Росатом и Минэнерго РФ, программами по атомному разоружению, развитием медицинских и космических ядерных технологий количество РАО будет только расти, не только в России, но и во всем мире.

В Российской Федерации действует классификация РАО по степени их опасности (рис. 1.1). Согласно нее, устанавливаются критерии отнесения РАО к одному из шести классов опасности. В свою очередь РАО 1 и 2 классов опасности являются высокоактивными, которые не подлежат дальнейшему использованию.



Рисунок 1.1 – Классификация радиоактивных отходов по степени опасности в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 19.10.2012 № 1069.

В настоящее время не существует технологии переработки ВАО, хотя исследования в этой области активно ведутся [Кащеев и др., 2022]. Технологии повторного использования

отработанного ядерного топлива (ОЯТ) в реакторах на быстрых нейтронах, позволяют вовлекать РАО в замкнутый ядерно-топливный цикл, однако это не решает проблему хранения высокоактивных РАО. Их объем не превышает долей процента от общего объема РАО, но высокая радиоактивность и длительный период сохранения опасности заставляют принимать затратные усилия по их изоляции от биосферы. В настоящее время отсутствуют промышленно реализованные технологии переработки и обезвреживания высокоактивных РАО в масштабах, способных существенно уменьшить общий объем РАО (приведенный выше). Поэтому высокоактивные РАО, в соответствии с действующим законодательством Российской Федерации, подлежат захоронению² в пунктах глубинного захоронения радиоактивных отходов (Постановление Правительства РФ от 19.10.2012 №1069).

Окончательная изоляция РАО в глубоких геологических формациях – сложнейшая геоэкологическая проблема, решением которой на протяжении последних десятилетий занимались такие известные исследователи как Лаверов Н.П., Мельников Н.Н., Кедровский О.Л., Юдинцев В.С., Андерсон Е.Б., Хлопин В.Г., Шишиц И.Ю., Рыбальченко А.И., Морозов В.Н., Татаринцов В.Н., Петров В.А., Кочкин Б.Т., Камнев Е.Н., Гупало Т.А., Гупало В.С. и другие.

Концепция безопасности ПГЗРО основана мультибарьерном подходе [Disposal..., 2011; НП-055-14 и др.]. Совокупность барьеров должна обеспечить глубокоэшелонированную защиту от окружающей среды с тем, чтобы безопасность не зависела от одного барьера. Предусматриваются следующие барьеры: матрица с РАО, металлическая канистра для матрицы, глинистый буфер из бентонита между канистрой и вмещающей породой, заполнитель магистральных тоннелей и подземных выработок, вмещающая порода и геологическая среда в целом, которая отделяет систему инженерных барьеров (СИБ) от биосферы (рис. 1.2). Несмотря на это, технология захоронения РАО до сих пор не реализована нигде в мире. Практически «вечная» опасность РАО с одной стороны и жесткие нормативные требования с другой являются источниками проблем при доказательстве безопасности геологических хранилищ [Кочкин и др., 2017].

Пункт глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) представляет собой сложную геотехнологическую систему, включающую три взаимосвязанные подсистемы [Андерсон и др., 2011]: радиоактивные отходы; подземный горно-инженерный комплекс с системой инженерных барьеров, представленных сооружениями и консервационными материалами; геологическую среду, включающую приконтурную часть породного массива, или ближнюю зону, и структурно-тектонический блок, или дальнюю зону. Функционирование

² Термин «захоронение» относится к размещению радиоактивных отходов в недрах без намерения их последующего извлечения [МАГАТЭ SSR-5, 2011; НП-055-14, 2014].

СИБ ограничено во времени несколькими тысячами лет [Крупская и др., 2018; 2020; Ильина и др., 2019; Марьинских и др., 2021], а при подземной изоляции долгоживущих РАО основная барьерная функция возлагается на геологическую среду.

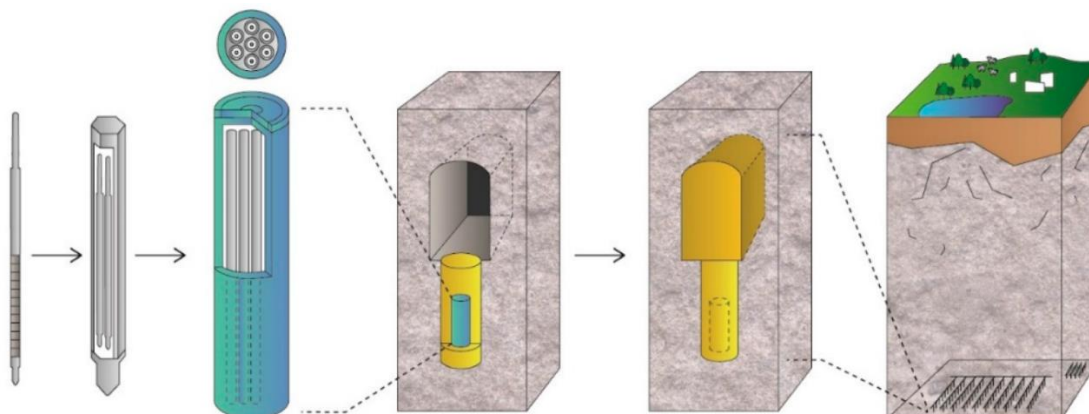


Рисунок 1.2 – Мультибарьерный подход к безопасности ПГЗРО

Данная технология разрабатывается во многих развитых странах мира – Российской Федерации, США, Франции, Англии, Японии, Финляндии, Швейцарии, Швеции и других [Цебаковская и др., 2015; Абалкина и др., 2019]. Эксплуатация пунктов подземной изоляции РАО требует проведения комплексных и длительных исследований состояния геологического массива. Одним из определяющих факторов долговременной безопасности изоляции РАО в геологических формациях является вероятность проявления опасных геодинамических явлений и процессов, прежде всего землетрясений, разломообразования и современных движений земной коры [Лаверов и др., 2010; Андерсон и др., 2011; Камнев и др., 2011; Кочкин, 2017].

В 2019 году в Красноярском крае начато строительство первого в России ПГЗРО. После завершения строительства ПИЛ предполагается реализация программы детальных исследований выбранного участка, направленной на обоснование изоляционных свойств выделенного структурно-тектонического блока [Стратегия..., 2018; Дорофеев и др., 2017]. Это уникальный объект по уровню своей ответственности и соответственно программе исследований, которая его сопровождает. ПГЗРО представляет собой подземное сооружение, расположенное на глубине более 500 метров [Подземная..., 2023] (рис. 1.3).

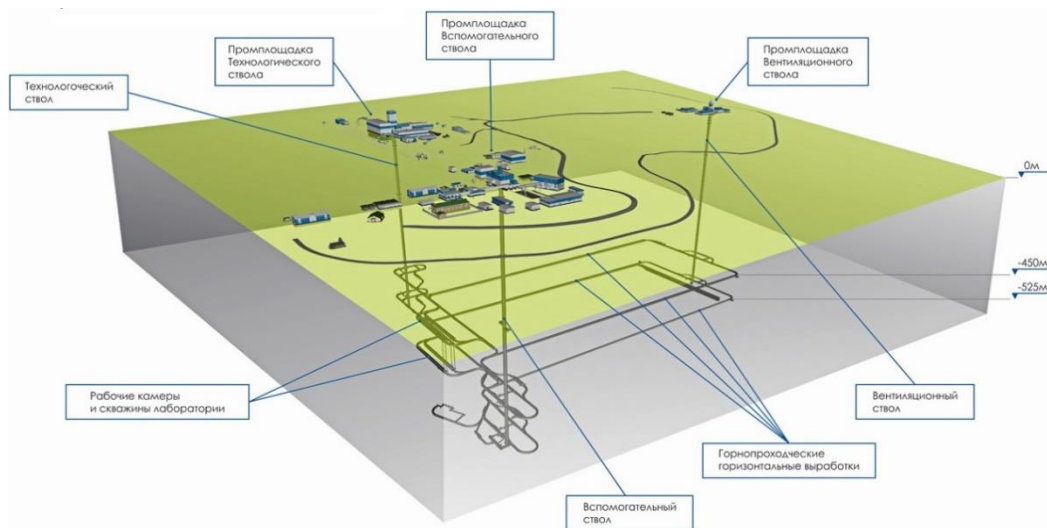


Рисунок 1.3 – Схема подземной исследовательской лаборатории в Красноярском крае
[Подземная..., 2023]

1.2 Геодинамические исследования при обосновании безопасности подземной изоляции РАО

Ежегодно разрабатываются новые технологии и средства защиты, которые направлены на снижение количества и последствий нештатных ситуаций, и, соответственно, социальных, экономических и экологических рисков при эксплуатации опасных производственных объектов [Куликова и др., 2015] и освоения новых территорий с опасным геодинамическим режимом. Постоянное освоение новых территорий (на поверхности Земли и ее недр), усложнение условий добычи полезных ископаемых и усложнение технологических процессов на производственных объектах приводит к ужесточению требований промышленной безопасности опасных производственных объектов [Конюхов, 2021]. Два этих аспекта определяют необходимость получения максимально полной и достоверной информации о состоянии геологической среды.

Обоснование геодинамической безопасности радиационно опасных объектов регулируется серией нормативных документов Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) и Ростехнадзора (РБ-019-17, РБ-142-18, НП-032-01, НП-032-02, НП-100-17, НП-055-14, СП 408.1325800.2018, IAEA Safety Standards Series NS-G-1.5-21, NS-G-3.3, SSG-9, IAEA-TECDOC-1767, IAEA-TECDOC-1987). Геодинамические аспекты обоснования долговременной безопасности неразрывно связаны с исследованиями современных движений земной коры, смещений и деформаций земной поверхности, напряженно-деформированного состояния и устойчивости горных пород [Tatarinov et al., 2019; Manevich et al., 2019a,b].

Основная опасность поступления РАО в окружающую среду обусловлена активными тектоническими структурами локального и регионального уровней, которые за счет силового

воздействия могут привести к деструкции пород структурного блока и инфильтрации опасных радионуклидов с подземными водами. В этой связи, задачи структурно-геологического картирования, идентификация активности разрывных нарушений, их параметризация, оценка опасности, разработка моделей источника воздействий и ожидаемых деформаций являются основными в прогнозе длительной сохранности изоляционных свойств пород (данный вопрос рассмотрен отдельно в главе 2).

Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии и руководства по безопасности определяют необходимость получения на основе изыскательских и научно-исследовательских работ данных, характеризующих геодинамические и сейсмотектонические условия участка и района создания ПГЗРО. Согласно основным нормативам РБ-019-17, РБ-142-18, НП-032-01, НП-032-02, НП-100-17, НП-055-14, СП 408.1325800.2018 в части оценки геодинамической опасности необходимо выполнение следующих работ на стадиях жизненного цикла ПИЛ и ПГЗРО:

- На этапе разработке ТЭО (обоснование инвестиций) составляются карты-схемы геодинамических зон и активных разломов района, карты-схемы зон возникновения очагов землетрясений (ВОЗ) с определением их параметров;
- В период строительства и эксплуатации должен осуществляться сейсмический, геотехнический и геодинамический контроль стабильности геологической среды на основе мониторинговых (режимных) наблюдений в районе размещения ПИЛ/ПГЗРО;

Геодинамические и сейсмотектонические исследования при подготовке отчета по обоснованию безопасности опираются на геологические карты и схемы тектонических нарушений, отражающих на различных масштабных уровнях (район, дальняя зона, ближняя зона и площадка ПИЛ) геодинамическую эволюцию территории. В настоящее время для данного района существует Государственная геологическая карта (лист О-46-XXXIV масштаба 1:200 000) [Никулов и др., 2015], государственных карт более крупных масштабов нет. Однако, согласно требованиям НП-055-14, НП-100-17, РБ-019-18, РБ-142-18 «геодинамические и сейсмотектонические исследования при обосновании безопасности ПГЗРО должны опираться на карты геодинамических зон и активных разломов в масштабе 1:50 000 и мельче в радиусе 25 км от объекта использования атомной энергии (ОИАЭ)».

В НП-100-17, относительно содержания отчета по обоснованию безопасности указано: *«Должны быть представлены геолого-тектонические, геодинамические, геологические, сейсмотектонические и сейсмические условия региона, района и площадки размещения ПЗРО: тектоническая, геологическая, сейсмотектоническая карты, схема разломов, включая выделение активных разломов и геодинамических зон региона в масштабе 1:500 000 и района (площадки) в масштабе 1:50 000».*

В РБ-019-17 – «Исследования геодинамических условий ближнего района и площадки размещения ОИАЭ рекомендуется проводить для территории, ограниченной радиусом 30 км, на картографических материалах в масштабе 1:50 000».

Объем и состав выполняемых инженерных изысканий и исследований района размещения ОИАЭ и площадки ОИАЭ должны быть достаточны для:

- выявления внешних воздействий, влияющих на безопасность ОИАЭ;
- определения максимальных значений интенсивности внешних воздействий, вероятности их возникновения, безопасного расстояния от источников внешних воздействий до площадки ОИАЭ;
- установления степени опасности внешних воздействий и класса площадки ОИАЭ;
- учета взаимосвязи внешних воздействий и прогноза их развития при сооружении, эксплуатации и выводе из эксплуатации ОИАЭ.

Результаты инженерных изысканий и исследований района размещения ОИАЭ и площадки ОИАЭ должны отображаться в отчете обоснования безопасности ОИАЭ и актуализироваться по результатам мониторинга параметров процессов явлений и факторов природного и техногенного происхождения при сооружении, эксплуатации и выводе из эксплуатации ОИАЭ в соответствии с программой мониторинга.

Таким образом, для выполнения этих требований необходимо иметь утвержденный комплект карт масштабов крупнее 1:200 000. Учитывая разночтение в различных документах, такой комплект, должен, вероятно, состоять из карт масштабов:

1. Региональный масштаб 1:500 000; R= 300 км.
2. Ближний район или пункт 1:50 000; R= 25 км.
3. Дальняя зона 1:5 000; R= 3-5 км.
4. Площадка 1:500 – 1:1000. R= 1,5 км.

Фундаментальной основой безопасности подземной изоляции РАО с периодом полураспада свыше 10 тыс. лет является прогноз устойчивости структурно-тектонического блока на время практически сопоставимое с геологическими периодами. Кинетика тектонических движений в верхней части земной коры в интервале глубин до 20 км в континентальных районах Земли определяется тектоническими напряжениями, которые формируют разломные структуры за счет медленных (криповых) и быстрых сейсмических движений. Развитие современных движений и деформаций земной коры, особенно в сейсмически активных районах, зонах воздействия активных тектонических разломов и на оползнеопасных территориях, может становиться фактором возникновения аварийных ситуаций на опасных производственных объектах: магистральных нефте- и газопроводах, объектах недропользования, объектах использования атомной энергии, гидротехнических

сооружениях и других инженерных системах. Современные движения земной коры являются одним из видов природных опасностей, которые особенно опасны для объектов с длительными сроками эксплуатации, когда происходит циклическое накопление деформаций.

Современные движения земной коры и деформации земной поверхности – главные индикаторы проявления эндогенных и экзогенных геодинамических явлений и процессов как природного, так и техногенного характера. Они обусловлены сложным пространственно-временным сочетанием геологических процессов различного иерархического уровня, протекающих в недрах Земли. При этом зачастую эти процессы, протекающие в недрах, невозможно исследовать непосредственно. Помимо этого, количественные характеристики СДЗК и поля напряжений зависят так же и от свойств геологической среды, в которой они реализуются. Это физико-механические свойства горных пород, геологическое строение в верхней части земной коры, разломная тектоника исследуемого района, гидрогеологические и геотермические факторы и многое другое. В связи с этим исследование современных движений земной коры напряженного состояния – актуальная задача для многих районов мира, включая как районы размещения особо ответственных сооружений (атомные электростанции, тепловые электростанции, месторождения полезных ископаемых, магистральные трубопроводы и т.д.), так и районы активной тектоники и регионы с повышенной сейсмической активностью.

Термин «современные движения земной коры» сформировался в связи с появлением возможностей их инструментальной регистрации. Развитие исследований СДЗК первоначально было связано с формированием в СССР таких научных направлений, как неотектоника и тектонофизика. Согласно определению А.А. Никонова, современные движения земной коры – *«движения и деформации на поверхности Земли и в ее недрах (земной коре) под воздействием внутриземных и внешних относительно литосферы причин, происходящие в настоящее время и последние несколько сотен лет»* [Никонов, 1977, с. 12]. СДЗК считается одним из видов неотектонических движений, согласно классификации [Николаев, 1988] наряду с импульсными сейсмическими, техногенными, историческими, молодыми и четвертичными движениями. Николаев отмечает, что СДЗК «...отражают сложную интерференцию перемещений разного генезиса. Под современными движениями следует понимать полигенетические, многокомпонентные перемещения земной поверхности, вещества недр и изменения формы Земли, изучающие накопление напряжений и деформаций под воздействием разных источников энергии» [Николаев, 1988, с. 31].

Дифференциация неотектонических движений во временном отношении приведена на таблице 1.2, по классификации Никонова А.А. и Николаева П.И. [Никонов, 1977; Николаев, 1988].

Таблица 1.2 – Классификация современных движений земной коры по времени проявления по материалам [Никонов, 1977; Николаев, 1988]

№	Вид неотектонического движения	Временной интервал, лет
1	Импульсные (сейсмические)	от 10^{-12} до 10^{-8}
2	Техногенные	от 10^{-8} до 6×10^3
3	Современные	от 10^{-8} до 2×10^2
4	Исторические	от 10^2 до 6×10^3
5	Молодые (голоценовые)	от 10^2 до 12×10^3
6	Четвертичные (плейстоценовые)	от 10^2 до 1.6×10^6

Различные аспекты тектонических движений исследованы в работах Белоусова В.В., Гзовского М.В., Хаина В.Е., Никонова А.А., Николаева Н.И., Несмеянова С.А. и многих др. исследователей в области неотектоники и тектонофизики в 1960–1970 годах. Тогда обращалось внимание на неоднозначность природы современных движений, особенно в малоподвижных областях. Это связано с тем, что за интервал современных движений (до 100–200 лет) не успевает сформироваться их результат влияния в виде геологических или геоморфологических условий. При анализе СДЗК зачастую приходится иметь дело с результатами инструментальных измерений смещений и деформаций земной поверхности за несколько лет. Естественно, что накопленные смещения и деформации не вносили видимый для человека вклад в геолого-геоморфологические условия исследуемого района. Помимо этого СДЗК, определяемые инструментальными методами, являются движениями лишь земной поверхности, на которой проводятся измерения. И этот вопрос является частью проблемы выявления однозначной природы СДЗК (тектонической, техногенной, экзогенной и т.д.). Например, при вертикальных движениях на земной поверхности регистрируются поля растяжений, в то время как на глубине сжимающие силы, приводящие к поднятию блока.

Следует отметить, что рассматриваемый в работе подход к анализу современных движений и деформаций земной коры имеет методологическую преемственность с концепцией геодинамического районирования, развитой в рамках направления «Геодинамика недр» [Батугина и Петухов, 1988; Геодинамическое..., 1990]. Уже в ранних методических указаниях по геодинамическому районированию недр в состав исследований включались: выявление иерархически упорядоченной блочной структуры массива, изучение взаимодействия блоков, оценка напряженного состояния и разработка рекомендаций по безопасному размещению и эксплуатации инженерных объектов. Тем самым геодинамическое районирование рассматривалось не только как средство структурно-тектонического анализа, но и как инструмент выбора участков для размещения ответственных объектов с учетом

современных движений земной коры и напряженно-деформированного состояния массива. В дальнейшем данный подход получил развитие при региональных исследованиях, в частности при геодинамическом районировании территории Московской области, где были построены карты блоков нескольких иерархических уровней и дана оценка геодинамических условий территории для решения прикладных инженерных задач [Алексеев и др., 2003]. Указанные работы представляют методический интерес для настоящего исследования, поскольку ориентируют анализ не только на картирование разломно-блоковой структуры, но и на интерпретацию современных деформаций и напряженного состояния геологической среды применительно к задачам обоснования безопасности размещения ответственных объектов.

В областях развития неоднородностей природного и техногенного характера (контакты блоков с различными физико-механическими свойствами, тектонические разломы, зоны дробления, дайки, горные выработки и т.п.) образуются локальные зоны концентрации напряжений, которые могут инициировать процессы разрушения породного массива и систем инженерных барьеров. Изучение характеристик современных вертикальных и горизонтальных движений земной коры необходимо для:

- определения степени сейсмической опасности изучаемой территории;
- выявления активных тектонических структур;
- определения количественных параметров и векторов движений в зоне тектонических разрывов и границ структурных блоков;
- определения скоростей деформаций породного массива для прогноза эволюции изоляционных свойств геологической среды;
- задания граничных условий в математических моделях напряженно-деформированного состояния пород.

1.3 Современное состояние геодинамической изученности района размещения ПИЛ в Красноярском крае

В 2019 г. на территории Российской Федерации (Красноярский край, г. Железногорск) начато строительство подземной исследовательской лаборатории для обоснования безопасного захоронения высокоактивных радиоактивных отходов (РАО) [Дорофеев и др., 2017]. Сохранность изоляционных свойств геологической среды во многом определяется геодинамической активностью земной коры в районе пункта глубинного захоронения РАО [Белов и др., 2007; Лаверов и др., 2010]; он должен располагаться в условиях отсутствия интенсивных движений земной коры, чтобы тектоническая деструкция не могла спровоцировать разрушение геологических и инженерных барьеров и выход радионуклидов

за пределы санитарно-защитной зоны в течение всего периода радиобиологической опасности РАО.

Нижне-Канский массив расположен в Красноярском крае, на северо-западе Западно-Сибирской платформы. Массив представляет собой глубокоководный интрузивный комплекс, состоящий преимущественно из габбро и плагиогранитов [Никулов и др., 2015]. По геологической структуре Нижне-Канский массив представляет собой внутриплатформенный массив субгоризонтального положения, простирающийся на площади около 15 тыс. км². Он сформировался в период мезозоя, примерно 250 млн лет назад, в результате процессов магматизма и интрузии в кору Земли. Нижне-Канский массив имеет разнообразную геологическую структуру, представленную множеством интрузий различного размера и формы [Никулов и др., 2015; Белов и др., 2007]. Он состоит из трех основных комплексов: габброидного, гранитного и гранодиоритового [Никулов и др., 2015]. Габброидный комплекс представлен габбро, диоритом, тонкозернистым габбро, анортозитом и гранулитом. Гранитный комплекс состоит из кварц-биотитовых и кварц-мусковитовых гранитов, а также биотитовых и мусковитовых гранодиоритов. Гранодиоритовый комплекс состоит из биотитовых и мусковитовых гранодиоритов, сингенезной пегматитовой разломной породы.

В пределах участка размещения подземной исследовательской лаборатории выполнены разведочное опробование (18 геологических скважин глубиной по 500-700 м пробуренных до 2023 г.), геологическое картирование и разведочное бурение с отбором ориентированного керна (10 геологических скважин глубиной по 165 м пробуренных после 2023 г.), по результатам которых построен комплект детальных геологических карт и карт разрывных нарушений (рис. 1.4а), сформирована трехмерная геологическая модель в среде ГИС Micromine [Морозов и др., 2019; Морозов, 2024]. Полученные данные позволили уточнить строение кристаллического основания, параметры складчатых и разрывных структур, а также элементы залегания метаморфической полосчатости гнейсов. В сводном анализе геологических условий участка сотрудниками ИГЕМ РАН [Минаев и др., 2025] установлено, что разрывные нарушения представлены зонами структурной неоднородности с развитием дизъюнктивов второго порядка, различающихся по генезису и гидрогеологическим свойствам. Выделены древние залеченные разломы, водопроницаемость которых гипотетически сопоставима с ненарушенным массивом, и более поздние зоны дробления, потенциально характеризующиеся повышенной проницаемостью; признаков новейшей тектонической активности по разломам выявлено не было [Минаев и др., 2025].

На основе данных геологического опробования, детального изучения трещиноватости, физико-механических свойств пород и геофизических наблюдений в Геофизическом центре РАН за 2023–2025 г. разработана трехмерная геомеханическая модель породного массива

участка ПИЛ [Акматов и др., 2023; 2024]. Модель включает литологию, разрывные нарушения, интрузивные тела, зоны трещиноватости (рис. 1.4) и параметры внешнего поля напряжений и использована для численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива. Установлены особенности локализации зон концентрации напряжений, преимущественно приуроченных к тектоническим нарушениям и их пересечениям [Акматов и др., 2026].

В настоящее время имеется несколько вариантов тектонических карт и схем различных авторов с разломами для исследуемой территории (рис. 1.5). Нанесенные на них разломы местного и локального порядка существенно отличаются по расположению и достоверности материалов, на основе которых они были помещены на карту, что связано с различными методами и подходами выделения разломов (рис. 1.5). Карта неотектонических разломов и блоков (рис. 1.5а) была составлена в 1993 году, на основе дешифрирования результатов аэрофотосъемки района [Лопатин, 1999]. Карта активных разломов Енисейско-Канского междуречья (рис. 3.2б) была составлена на основе анализа данных карты активных разломов Алтае-Саянской орогенетической области [Лукина, 1996б], дешифрирования космических снимков, а также результаты геологического опробования [Лукина, 1996а]. Карта активных разломов и мегатрещин (рис. 3.2в) была создана на основе более детальных мелкомасштабных геоморфологических исследований района [Лукина, 1999]. Карта разломов Нижне-Канского массива (рис. 3.2д) была создана на основе принципа неотектонического районирования [Лобацкая, 2005; 2014], и является одной из самых часто упоминаемых схем в контексте исследования разломной тектоники Нижне-Канского массива. Карта разломов Нижне-Канского массива (рис. 3.2г) [Селеев и др., 2018] была разработана сотрудниками ФГУП «ГХК» на основе карты разломов [Лобацкая, 2005] и дополнена данными геологического опробования в районе, в том числе полученных при проходке туннеля под р. Енисей. Схема тектонических разломов Нижне-Канского массива, представленная на рис. 3.2е является элементом листа Государственной геологической карты О-46-XXXIV [Никулов и др., 2015].

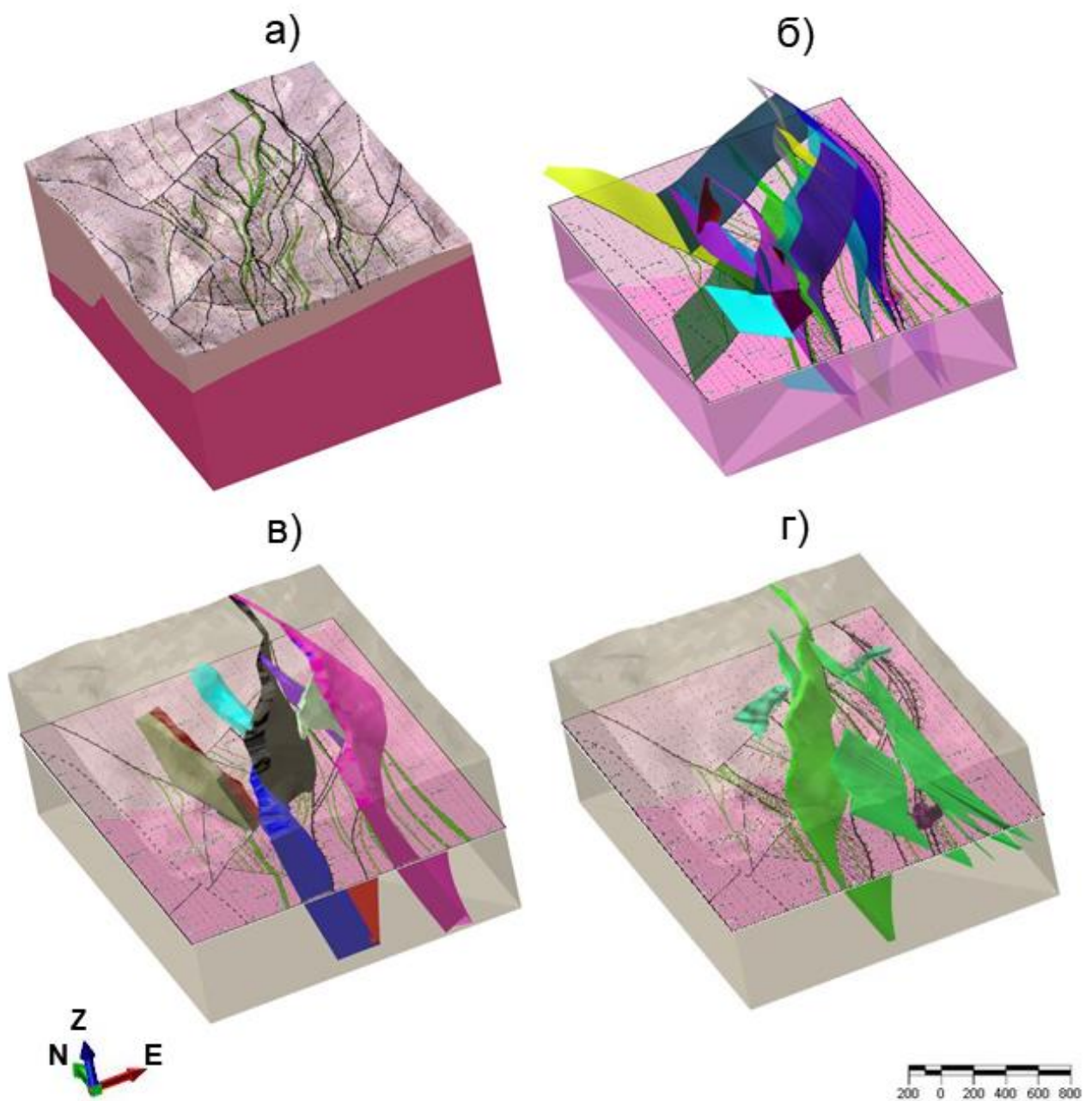


Рисунок 1.4 – Трехмерное отображение основных геологических структур объемной модели участка «Енисейский» [Акматов и др., 2023; 2024]: а – модель литологических слоев; б – плоскости разломов; в – зоны дробления; г – интрузивы и дайки.

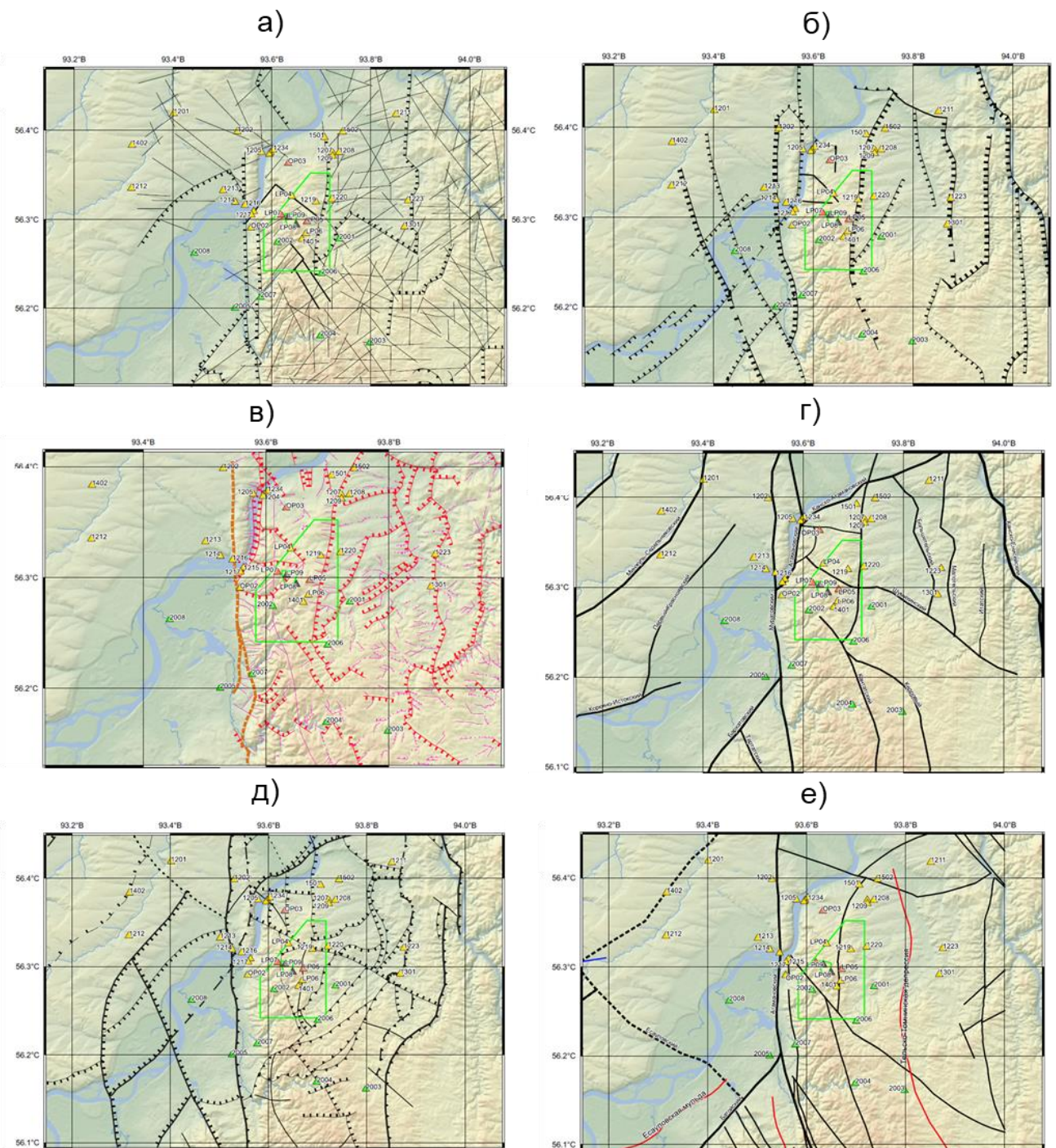


Рисунок 1.5 – Разломно-тектонические схемы Нижне-Канского массива. а – карта неотектонических разломов и блоков по данным [Лопатин, 1999]; б – карта активных разломов Енисейско-Канского междуречья по данным [Лукина, 1996а]; в – карта активных разломов и мегатрещин по данным [Лукина, 1999]; г – карта разломов Нижне-Канского массива по данным [Селеев и др., 2018]; д – карта разломов Нижне-Канского массива по данным [Лобацкая, 2005; 2014]; е – схема тектонических разломов Нижне-Канского массива по данным съемки Государственной геологической карты [Никулов и др, 2015]

Большое количество схем разломов вносит неопределенность при оценке геодинамической опасности района. В этой связи, в части уточнения геодинамических условий научной группой ИГЕМ РАН был выполнен системный анализ схем разломов и тектонических нарушений с целью создания обобщенной тектонической схемы с оценкой достоверности тектонических нарушений [Gvishiani et al., 2021; Гвишиани и др., 2022; Минаев и др., 2025]. Нижне-Канский массив находится в области контакта крупных региональных тектонических структур: складчатого сооружения Енисейского кряжа и эпигерцинской Западно-Сибирской плиты. В северо-восточном направлении Енисейский кряж сочленяется с древней Сибирской платформой. На юго-западе структуры кряжа и Западно-Сибирской плиты контактируют с Восточно-Саянской частью салаирско-каледонской сейсмоактивной Алтае-Саянской складчатой области [Лукина, 1996, 1999; Лобацкая, 2005; Верниковский и др., 2008; Никулов и др., 2015]. Тектонические нарушения образуют иерархическую блоковую структуру, пространственно-временная эволюция напряженно-деформированного состояния которой определяет изоляционные свойства массива.

Наиболее значимым разрывным нарушением является Приенисейский глубинный разлом длиной около 700 км, известный на данном участке как Муратовский. Разрывы представлены субмеридиональными структурами северо-западного и запад-северо-западного и субширотного простирания. На рис. 1.6, приведена разломно-блоковая схема района, разработанная геологами ИГЕМ РАН, и представленная в работе [Гвишиани и др., 2022]. Разрывные нарушения северо-западного, запад-северо-западного направлений образуют тектонопару с субмеридиональными взбросами, являясь сбросо-сдвигами, а северо-восточного простирания - в основном левосторонними сдвигами [Лобацкая, 2005; Верниковский и др., 2008]. Средняя ширина зон динамического влияния разломов оценивается в 0,7-1,3 км за исключением Приенисейского, где она, согласно приведенным в [Кочарян, 2016] зависимостям, превышает 7 км, захватывая участок строительства ПИЛ.

Район участка «Енисейский» относится к внутриконтинентальному Алтай-Саян-Байкальскому сейсмическому региону Северной Евразии, выделенному как регион 3.1 в линеаментно-доменной фокальной модели ОСР-97 [Уломов и Шумилина, 2000]. В пределах этого региона, на удалении около 600–1000 км от участка «Енисейский», известны сильные землетрясения: события с магнитудой более 7,0 в Восточном Саяне (1800, 1829, 1839, 1950 гг.), Хангайские землетрясения М 8,4 и М 8,7, Моготское землетрясение М 7,8 (Монголия, 1905 и 1967 гг.), Монголо-Алтайское землетрясение М 8,0 (1931 г.) и Гоби-Алтайское землетрясение М 8,2 (1957 г.) [Аржанников и др., 2005].

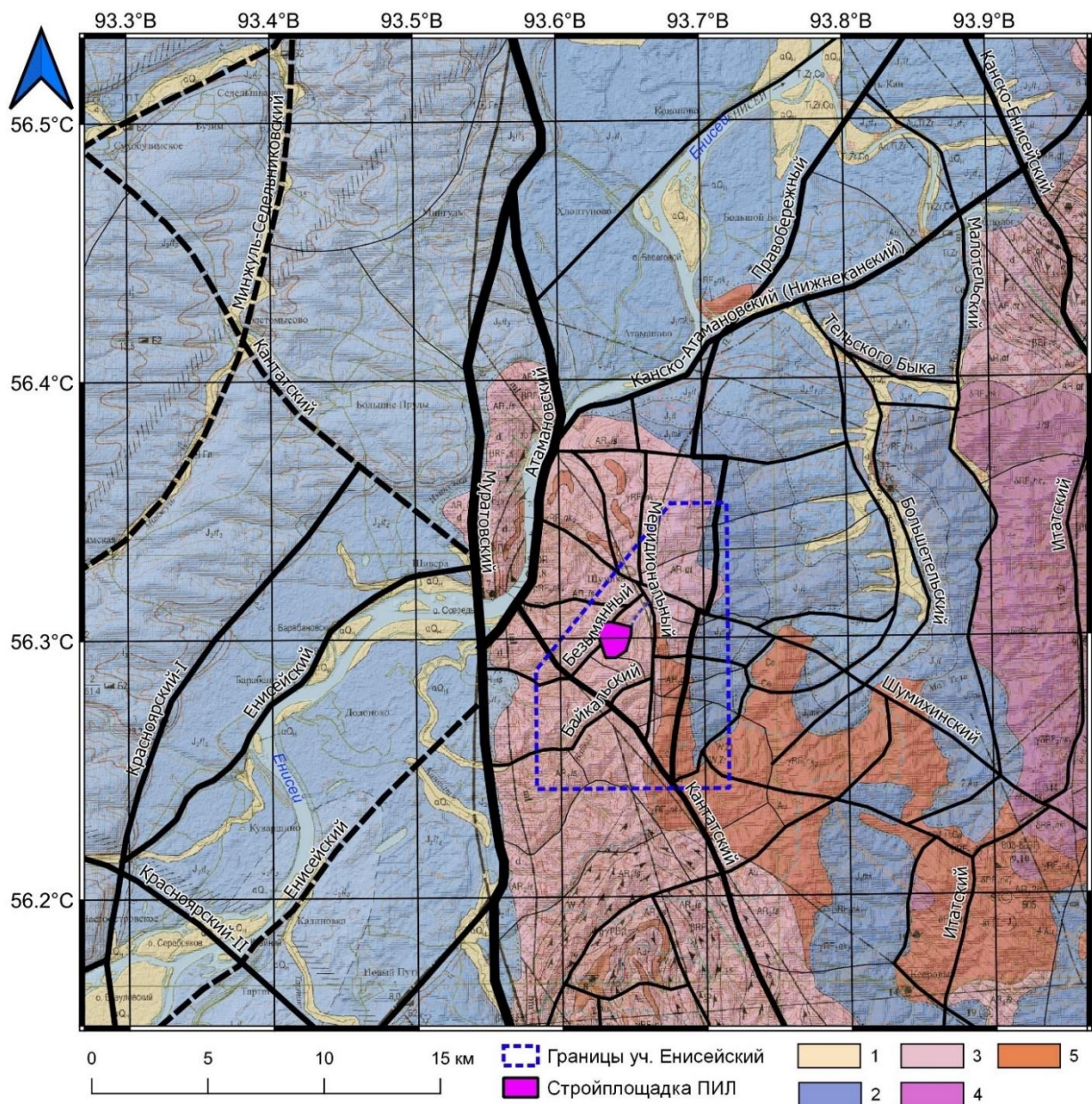


Рисунок 1.6 – Структурно-тектоническая района расположения участка «Енисейский» [Гвишиани и др., 2022; Акматов, 2024] на геологической основе по данным [Никулов и др., 2015]. Толстые черные линии – главные разломы, черные линии средней толщины – региональные разломы, тонкие черные линии – локальные разломы, черные пунктирные линии – предполагаемые разломы. 1 – аллювиальные отложения поймы (галечники, пески); 2 – юрские отложения (песчаники, алевролиты, аргиллиты); 3 – раннеархейские гнейсы, кристаллосланцы атамановской серии; 4 – позднерифейские диориты и гранодиориты; 5 – позднерифейские граниты биотитовые.

По данным карт общего сейсмического районирования ОСР-97, рассматриваемая территория отнесена к зоне интенсивности 6 баллов для проектного землетрясения (ПЗ) с расчетной повторяемостью сотрясений 1 раз в 1000 лет и к зоне интенсивности 7 баллов для

максимального расчетного землетрясения (МРЗ) с расчетной повторяемостью 1 раз в 10 000 лет. Для подземных сооружений, размещенных на глубинах более 400 м, расчетная интенсивность составляет соответственно 4 и 5 баллов. При этом для средних грунтовых условий в качестве нормативных значений интенсивности ПЗ и МРЗ приняты 7 и 8 баллов соответственно [Уломов и Шумилина, 2000], что также подтверждено результатами сейсмического микрорайонирования [Селеев и др., 2018]. Сейсмичность ближней зоны в течение последних 30 лет неоднократно оценивалась в рамках обоснования безопасности объектов использования ядерной энергии, функционирующих в данном районе. Одной из наиболее поздних работ является сейсмическое микрорайонирование площадки реакторного завода, расположенного на территории основных сооружений ФГУП «ГХК» в 3 км северо-западнее площадки ПИЛ, выполненное в 2015 г. [Селеев и др., 2018].

О наличии четвертичных тектонических деформаций свидетельствуют поднятия многочисленных террас р. Енисей на пересечении с Енисейским кряжем, что было выявлено уже в начале 1990-х г. по данным структурно-геоморфологических исследований [Лукина, 1996; Андерсон и др., 2011]. В результате было установлено, что в районе широко распространены тектонические нарушения, активные на новейшем и современном этапе. Определение величин вертикальных смещений по отдельным из неотектонических разломов показало, что они могли достигать 200-300 м. Максимальные скорости относительных современных смещений по активным разломам опускающихся и поднимающихся блоков в районе оценены в пределах 5-6 мм/год. По данным высокоточных повторных нивелировок скорости вертикальной составляющей современных тектонических движений в районе не превышают 4 мм/год [Колмогоров и Колмогорова, 2004]. Для блоков горных систем Восточного Саяна, Южно-Енисейского кряжа и смежных предгорных территорий характерны современные восходящие движения со скоростями до 1 мм/год и более. Области опускания приурочены к Красноярской лесостепной равнине, где скорости достигают 3–4 мм/год, а также частично к Рыбинской лесостепной равнине, для которой характерны значения до 1 мм/год [Колмогоров и Колмогорова, 2004].

Необходимо отметить и выявленные признаки активности зафиксированы в зоне Кий-Арбайского (Кингашского) разлома, где зафиксированы протяжённые палеосейсмодислокации взбросо-надвигового типа, сопровождающиеся формированием тектонических уступов, деформацией четвертичных отложений и инъекционными структурами [Аржанников и др., 2004]. Детальные палеосейсмологические исследования в районе пос. Малиновка показали одноактный характер деформаций с амплитудами смещений 6,6–7,8 м, что позволило оценить магнитуду палеоземлетрясения как $M \approx 7,9-8$. Сейсмогенные

проявления прослеживаются на протяжении порядка 100 км и фиксируются в долинах рек Кан, Кингаш, Идар и их притоков, а также в элементах современного рельефа.

Отдельно стоит рассмотреть режимные исследования на геодинамическом полигоне ПИЛ, в рамках которых выполняется получение временных рядов приращений координат геодезических пунктов в плане и по высоте и регистрация сейсмических событий за определенный интервал времени для последующего деформационного анализа, оценки и прогноза изоляционных свойств массива. Система геодинамического мониторинга включает в себя три подсистемы:

1. Подсистема изучения горизонтальных и вертикальных движений земной коры с использованием средств ГНСС (спутниковая планово-высотная наблюдательная сеть);
2. Подсистема изучения вертикальных движений земной коры методом высокоточного повторного нивелирования;
3. Сейсмологическая подсистема.

1. ГНСС-измерения:

В 2010 г. сотрудниками Горно-химического комбината (г. Железногорск), ООО «Геолком» и Геофизического центра РАН в пределах Нижне-Канского массива была создана спутниковая геодезическая сеть, состоящая из 30 пунктов ГНСС-наблюдений за современными движениями земной коры [Татаринов и др., 2018]. На январь 2025 г спутниковая геодезическая сеть включает в себя 41 пункт. Обеспечивая нахождение строительной площадки ПИЛ внутри контура геодезической сети. При проектировании геодезической сети была использована структурно-тектоническая схема района [Лобацкая, 2005; Лукина, 1996], согласно которой поле СДЗК определяется силовым взаимодействием крупнейших тектонических структур – Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформы, контактирующих по Муратовскому разлому и другим тектоническим дислокациям. Измерительная сеть закладывалась таким образом, чтобы пересекать все основные местные тектонические нарушения и захватывать территорию строительной площадки ПИЛ.

Наблюдения проводятся с 2010 г. в режиме полевых кампаний раз в год. Всего к январю 2025 г. было проведено 12 циклов наблюдений. Запись ГНСС-измерений проводилась в течение 4–10 часов дискретизацией в 30 с. Геодезические пункты геодинамического полигона Нижне-Канского массива представляют собой стальной трубчатый знак диаметром 150–180 мм, заглубленный на 3 м и выступающий над поверхностью земли на 2 м с обсадной трубой диаметром 400–500 мм заполненной утеплителем (стекловата, керамзит), поверх которого заливается 10-сантиметровый слой гидроизоляции. При изготовлении знака к верхнему концу

внутренней трубы приваривается центрировочное устройство, к нижнему концу – якорь (уголок, труба, арматурная проволока) для сцепления с цементным башмаком (рис. 1.7а).

2. Повторное нивелирование:

Регулярные наблюдения за вертикальными движениями в районе геодинамического полигона ПИЛ выполнялось в несколько этапов, начиная с конца 1980-х годов. В 1989–1991 гг. Алма-Атинским архитектурно-строительным институтом проведены три цикла нивелирования I класса точности по четырем профилям, пересекающим Муратовский (три профиля) и Первый Красноярский (один профиль) разломы [Татаринов и др., 2018]. С 1985 по 1991 гг. на полигоне «Северный» выполнен 31 цикл нивелирования I класса в рамках контроля захоронения жидких РАО. В 2002 г. заложен наиболее протяженный нивелирный ход №1 длиной более 33 км, пересекающий Первый Красноярский, Муратовский, Атамановский и Правобережный разломы и включающий ранее созданные геодезические сети [Татаринов и др., 2018]. В 2006 г. на данном профиле выполнены повторные измерения. С 2012 по 2019 гг. нивелирование проводилось в рамках специализированной программы исследований вертикальных движений. Геодезический профиль был развит до Минжуль-Седельниковского и Большетельского сбросов; его общая длина составила 45 км [Татаринов и др., 2018]. В составе профиля оборудовано 35 пунктов (грунтовые, глубинные и стенные реперы, оголовки и обсадные колонны скважин). Расстояние между пунктами не превышало 2 км, начало и конец профиля закреплены кустами реперов. До 2012 г. применялось нивелирование II класса, с 2013 г. – I класса точности. Всего за период 1990–2018 гг. по профилю №1 выполнено 10 циклов наблюдений. Работы были продолжены в 2019 году, в результате чего выполнена закладка профилей №2 и 3, по которым выполнен первый цикл измерений в 2023 году. Схема нивелирного пункта приведена на рис. 1.7б.

3. Сейсмологический мониторинг:

В 2018 г. силами Железногорского филиала НО РАО развернута локальная система сейсмологического мониторинга (ССМ), предназначенная для регистрации локальных и местных сейсмических событий в радиусе до 300 км. Система включает 8 стационарных сейсмических станций, размещенных с учетом требований РБ-142-18 в зонах с минимальным уровнем микросейсмических шумов и благоприятными инженерно-геологическими условиями. Схема сейсмического пункта приведена на рис. 1.7в.

Все пункты ССМ оснащены однотипной аппаратурой: цифровыми регистраторами ZET 048-C VER.3 со встроенными велосиметрами, утвержденными в государственном реестре средств измерений. Рабочий частотный диапазон аппаратуры составляет 0,01–50 Гц, частота

опроса каналов – 100 Гц [Кишкина и др., 2021]. Сейсмометры установлены на бетонные постаменты, обеспечивающие жесткую связь с основанием и отсутствие собственных колебаний. Каждая станция размещена в заглубленном железобетонном павильоне (около 4 м), обеспечивающем защиту от внешних воздействий и стабильный температурный режим. Осредненный уровень микросейсмического фона в диапазоне 0,1–40 Гц составляет 0,05–0,3 мкм/с. По результатам анализа реальной чувствительности ССМ минимально регистрируемые магнитуды оцениваются как $M \approx 1,4$ на расстояниях до 100 км, $M \approx 1,7$ – до 200 км и $M \approx 2,0$ – до 350 км. Система функционирует в непрерывном режиме в период с 2018 г.

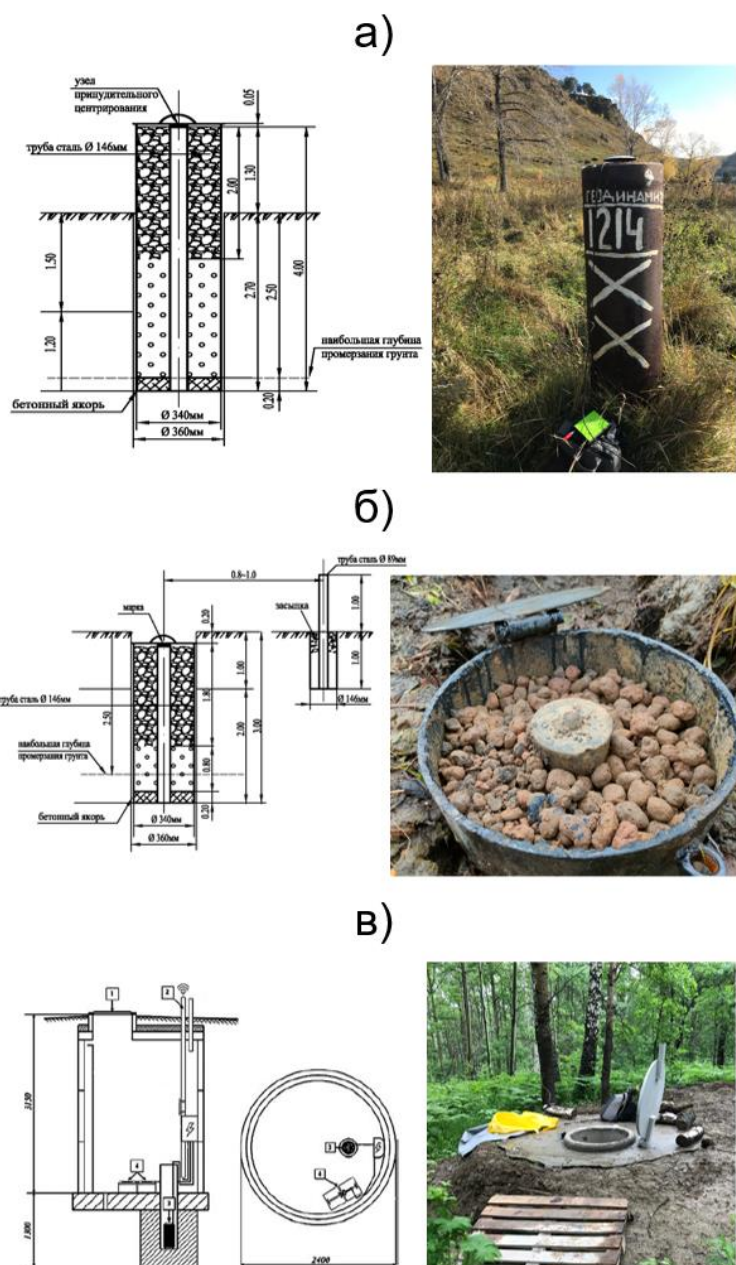


Рисунок 1.7 – Конструкция и внешний вид пунктов геодинимических наблюдений (детально конструкции описаны в работах [Кишкина и др., 2021; Маневич и др., 2022; Шевчук, 2024]): а – пункт ГНСС; б – нивелирный пункт; г – пункт сейсмологического наблюдений

В результате мониторинга, выполненного до 2025 года на геодинамическом полигоне, были получены следующие основные результаты:

1. Установлен циклический характер развития геодинамических движений в районе геодинамического полигона [Татаринов и др., 2018]. В 2013–2014 гг. была зафиксирована активизация геодинамического режима, проявившаяся в смене знака деформаций сжатия и растяжения на западном и восточном берегах р. Енисей. А в 2015 г. общая картина распределения зон сжатия и растяжения фактически вернулась к эпохе 2012–2013 г. Далее, в 2016 г. характер распределения поля дилатации с незначительными отличиями повторяет эпоху 2012–2014 г., таким образом продолжительность цикла режима сжатие-растяжение составило приблизительно 2 года [Гвишиани и др., 2022].

2. Скорость сближения Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты в зоне взаимодействия южной части Енисейского кряжа была оценена в 2–4 мм/год [Гвишиани и др., 2020]. А в целом, для региона можно заключить, что современные движения обусловлены субширотным сжатием по азимуту $\sim 100\text{--}110^\circ$ [Гвишиани и др., 2020].

3. В целом, за период наблюдений с 2012 по 2021 г. значения дилатации не превышали по модулю $1,6\div 8\cdot 10^{-5}$. Площадка строительства ПИЛ находится в зоне минимальных значений скоростей деформаций, на границе растягивающих и сжимающих деформаций. Так же, как и для дилатации, здесь отмечается пространственная миграция зон дефицита смещений. При этом в 2021–22 г. наибольшие величины зон дефицита смещений были зарегистрированы в непосредственной близости от площадки строительства ПИЛ [Гвишиани и др., 2022; Шевчук, 2024].

4. В результате многолетних геодезических измерений приращений высот зафиксированы современные вертикальные движения тектонических блоков с амплитудами, как правило, не превышающими единиц миллиметров в год [Татаринов и др., 2018]. Для Муратовского и Правобережного разломов установлены скорости вертикальных движений в пределах $\pm 0,4\text{--}0,5$ мм/год. По Атамановскому разлому в отдельные интервалы времени (1996–2002 гг.) зафиксировано опускание западного крыла относительно восточного со скоростью до $-2,4$ мм/год [Татаринов и др., 2018].

5. По профилю нивелирования №1 выявлена цикличность вертикальных движений: чередование этапов подъема и опускания блоков с суммарными амплитудами до $+6\text{--}7$ мм и -12 мм соответственно, а также тенденция относительного опускания западного крыла Правобережного разлома.

6. Организованная специалистами Железногорского филиала НО «РАО», система сейсмологического мониторинга показала отсутствие сейсмических сигналов, источники

которых были бы расположены в радиусе 30 км от площадки ПГЗРО, может свидетельствовать о стабильности тектонического режима массива скальных пород района [Кишкина и др., 2021].

7. За период функционирования ССМ (2018–2025 гг.) зарегистрированы сейсмические события в диапазоне магнитуд $M \approx 1,0-3,5$. Большинство источников локализуется за пределами площадки ПИЛ и приурочено к известным техногенным объектам (карьерам), а также к удаленным участкам разломной структуры региона.

8. По результатам анализа геологических данных построена структурно-тектоническая модель участка «Енисейский», объединяющая систему разрывных нарушений, литологическую схему, модели интрузивных тел, а также зоны повышенной трещиноватости и дробления. Данная модель является исходным этапом построения детальной трехмерной геомеханической модели участка [Акматов и др., 2023; 2024]. В условиях отсутствия масштабной программы сбора геомеханических данных по породам Нижне-Канского массива авторами дополнительно выполнена оценка категорий устойчивости горных пород по скальным выходам на земной поверхности. Полученные результаты подтвердили ранее сформулированные представления о динамическом воздействии Муратовского разлома на участок «Енисейский». Установлено, что породные массивы, находящиеся в зоне динамического влияния основных разрывных нарушений участка, характеризуются меньшей устойчивостью по сравнению с вмещающими породами, тогда как массивы, сложенные дайковыми комплексами долеритов, проявляют наибольшую устойчивость [Акматов и др., 2023; 2024].

Все собранные данные представлены в зарегистрированной базе данных по геодинамике Нижне-Канского массива [Лосев и др., 2024; 2025].

1.4 Выводы. Постановка цели и задач исследования

В первой главе показано, что подземная изоляция высокоактивных радиоактивных отходов представляет собой не только инженерно-геологическую, но прежде всего геоэкологическую задачу, поскольку долговременная безопасность объекта определяется способностью геологической среды сохранять свои барьерные функции и предотвращать перенос радионуклидов в биосферу. В этой логике район строительства ПИЛ должен рассматриваться как природно-техническая система, в которой геодинамический режим, нарушенность массива, фильтрационно-прочностные свойства пород и устойчивость инженерных барьеров образуют единую взаимосвязанную систему факторов.

Выполненный обзор нормативных и научных подходов показал, что при обосновании безопасности подземной изоляции РАО геодинамические исследования являются

обязательной частью комплекса изысканий, однако прямое использование понятия «активный разлом» в районе ПИЛ затруднено из-за неоднозначности существующих схем разломов, различий в их достоверности и ограниченности геолого-геофизического обоснования. В этих условиях более надежной основой для интерпретации становится не априорное выделение «опасных» структур, а анализ инструментально наблюдаемых современных движений и деформаций земной коры.

На территории района уже создана многокомпонентная система геодинамического мониторинга, включающая ГНСС-наблюдения, высокоточное нивелирование и сейсмологический мониторинг. Накопленные результаты свидетельствуют о циклическом характере деформационного режима, низком уровне локальной сейсмической активности вблизи площадки ПИЛ и наличии пространственно неоднородных, но в целом умеренных современных величин современных движений земной коры. Это создает достаточную фактическую основу для дальнейшего анализа современного деформационного поля как главного индикатора состояния геологической среды. Мониторинг современных движений и деформаций в районе строительства ПИЛ должен рассматриваться как составная часть геоэкологического мониторинга природно-технической системы, а анализ деформационного режима – как один из основных инструментов обоснования безопасности подземной изоляции радиоактивных отходов и безопасного использования подземного пространства.

Таким образом сформулированной **целью** настоящей диссертационной работы является выявление особенностей динамики современных движений геологической среды и оценка времени накопления критических деформаций по данным ГНСС-мониторинга для геоэкологического обоснования безопасности подземной изоляции высокоактивных радиоактивных отходов в районе строительства подземной исследовательской лаборатории в Красноярском крае.

Для достижения поставленной цели, решались следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ геоэкологических и геодинамических факторов обеспечения безопасности подземной изоляции высокоактивных РАО, отечественных и международных нормативных требований к геодинамическим исследованиям и оценку современного состояния геодинамической изученности района строительства ПИЛ.
2. Обосновать методическую основу обработки данных режимных ГНСС-наблюдений, включающую требования к точности измерений, геометрии сети наблюдений, оценить скоростные параметры современных движений земной коры и рассчитать компоненты тензора деформаций.
3. Выявить по данным ГНСС-наблюдений 2012–2024 гг. особенности пространственно-временной организации и динамики полей современных деформаций на Нижне-

Канском геодинамическом полигоне, включая анализ ориентаций главных осей деформаций, деформационные режимы и локализацию аномалий в пределах структурно-тектонического блока, вмещающего ПИЛ.

4. Выполнить оценку аномалий деформаций и градиентов смещений, а также интерпретационное сопоставление полученных результатов с разломно-блоковым строением района и условиями размещения площадки ПИЛ.
5. Разработать и параметризовать модель оценки критических деформаций для объектов подземной изоляции РАО, учитывающую цикличность современных деформационных процессов, пространственную масштабируемость и сценарные параметры активизации интенсивности λ , количества активизаций N и длительности импульса ΔT_A .
6. Оценить среднюю интенсивность активизации современных деформационных процессов на Нижне-Канском геодинамическом полигоне, оценить наблюдаемую интенсивность активизаций и определить интервалы времени накопления критических деформаций на участках площадки ПИЛ.

ГЛАВА 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДЕФОРМАЦИОННОГО АНАЛИЗА ГНСС-ДАННЫХ

2.1 Анализ скоростей современных движений земной коры по данным ГНСС

Методика высокоточных повторных или непрерывных ГНСС-измерений обеспечивает получение двух основных типов данных о современных движениях земной коры: приращений координат, или смещений, и скоростей смещений за заданный временной интервал. Эти параметры формируются на этапе геодезической обработки результатов наблюдений и далее используются как исходная информация для деформационного анализа.

Смещение земной поверхности определяется как изменение координат пункта по результатам двух геодезических измерений, выполненных через интервал времени t . При полевых повторных измерениях такой интервал может составлять от нескольких дней до нескольких лет. При использовании постоянно действующих ГНСС-станций временной шаг задается на этапе обработки данных; как правило, применяется суточный интервал. Смещения земной поверхности являются ключевым видом данных при анализе геодинамической обстановки исследуемого района. Совокупность графиков и карт смещений во времени позволяет оценивать кинематику геодинамического режима, прослеживать развитие, активизацию и затухание опасных геологических процессов. На основе координатных рядов смещения могут быть рассчитаны для любых выбранных эпох измерений. Расчет смещений производится по формуле 2.1 [Шевчук, 2024]:

$$U_t = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}, \quad (2.1)$$

где x, y, z – значения координат в момент времени t ;

Погрешность смещения U_t определяется по формуле 2.2:

$$\sigma_U = \sqrt{\sigma_{t_1}^2 + \sigma_{t_2}^2}, \quad (2.2)$$

где σ_U – погрешность смещения U_t , мм;

σ_{t_1} – СКО определения координат точки в момент времени t_1 , мм;

σ_{t_2} – СКО определения координат точки в момент времени t_2 , мм.

Причем за t_1 можно принять как фиксированную во времени точку, так и плавающую. В случае выбора фиксированной точки отсчета $t_1 = \text{const}$, начальный момент времени остается неизменным и все смещения рассчитываются от него. В случае выбора плавающей точки

отсчета t_1 и t_2 становятся связанными отношением $t_1 = t_2 - \Delta t$. Где Δt – интервал времени, за которое происходит расчет смещения.

Несмотря на то, что смещения формируют значительные массивы данных для анализа за счет выбора различных начальных эпох отсчета, не менее важным параметром является средняя скорость смещений земной поверхности. При проведении мониторинговых наблюдений на геодинимических полигонах обычно применяют среднегодовую скорость современных движений земной коры, поскольку данный параметр выступает более устойчивой интегральной характеристикой деформационного режима. При этом смещения земной поверхности могут содержать выраженную квазипериодическую составляющую, но при этом иметь среднегодовую скорость СДЗК близкую к нулю. Данный момент очень важен в интерпретации данных, т.к. используя только данные о смещениях – можно будет сделать вывод о высокой степени геодинимической активности района, но на самом деле это будут возвратно-поступательные флуктуации структурно-тектонических блоков. При этом их трендовое движение будет незначительным и опасные эндогенные геодинимические процессы в таком районе будут проявляться слабо.

Скорости смещений земной поверхности определяются как среднее смещение за интервал времени t . В отличие от смещений, среднегодовые скорости можно оценить достоверно только имея ряд наблюдений в течение 3-7 лет (в зависимости от степени тектонической активности района). Для расчета среднегодовых скоростей СДЗК существует несколько методов, результаты которых могут существенно отличаться. Эти отличия могут быть обусловлены как различной физической основой методов (что влияет на интерпретацию данных), так и их вычислительной устойчивостью. Рассмотрим основные методы расчета среднегодовых скоростей СДЗК.

В первом случае расчет скорости за интервал времени t происходит на основе данных о смещении за такой же интервал времени. Расчет скорости СДЗК производится по формуле 2.3:

$$V_t = \frac{U_t}{t_2 - t_1}, \quad (2.3)$$

где U_t – приращение координат точки за эпоху от t_1 до t_2 .

t_1 – начальный момент времени, точка отсчета смещения;

t_2 – конечный момент времени, точка завершения эпохи измерения.

Погрешность скорости V_t определяется по формуле 2.4:

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{\sigma_U^2}{t_2 - t_1}}, \quad (2.4)$$

В практике анализа данных, полученных с постоянно действующих ГНСС-станций, применяются методы расчета скоростей, основанные на регрессионном анализе временных рядов. Задача данных методов – подобрать функцию аппроксимации временного ряда смещений с минимальным отклонением от измеренных значений. Такие методы позволяют выявить тренд движений земной поверхности, отфильтровав стохастические смещения станций, вызванные температурными эффектами, постсейсмическими деформациями и другими. Данные стохастические процессы играют роль помех, снижающих точность производимых измерений [Кузьмин, 2014]. Т.к. в настоящей работе не рассматриваются непрерывные ГНСС-наблюдения, кратко остановимся на основных методах регрессионного анализа.

Один из классических методов оценки скоростей движений является фильтрация Калмана ежесуточных измерений координат станций ГНСС [Dong et al., 1998]. На ее основе в работе [Габсатаров, 2015] была предложена методология регрессионного анализа временных рядов ГНСС-наблюдений. В общем виде модель представлена в формуле 2.5 [Горшков и др., 2021]:

$$X_i = X_0 + Vt_i + a_1 \sin(2\pi t_i) + a_2 \cos(2\pi t_i) + a_3 \sin(4\pi t_i) + a_4 \cos(4\pi t_i) + v_i, \quad (2.5)$$

где X_i – текущие значения любой составляющей положения станции (северная, восточная, вертикальная) на момент наблюдения t_i .

X_0 – положение станции на первую дату наблюдения.

a_{1-4} – коэффициенты сезонных вариаций положения станции (a_{1-2} – годовые, a_{3-4} – полугодовые).

v_i – шумовая составляющая (включает в себя множество компонент, подробно изложенных в разделе 2.2.1 работы [Габсатаров, 2015])

V – искомая скорость станции по соответствующей координате, мм/год.

Вектор скорости регрессионной модели оценивается с помощью взвешенного метода наименьших квадратов (МНК). Кроме регрессионного анализа временных рядов, следует выделить группу медианных методов. Медианные методы оценки скоростей станций ГНСС базируются на расчете всех возможных пар приращений координат (смещения с плавающей точкой отчета) и вычисления медианы получившегося массива данных. В работе [Blewitt et al., 2016] рассматриваются два медианных метода, в настоящее время используемых для обработки данных Геодезической лабораторией Невады [Blewitt et al., 2018]. Первый метод оценки скоростей станций ГНСС базируется на оценке трендов временных рядов Тейла-Сена [Theil, 1950; Sen, 1968]:

$$V = \text{median}_{j>i} \left(\frac{x_j - x_i}{t_j - t_i} \right), \quad (2.6)$$

где x_j – начальное значение любой составляющей положения станции (северная, восточная, вертикальная составляющая) на момент наблюдения t_j .

x_i – конечное значение любой составляющей положения станции (северная, восточная, вертикальная) на момент наблюдения t_i .

Классический метод Тейла-Сена таким образом вычисляет медиану между всеми возможными парами временного координатного ряда. В работе [Blewitt et al., 2016] предложен модифицированный медианный метод *MIDAS*, который изменяет методику выбора координатных пар, для повышения устойчивости к стохастическим ошибкам временного ряда. Для этого конечная медиана временного ряда определяется путем ранжирования n пар данных от наименьшего до наибольшего значений. Затем значение скорости определяется как среднее значение двух медиан, для четных n и для нечетных n .

Пары временного координатного ряда выбираются с условием дискретизации в 1 год: $t_j - t_i = 1$ год. Если такой пары не подбирается (т.к. возможны разрывы в рядах измерений), алгоритм *MIDAS* выбирает ближайшую точку измерений к периоду в 1 год.

2.2 Методика деформационного анализа горизонтальных смещений земной поверхности

Смещения и скорости смещений земной могут изменяться, в зависимости от выбранной системы отсчета, интервалов измерений или метода вычисления средней скорости. Поэтому наиболее важная часть анализа СДЗК связана с оценкой их деформационных характеристик, которые являются инвариантными относительно систем координат. Деформация представляет собой относительное изменение геометрических размеров изучаемого объекта и поэтому не зависит от систем отсчета абсолютных измерений [Есиков, 1979; Геодезические..., 1985; Allmendinger et al., 2011]. Далее, рассмотрим математический аппарат вычисления деформаций, используемый в рамках настоящей работы.

Дальнейшее изложение основано на положениях теории малых деформаций и применении метода конечных элементов. Метод представляет собой способ аппроксимации непрерывной функции дискретной моделью, которая представлена множеством значений функции в некотором конечном числе точек ее определения [Есиков, 1979; Геодезические..., 1985]. Суть метода конечных элементов заключается в построении в пределах исследуемого района регулярной сетки узлов, которые образуют простые геометрические фигуры (чаще используются треугольники). Деформации конечного элемента определяются путем

совместного решения системы уравнений перемещений его узлов. При этом, принимается, что деформация в конечном элементе распределена равномерно.

Теория деформаций разработана вне зависимости от свойств материала и ее построения являются чисто геометрическими, и единственными условиями, которые должны выполняться – это условия непрерывности и совместности деформаций. При этом реальные деформации земной поверхности не могут рассматриваться как полностью непрерывные, поскольку в геологической среде присутствуют нарушения сплошности в виде трещин, разрывов и других структурных неоднородностей. Однако при анализе медленных тектонических движений принимается допущение, что в приповерхностной части земной коры новые нарушения сплошности не формируются. Деформация земной поверхности полностью характеризуется векторным полем смещением всех точек исследуемого района.

Следует подчеркнуть, что данное допущение не противоречит принятой в работе разломно-блоковой модели геологической среды. В главе 1 блоковое строение массива рассматривается как структурная основа пространственной неоднородности современного деформационного поля, тогда как в настоящей главе непрерывность понимается как локальная математическая аппроксимация поля смещений внутри расчетного элемента при вычислении тензора малых деформаций. Иными словами, в работе используется не модель абсолютно сплошной среды, а кусочно-непрерывное представление деформаций на масштабе геодезической сети и интервале режимных наблюдений. Разломные нарушения при этом не исключаются из рассмотрения, а интерпретируются как зоны возможной локализации повышенных градиентов смещений и деформационных аномалий. Долговременные геологические смещения по разломам, устанавливаемые по смещению террас, геоморфологических поверхностей и других маркеров, характеризуют интегральный результат развития структуры на значительно больших пространственно-временных масштабах и поэтому не могут непосредственно отождествляться с деформациями, рассчитываемыми по ГНСС-наблюдениям. В пределах рассматриваемого интервала времени и при отсутствии инструментально зафиксированных разрывных смещений на поверхности такой подход является корректным для оценки современного деформационного режима массива

Положим, что в результате ГНСС-наблюдений были получены все необходимые характеристики векторов движений геодезических пунктов. Рассмотрим математический аппарат вычисления деформаций земной поверхности в двумерном пространстве. Пусть x_i, y_i – начальные координаты i -го геодезического пункта. Тогда перемещения пункта можно задать в виде линейных зависимостей:

$$\begin{aligned} u &= \varepsilon_{11}x_i + \varepsilon_{12}y_i + a \\ v &= \varepsilon_{21}x_i + \varepsilon_{22}y_i + b' \end{aligned} \quad (2.7)$$

Уравнение 2.7 задает линейную связь между компонентами двух векторов: радиус-вектора $\bar{R}(x, y)$ i -го геодезического пункта и соответствующего ему вектора смещения $\bar{r}(u, v)$ (рис. 3.5). Из уравнений 2.7 видно, что для определения коэффициентов ε_{ij} необходимо иметь минимум 6 уравнений. Поскольку для одного пункта можно составить только 2 уравнения на плоскости, для определения всех компонент деформаций необходима геодезическая сеть, состоящая минимум из 3 пунктов (рис. 2.1). В этом случае тензор деформации определяется не для точки, а для центра тяжести конечного элемента, образованного тремя геодезическими пунктами. Из решения системы уравнение 2.8 определяется система четырех коэффициентов, которую можно представить в виде матрицы:

$$[T_{ij}] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} \end{bmatrix}, \quad (2.8)$$

Матрица T_{ij} является тензором частных производных смещений по осям координат. Но так как смещения u и v сами определяются через коэффициенты ε_{ij} , то полученный таким образом тензор необходимо относить к центру тяжести геометрической фигуры (конечного элемента), составленной этими пунктами [Есиков, 1991]. Таким образом матрица T_{ij} – называется тензором деформаций, а его компоненты ε_{ij} соответственно компонентами тензора деформаций.

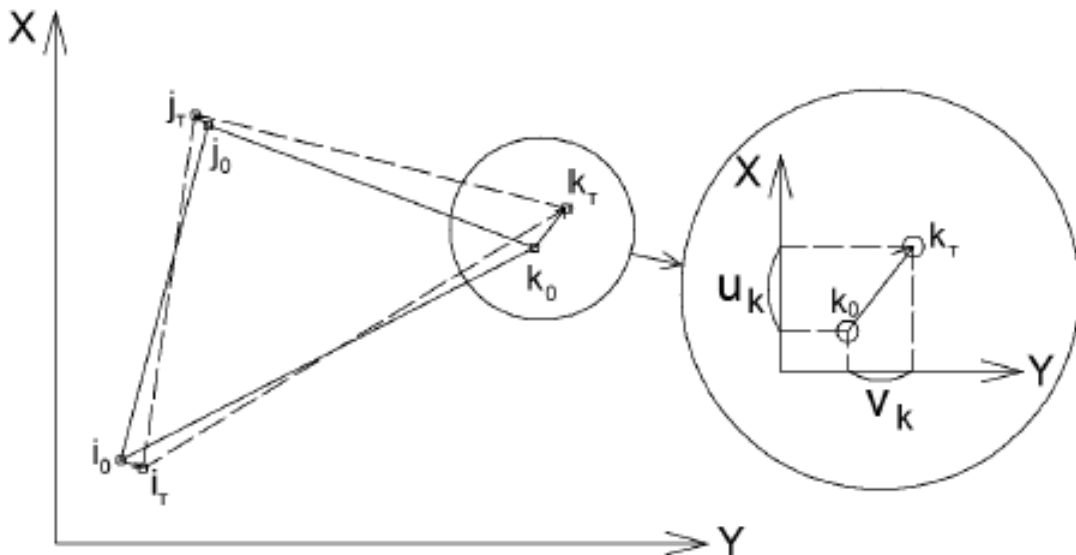


Рисунок 2.1 – Зависимость между радиус-вектором пункта сети и соответствующим вектором смещения

Согласно принципу Коши-Гемгольца, любое движение деформируемой среды в любой момент времени можно описать наложением параллельного переноса, определяемого

вектором $\bar{V}\Delta t$ (\bar{V} – вектор скорости), вращательного движения и чистой деформации. Таким образом тензор T_{ij} не является симметричным. Выделим из T_{ij} симметричную и кососимметричную части:

$$[T_{ij}] = [a_{ij} + \omega_{ij}], \quad (2.9)$$

где

$$a_{ij} = \frac{1}{2}(\varepsilon_{ij} + \varepsilon_{ji}); \quad \omega_{ij} = \frac{1}{2}(\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ji}), \quad (2.10)$$

представляют собой компоненты симметричного кососимметричного тензоров соответственно. Применяя 2.10 к 2.8 [Есиков, 1991], получим:

$$[a_{ij}] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \frac{\varepsilon_{12} + \varepsilon_{21}}{2} \\ \frac{\varepsilon_{12} + \varepsilon_{21}}{2} & \varepsilon_{22} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$[\omega_{ij}] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\varepsilon_{12} - \varepsilon_{21}}{2} \\ \frac{\varepsilon_{12} - \varepsilon_{21}}{2} & 0 \end{bmatrix}'$$

Чистая деформация (изменение длин и углов) определяется только симметричным тензором a_{ij} , а кососимметричный тензор ω_{ij} не влияет на изменение метричных свойств области, а определяет ее вращение как абсолютно твердого тела [Есиков, 1991]. Аналогично значения компонент двухмерного тензора деформации определяются как частные производные смещений по координатам:

$$\varepsilon_{11} = \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\varepsilon_{12} = \varepsilon_{21} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad (2.12)$$

$$\omega = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

Определим главные значения симметричного тензора a_{ij} , которые будут являться главными значениями деформаций. Для этого нужно решить характеристическое уравнение относительно E :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} - E & \frac{\varepsilon_{12} + \varepsilon_{21}}{2} \\ \frac{\varepsilon_{12} + \varepsilon_{21}}{2} & \varepsilon_{22} - E \end{bmatrix} = 0, \quad (2.13)$$

Решая уравнение 2.13 и обозначая корни уравнения E_1 и E_2 , получим:

$$E_1 = \frac{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}}{2} + \sqrt{\frac{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{12} + \varepsilon_{21})^2}{4}}, \quad (2.14)$$

$$E_2 = \frac{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}}{2} - \sqrt{\frac{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{12} + \varepsilon_{21})^2}{4}}, \quad (2.15)$$

где E_1 – максимальное растяжение, E_2 – минимальное растяжение.

Ориентация главных осей чистой деформации определяется углами φ_1 и φ_2 соответственно, которые откладываются от начальной оси координат:

$$\varphi_1 = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(\frac{\varepsilon_{12} + \varepsilon_{21}}{\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}} \right), \quad (2.16)$$

$$\varphi_2 = \varphi_1 + 90^\circ$$

По значениям тензора деформаций T_{ij} рассчитывается деформация дилатации (показывающая изменение площади геометрической фигуры, формула 3.17) и деформация полного сдвига (формула 3.18):

$$\Delta = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}, \quad (2.17)$$

$$\gamma_m = \sqrt{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{12} + \varepsilon_{21})^2}, \quad (2.18)$$

Вращение конечного элемента рассчитывается исходя из коссимметричного тензора:

$$\omega = \frac{1}{2} (\varepsilon_{12} - \varepsilon_{21}), \quad (2.19)$$

Величины и ориентация осей главных деформаций позволяет судить о типе деформированного состояния, тем самым позволяя интерпретировать современное напряженное состояние исследуемого района. На рис. 2.2 представлены основные типы деформированного состояния:

- Горизонтальное одноосное сжатие: $E_1 = 0, E_2 < 0$ (рис. 2.2а);
- Горизонтальное одноосное растяжение $E_1 > 0, E_2 = 0$ (рис. 2.2б);
- Горизонтальное двухосное растяжение $E_1 > 0, E_2 > 0$ (рис. 2.2в);
- Горизонтальное растяжение со сжатием $E_1 < 0, E_2 < 0$ (рис. 2.2г);
- Горизонтальное двухосное сжатие $E_1 < 0, E_2 < 0$ (рис. 2.2д).

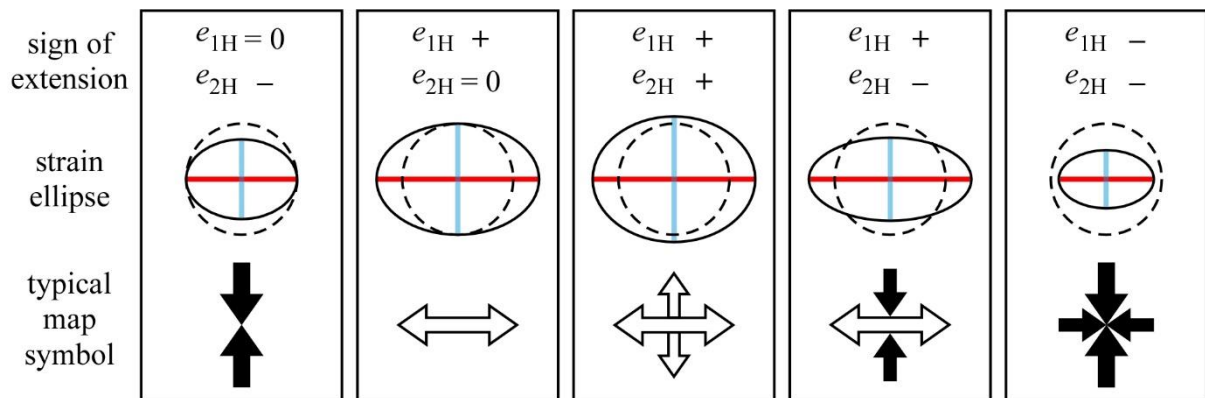


Рисунок 2.2 – Основные типы деформированного состояния

Для реализации вычислений по методике представленной выше разработана библиотека, предназначенная для деформационного анализа результатов ГНСС-измерений и их визуализации в среде QGIS 3 [Маневич и др., 2021; 2023]. Представленная библиотека PyGeoStrain [Manevich et al., 2023] включает в себя набор подпрограмм для деформационного анализа, набор созданных стилей QGIS 3 для визуализации параметров деформаций, набор исходных тестовых данных и тестовый ГИС-проект. Применение библиотеки PyGeoStrain является адекватной заменой программам аналогам в виду открытого доступа к исходному коду, простой реализации алгоритмов расчета параметров деформаций и при этом возможности интеграции с QGIS 3.

2.3 Характеристика сети и методика ГНСС-измерений

Принцип измерений координат геодезических пунктов построен на регистрации ГНСС-приемником сигналов от нескольких искусственных спутников Земли и вычислении точного положения антенны ГНСС-приемника, установленного на пункте относительно спутников. Подробно методика ГНСС-измерений на геодинамическом полигоне ПИЛ в Красноярском крае приведена в работе [Кафтан и др., 2019; Кафтан и Татаринов, 2021]. Практика показала, что квалифицированное использование средств ГНСС позволяет достичь точности измерения плановых смещений земной поверхности до 1-3 мм, а высотных до 3-5 мм [Кафтан и др., 2020; 2023; Шевчук и др., 2024].

Методика сбора и высокоточной обработки наблюдений, а также программа наблюдений за СДЗК в районе Нижне-Канского массива разработана на базе Лаборатории геодинамики Геофизического центра РАН и детально описана в работах [Татаринов, 2006; Татаринов и др., 2018; Кафтан и др., 2019; Гвишиани и др., 2020; 2022]. Ниже кратко приведены основные ее положения.

В тектонически слабоактивном районе для выполнения требований нормативов необходима субсантиметровая точность ГНСС-измерений. Это важнейшая задача, решение которой осложняется рядом особенностей, связанных технологией полевых работ и физико-географическими условиями района [Серебрякова и др., 2006; Шевчук и др., 2024]. Достижение наивысшей точности ГНСС-измерений достигается путем учета ряда факторов, которые можно классифицировать на внутренние и внешние. Среди внутренних факторов следует выделить характеристики используемого приемника, которые включают стабильность внутреннего генератора, количество каналов приема сигнала, влияющие на одновременную обработку сигналов от большего числа спутников, а также точность определения фазового

центра ГНСС-антенны, поскольку вариации фазового центра отражают компоненты ее калибровки.

К внешним факторам относятся ионосферные и тропосферные возмущения, вызывающие задержку сигнала. Экранирование небесной сферы разнообразными препятствиями играет также значительную роль в снижении точности. Продолжительность синхронной регистрации сигналов ГНСС группой приборов и длина векторов между точками измерений также оказывают существенное влияние на точность измерений. Для учета влияния внешних факторов на точность ГНСС-измерений используются специализированные модели: ионосферные (IACG, CORG, WHRG, JPRG, GPSG, GALG, BDSG, GLOG) и тропосферные (UNB3m, GPT2w, ESA-Site). Часть факторов, снижающих точность, остается за пределами возможностей коррекции. Это параметры ГНСС-измерений – физические условия радиопомех на пункте измерений, расстояния между точками измерений и продолжительность синхронизированных ГНСС-измерений. Для снижения влияния указанных факторов на погрешность измерений проводились следующие мероприятия.

1. Развитие структуры геодезической сети. До 2021 г. геометрия построения сети была не оптимальной, поэтому при расширении геодинамического полигона в 2021-22 г. [Маневич и др., 2021; 2022]. структура сети была улучшена путем увеличения количества равнобедренных треугольников, что видно при сравнении структуры сетей на рис.1.7.

2. Основным контролируемым источником внешних ошибок, является обеспечение условий устойчивого прохождения радиосигнала от спутников к приемнику. В условиях сильной застроенности это обеспечивается очисткой от деревьев участка вокруг геодезического репера [Шевчук и др., 2024]. С начала эксплуатации геодинамической сети в 2010 г. такие работы не проводились, поэтому в 2022 г. была выполнена вырубка деревьев для обеспечения условий прохождения радиосигнала. На рисунке 2.3 приведены графики соотношения сигнал-шум вовремя ГНСС-измерений на пункте 1219 до и после очистки растительного покрова деревьев (в 2021 и 2022 г.). На графиках видно улучшение условий после восстановительных мероприятий.

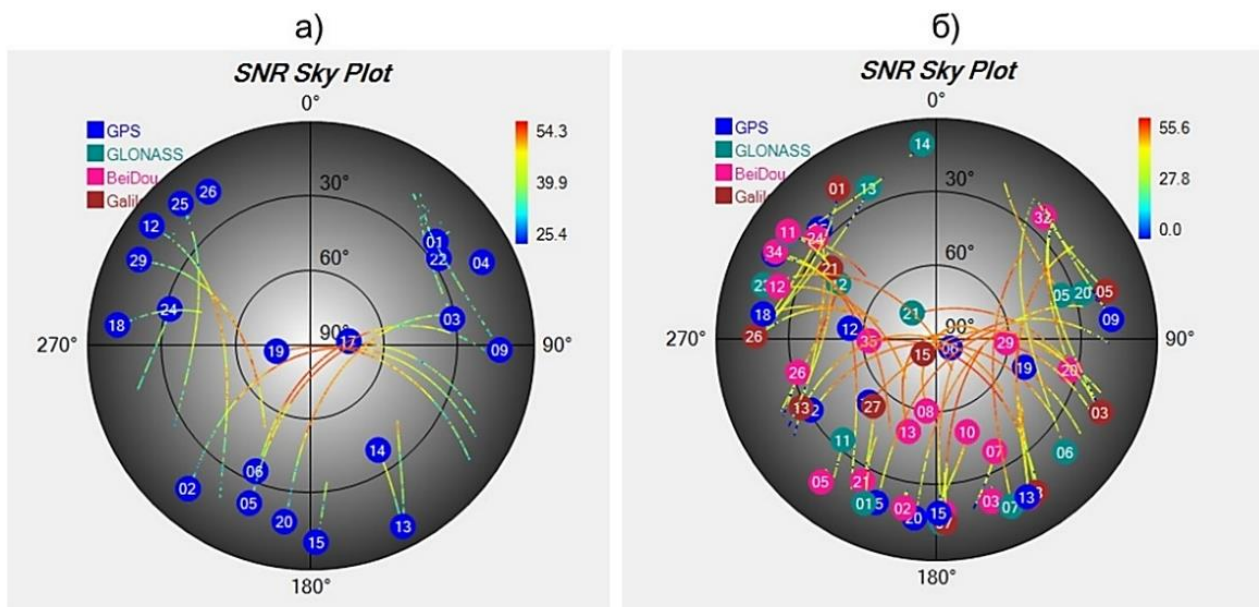


Рисунок 2.3 – Графики соотношения сигнал-шум ГНСС-измерений на пункте 1219: а – в августе 2021 года до очистки растительного покрова; б – в августе 2022 года после очистки растительного покрова

3. Применение оригинальной методики полевого контроля точности используемой аппаратуры ГНСС [Кафтан и др., 2020; 2023] позволяет обеспечить регистрацию движений с субсантиметровой точностью. Одна из составляющих методики заключается в проведении контрольных наблюдений на тестовой базисной линии (рис. 2.4), расположенной непосредственно в физико-географических условиях данного района, всеми комплектами приборов, которые использовались в данной эпохе наблюдений.

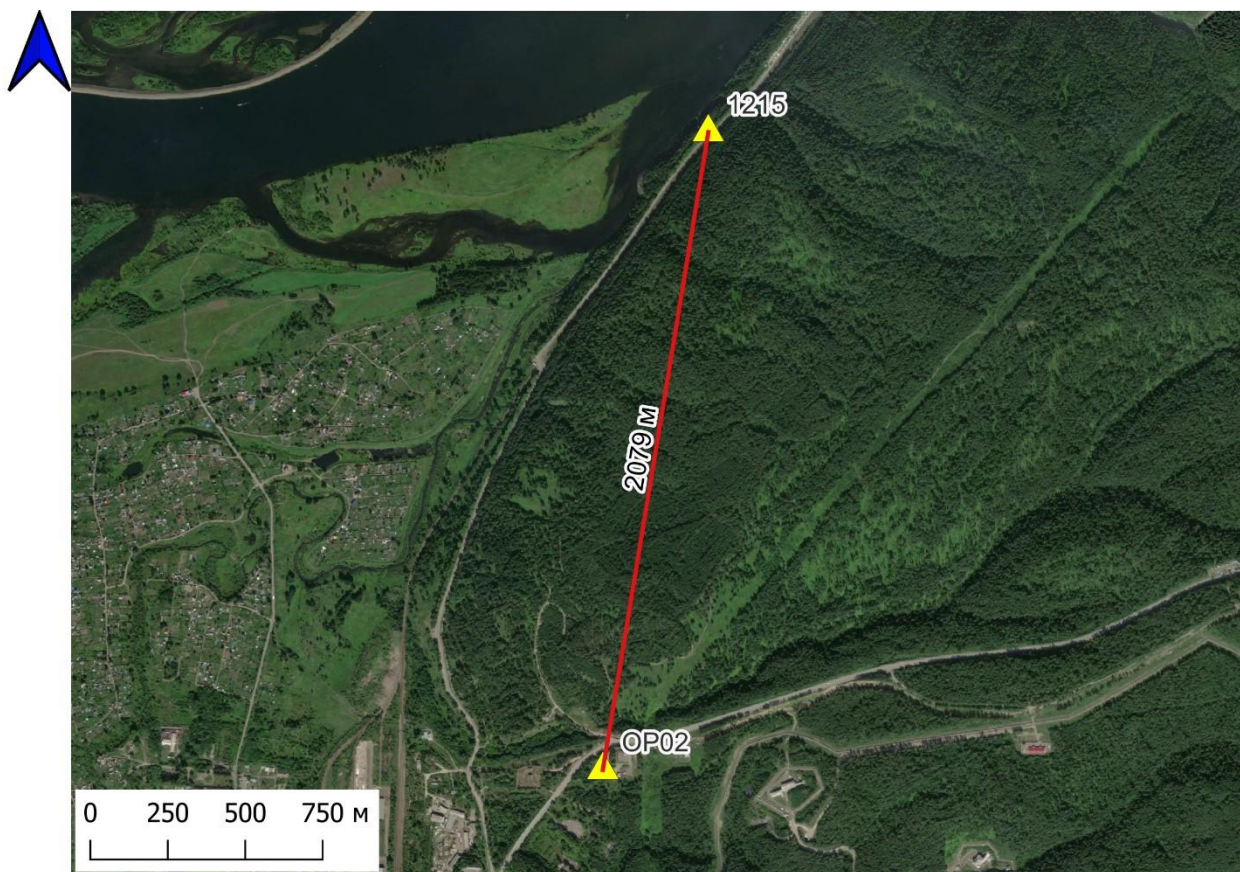


Рисунок 2.4 – Линия, использованная в разработанной методике полевого контроля [Кафтан и др., 2020; 2023]

4. Необходимо акцентировать внимание на важности соблюдения методики выполнения ГНСС-измерений. На рис. 2.5–2.6 приведены графики зависимости СКО в плане и по высоте от времени измерений в характерных физико-географических условиях полигона. Вектор 1214-1216 эталонный, пункты расположены в идеальных условиях ГНСС-наблюдений – на возвышенностях при условии абсолютно открытого неба. Вектор СК2101-СК2103 представлен скальными центрами, которые расположены на местности, где присутствуют препятствия для прохождения радиосигнала в виде скал. Вектор 1219-OP02 в 2021 году – это пара пунктов грунтового типа, в условиях залесенной местности. Для этих трех отличающихся по условиям наблюдений векторов была выполнена обработка результатов для различных по продолжительности интервалов наблюдений от 1 до 6 ч.

Из графиков видно, что после 4-х часов синхронной записи СКО перестает существенно изменяться, вне зависимости от условий, в которых находятся пункты ГНСС. Из графиков на рисунках 2.5–2.6 видно, что на части пунктов сети невозможно получить эталонные СКО измерений до 2-3-х мм, т.к. в таёжных условиях для этого требуется значительная вырубка деревьев вокруг пунктов в радиусе более 100 м. Однако выполненные мероприятия по очистке растительного покрова и строгое соблюдение методики ГНСС-

измерений (с синхронной продолжительностью записи более 4-х часов) позволяют вывести уровень ошибок на приемлемый уровень [Кафтан и др., 2023; Шевчук и др., 2024].

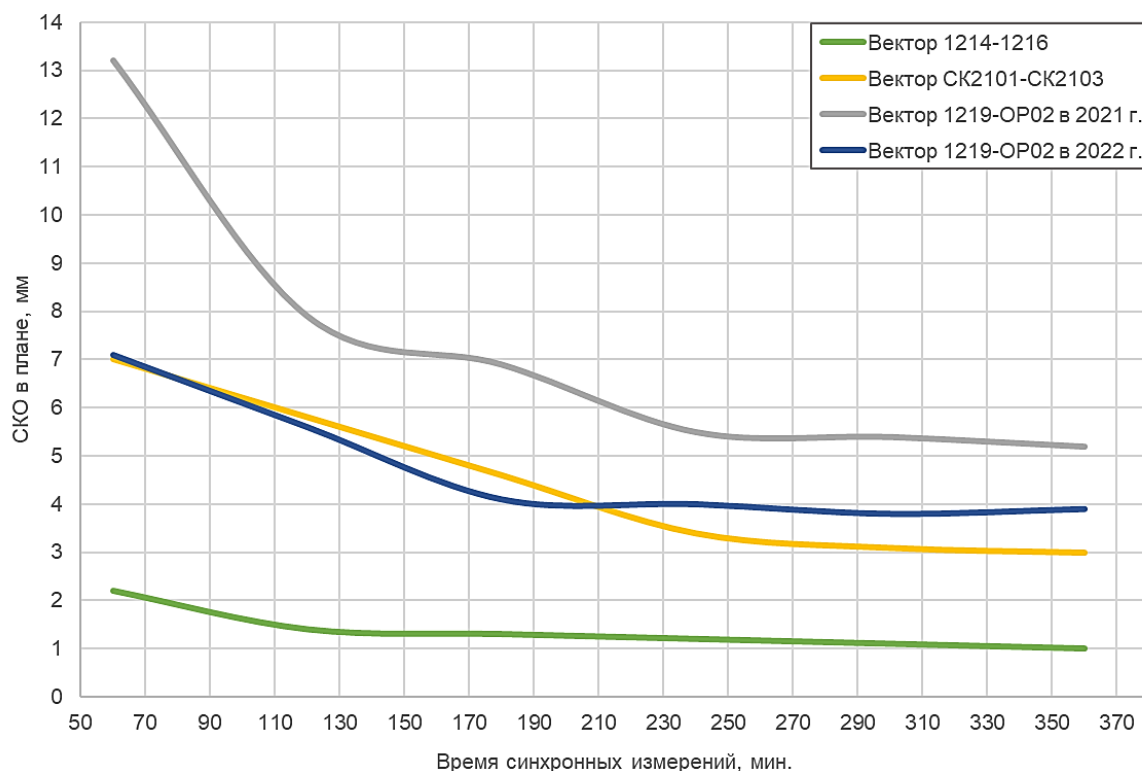


Рисунок 2.5 – График зависимости СКО в плане от времени ГНСС-измерений

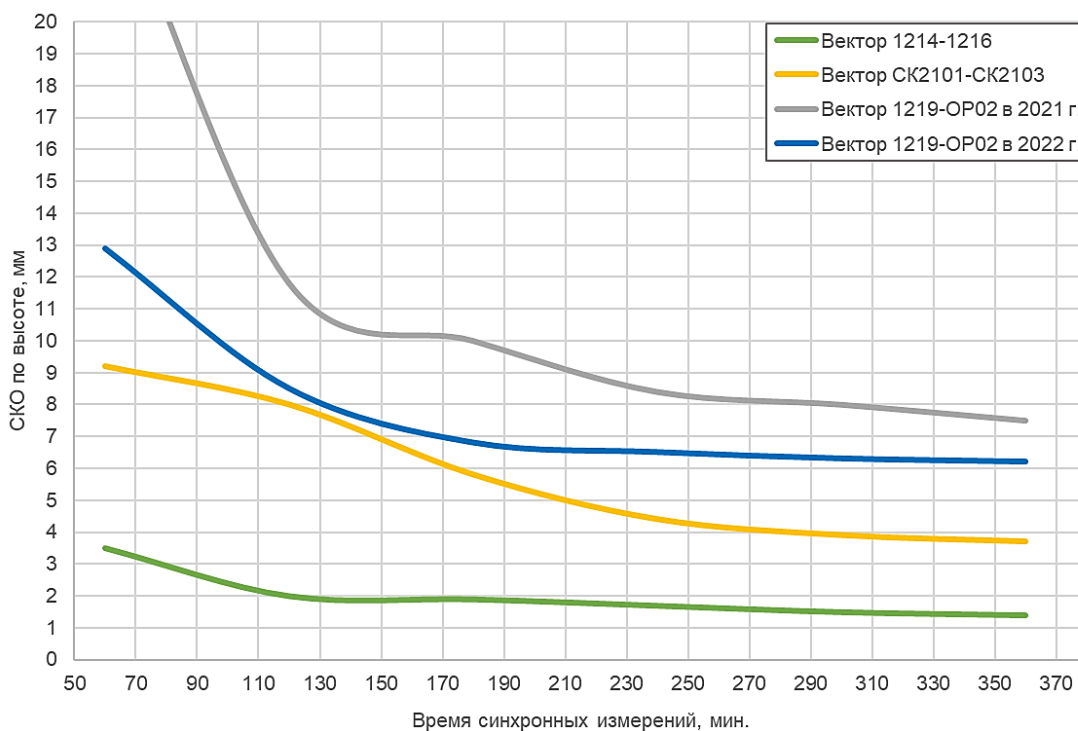


Рисунок 2.6 – График зависимости СКО по высоте от времени ГНСС-измерений

2.4 Выводы

Во второй главе сформирована методическая основа исследования современных деформаций по данным ГНСС-наблюдений. Показано, что при обработке данных ГНСС-наблюдений исходными параметрами являются смещения и скорости смещений геодезических пунктов, тогда как для последующей интерпретации деформационного режима массива используются стандартные инвариантные характеристики деформационного поля, рассчитываемые в рамках классического деформационного анализа. Это позволяет перейти от координатных рядов к параметрам, непосредственно применяемым в дальнейшей части работы: главным деформациям, дилатации, полному сдвигу и ориентации главных осей деформирования. Принятый подход обеспечивает сопоставимость результатов в пространстве и во времени и позволяет интерпретировать поле деформаций не только как набор локальных геодезических величин, но и как основу для выделения деформационных режимов, пространственных градиентов и аномальных зон.

Показано, что для тектонически слабоактивного района принципиальным условием достоверности результатов является обеспечение субсантиметровой точности полевых измерений. Требуемый уровень погрешности измерений достигается за счет сочетания нескольких факторов: рациональной геометрии сети, полевого контроля точности аппаратуры, учета условий прохождения радиосигнала, очистки растительного покрова вокруг пунктов и соблюдения продолжительности синхронных наблюдений не менее 4 часов. При этих условиях ошибки измерений выводятся на приемлемый уровень для последующего деформационного анализа.

Таким образом, во второй главе обоснован и описан воспроизводимый комплекс методов обработки и интерпретации ГНСС-данных, достаточный для решения задач геоэкологического мониторинга состояния массива в районе строительства ПИЛ и для перехода от наблюдаемых смещений к параметрам современного деформационного режима.

ГЛАВА 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА СДЗК НА НИЖНЕ-КАНСКОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ

3.1 Скорости современных движений земной коры по данным ГНСС за 2012–2024 гг.

В качестве исходных данных использованы результаты ГНСС-наблюдений на геодинамическом полигоне района строительства ПИЛ в 2012-2024 годы [Кафтан и др., 2019; Татаринов и др., 2018; Гвишиани и др., 2020; Гвишиани и др., 2022; Татаринов и др., 2022] (рис. 3.1). Измерительная сеть закладывалась таким образом что бы пересекать все основные местные тектонические нарушения, захватывать территорию строительной площадки и региональные тектонические структуры [Маневич и др., 2021; 2022]. В результате обработки результатов геодезических измерений по стратегии, приведенной в разделе 3.3 получены временные ряды смещений (рис. 3.2) и скорости смещений для 27 геодезических пунктов (табл. 3.1).

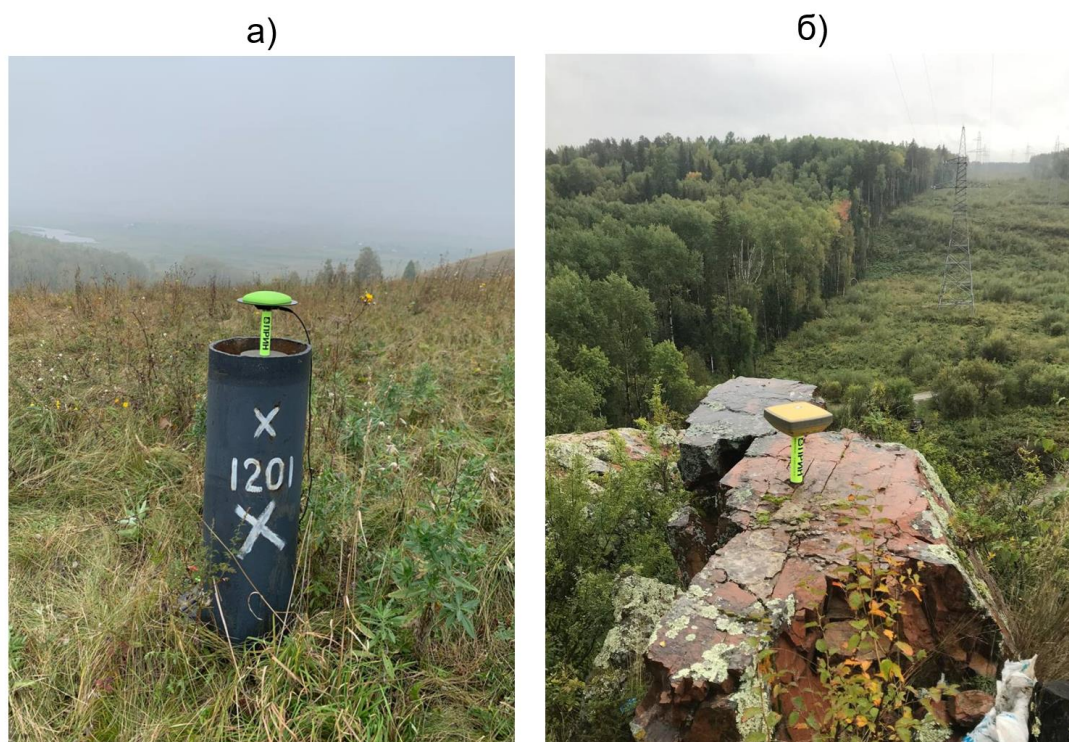


Рисунок 3.1 – Процесс ГНСС-измерений на геодинамическом полигоне: а – грунтовый трубчатый центр, пункт 1201; б – скальный геодезический центр, пункт SK2106

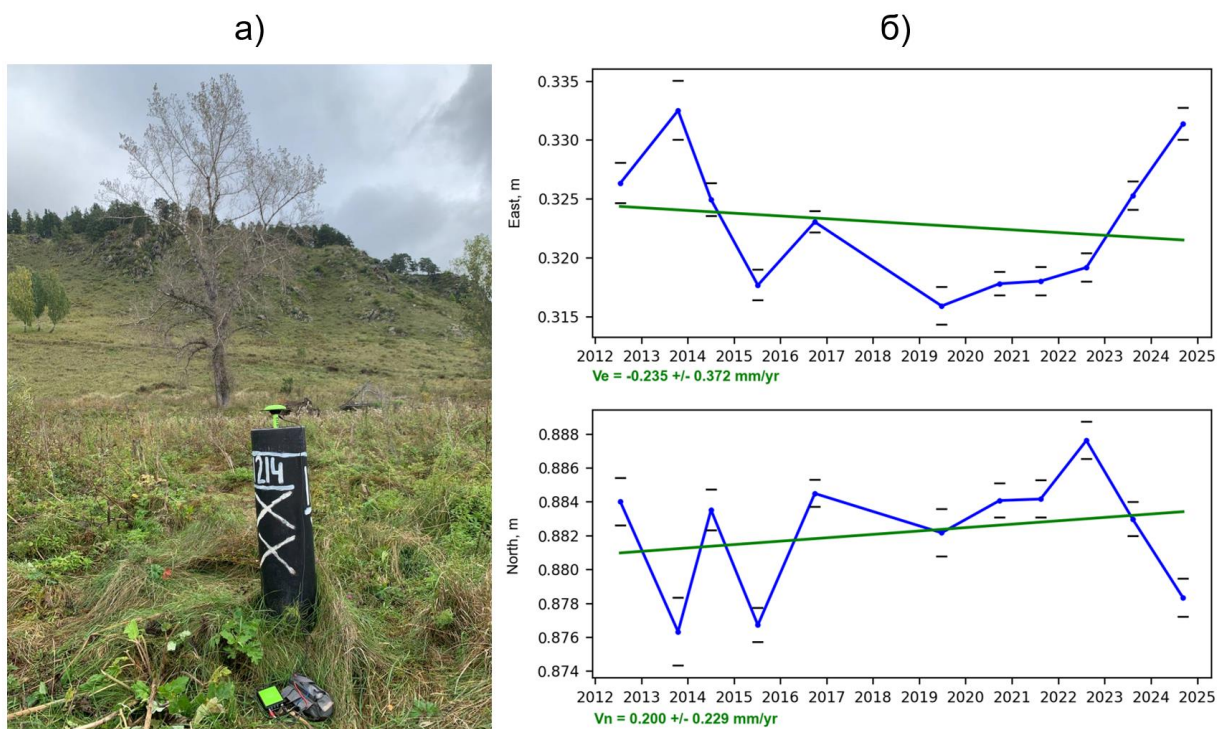


Рисунок 3.2 – Пример временного ряда смещений (пункт 1214): а – общий вид пункта; б – сформированные временные ряды смещений на восток и на север за период измерений

Таблица 3.1 – Скорости горизонтальных СДЗК в направлении восток V_E и север V_N за 2012–2024 гг. и СКО их определения σ_E и σ_N соответственно

№	Пункт	Лет измерений	V_E , мм/год	V_N , мм/год	σ_E , мм	σ_N , мм
1	1201	12	0.35	0.32	0.21	0.48
2	1202	12	0.35	0.67	0.19	0.29
3	1204	4	-2.52	0.47	0.89	0.39
4	1205	12	-0.67	-0.62	0.27	0.37
5	1206	12	-0.50	-1.17	0.17	0.35
6	1207	12	1.04	1.99	0.21	0.24
7	1209	12	-0.07	1.33	0.24	0.24
8	1211	11	0.60	-0.57	0.44	0.42
9	1212	12	-1.02	-0.47	0.25	0.41
10	1213	4	-2.34	-1.10	0.43	1.64
11	1214	12	-0.23	0.20	0.37	0.23
12	1215	12	1.17	0.01	0.36	0.16
13	1216	12	0.24	0.39	0.38	0.20
14	1219	12	-0.49	-1.08	0.21	0.44

15	1220	12	0.65	0.72	0.13	0.41
16	1223	11	-0.13	-2.79	0.24	0.60
17	1301	9	-0.68	0.53	0.04	0.20
18	1401	10	-0.44	0.02	0.37	0.44
19	1402	10	-0.70	-0.75	0.18	0.66
20	LP04	12	-0.36	-1.66	0.21	0.25
21	LP05	12	0.19	0.10	0.25	0.20
22	LP06	12	-1.04	-0.10	0.32	0.29
23	LP07	12	0.45	0.82	0.20	0.30
24	LP08	4	0.48	-1.07	0.62	0.64
25	LP09	4	2.97	0.57	1.22	0.57
26	OP02	12	0.18	0.47	0.21	0.18
27	OP03	12	0.33	0.46	0.13	0.18

На рисунке 3.3 приведена схема векторов скоростей пунктов, для которых выполнена оценка скоростей горизонтальных СДЗК по формулами из раздела 2.1 за период 2012–2024 гг. Пространственное распределение скоростей демонстрирует незначительные колебания значений, не формируя четко выраженной картины направленных или систематических скоростей смещений. В течение анализируемого периода средние годовые скорости смещений на отдельных пунктах варьировались в пределах от 1 до 3 мм/год.

Максимальные значения суммарных смещений за весь период наблюдений составляли порядка 30–35 мм, что соответствует среднегодовым скоростям порядка 3 мм/год. При этом направления и величины смещений на разных этапах демонстрировали неустойчивый характер, с периодическими изменениями знака деформаций. Подобная временная изменчивость смещений носит локальный и квазистохастический характер, что характерно для районов с низкой геодинамической активностью. Выполненные оценки возможных накопленных смещений на длительных временных интервалах, с применением корректирующих масштабных коэффициентов, свидетельствуют о крайне малой величине потенциальных изменений. За условный период в 10 тысяч лет смещения могут составить не более нескольких десятков сантиметров, что укладывается в диапазон фоновых геодинамических процессов и не свидетельствует о наличии активной тектонической перестройки на рассматриваемой территории.

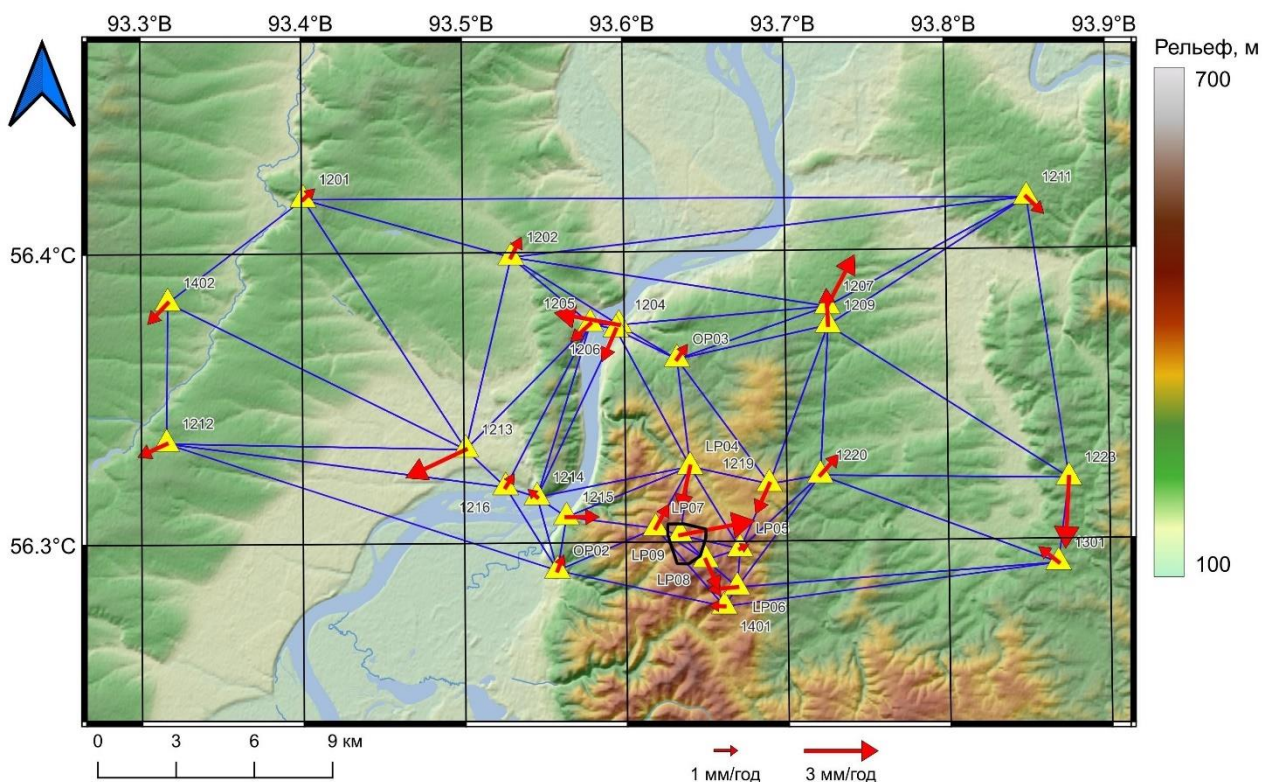


Рисунок 3.3 – Векторы скоростей смещений, установленные по результатам ГНСС-наблюдений за период с 2012 по 2024 гг.

3.2 Пространственно-временная изменчивость полей деформаций

На рисунке 3.4 показана скорость изменения компоненты ϵ_{xy} тензора деформаций по ГНСС-данным с 2012 по 2024 годы. Выделяются следующие особенности. В узлах сочленения Атамановского, Канско-Атамановского и местных разломов ярко выражена зона с максимальной скоростью сжатия -3.5×10^{-6} 1/год. Немного меньшее значение -1.5×10^{-6} 1/год в узлах сочленения Атамановского и Студеного разломов. Здесь же имеется небольшая зона растягивающих деформаций (красный цвет). Фактически на строительной площадке ПИЛ в районе Безымянного разлома наблюдаются деформации растяжения (2.5×10^{-6} 1/год), а в юго-восточной части значения деформаций сжатия достигают (-1.0×10^{-6} 1/год).

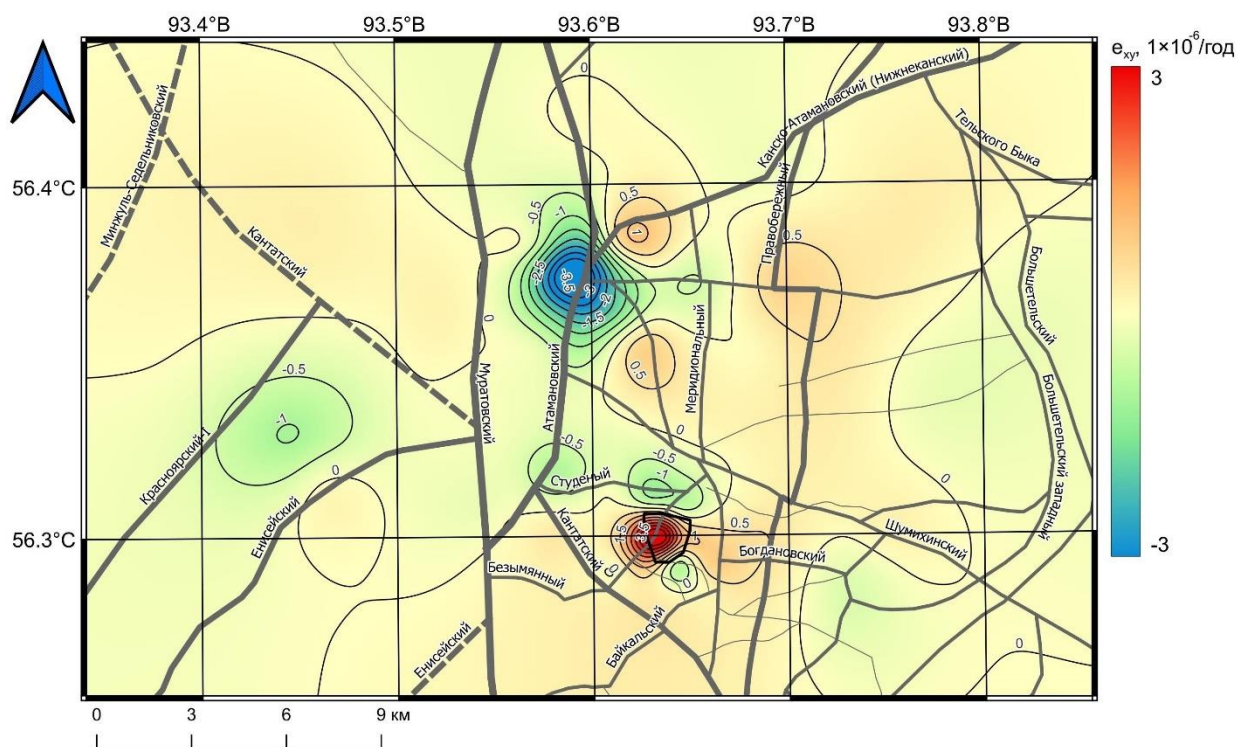


Рисунок 3.4 – Распределение скорости изменения $\epsilon_{ху}$ за 2012–2024 гг.

На рисунке 3.5 приведены рассчитанные результаты изменения ориентации осей главных деформаций по эпохам измерений с 2012-2024 гг. Показаны изменения относительно нулевой эпохи 2012 года. Видно, что динамика изменения ориентации осей главных деформаций неравномерно развивается во времени и носит псевдоциклический характер. Таким образом, по результатам анализа рис. 3.5 устанавливается первая особенность современного деформационного режима района: ориентация главных осей деформаций во времени изменяется не монотонно, а псевдоциклически, через последовательную переориентацию осей и смену локальных деформационных режимов. При этом наиболее выраженные перестройки приурочены к центральной части полигона и к зонам влияния крупных разломных нарушений, что указывает на пространственно неоднородный характер деформационного процесса в пределах структурно-тектонического блока, вмещающего площадку ПИЛ.

В 2022 г. была зафиксирована перестройка поля деформаций с частичным изменением ориентации осей: отмечается усиление локальных сдвиговых компонент и перераспределение максимальных осей в центральной части участка. В 2023 г. наблюдается дальнейшая переориентация главных деформаций, при этом максимальные оси приобретают более выраженную северо-западную ориентировку, а минимальные – близкую к северо-восточной.

И, наконец, в 2024 г. происходит наибольшая трансформация полей деформаций: ориентация осей становится мозаичной, отмечается сложное сочетание зон с различной

направленностью. Особенно выделяются области, приуроченные к тектоническим разломам, где проявляется смена локальных осей главных деформаций. На рисунке 3.6 показаны карты дилатации земной поверхности, характеризующие динамику изменения типа напряженного состояния верхней части земной коры (сжатие-растяжение).

На верхних трех картинках видно, что район в период 2012–2015 гг. поле дилатации разделяется на две зоны: область сжатия в восточной части участка, отображенную синим цветом, и область растяжения в западной части, показанную красным цветом. Граница между ними приближенно трассируется вдоль главных разрывных нарушений – Муратовского и Атамановского разломов. Абсолютные значения дилатации находятся в интервале $(-16 \times 10^{-6}) \div (+16 \times 10^{-6})$. При этом в середине этого временного интервала происходила некоторая перестройка структуры полей деформаций (и соответственно, напряжений), но к 2015 г. она фактически вернулась к эпохе 2012 г. Из анализа распределения дилатации следует вторая особенность: на масштабе всего полигона поле сжатия–растяжения характеризуется возвратно-компенсационной перестройкой. Это выражается в том, что после промежуточной реорганизации деформационного поля его крупномасштабная структура на отдельных интервалах наблюдений возвращается к близкому исходному состоянию. Следовательно, наблюдаемые локальные аномалии не формируют устойчивого однонаправленного тренда на всем полигоне, а в значительной степени компенсируются на более длительных интервалах времени.

По данным ранее проведенных исследований [Шевчук, 2024] установлено, что в северо-северо-восточной части участка фиксируется крупная область сжатия, приуроченная к узлу сочленения Канско-Атамановского (Нижне-Канского) и Правобережного разломов. В работе [Шевчук, 2024] указывается – «В ее пределах получено максимальное по модулю значение сжатия, составляющее 12×10^{-6} . На противоположном берегу, в северо-северо-западной части территории, выделяется обширная зона растяжения, пространственно связанная с Муратовским, Кантатским, Минжиль-Седелниковским и Красноярским I разломами. Центр данной области расположен в тектоническом узле Кантатского и Красноярского I разломов. Одновременно на противоположном борту Красноярского I разлома формируется зона сжатия с величиной до -8×10^{-6} ».

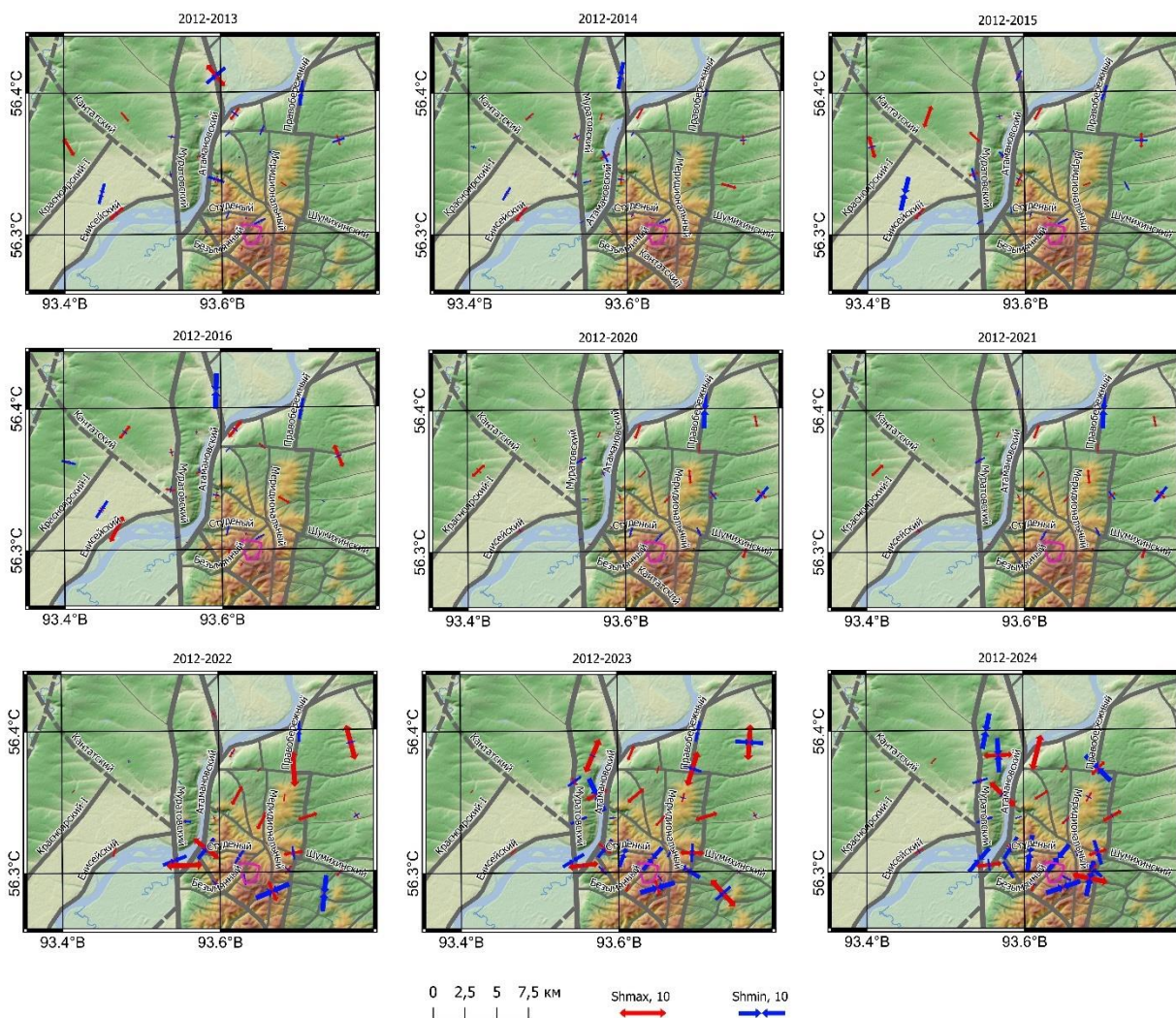


Рисунок 3.5 – Главные деформации и оси их ориентации по результатам ГНСС-наблюдений пунктов по эпохам измерений с 2012-2024 гг. Серые линии – тектонические разломы

Для эпохи 2012–2014 гг. в работе [Шевчук, 2024] отмечается – «наибольшие значения дилатационного растяжения связаны с Енисейским и Правобережным разломами. Выраженная деформационная активность также проявляется в области тектонического узла Муратовского и Атамановского разломов, где наблюдается смена режимов сжатия и растяжения. По сравнению с предыдущей эпохой измерений крупная область растяжения в северо-западной части территории исчезает, тогда как в восточной части формируется новая зона растяжения. В целом для рассматриваемой территории характерны малые значения площадных деформаций: максимальные величины по модулю не превышают 6×10^{-6} ».

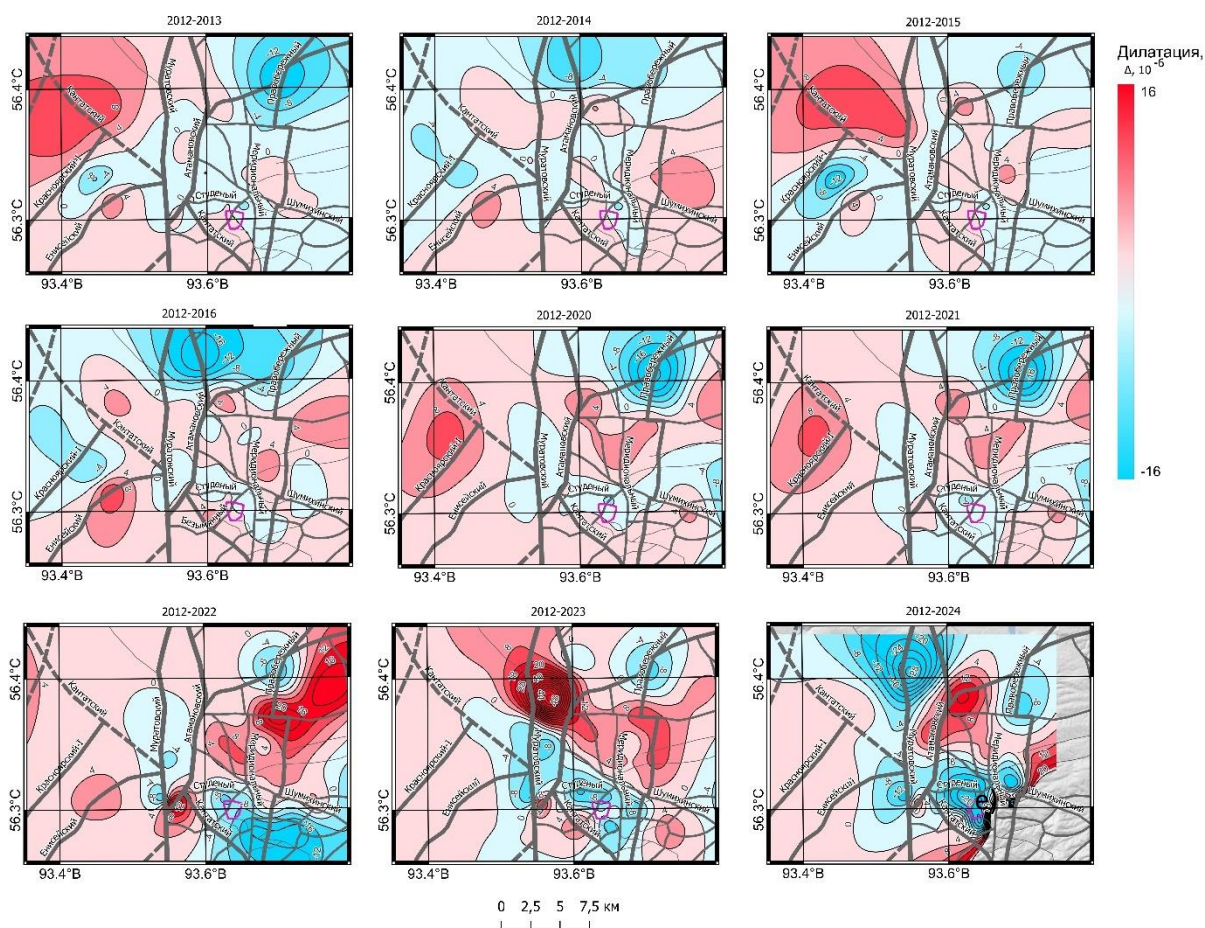


Рисунок 3.6 – Динамика пространственного распределения дилатационных деформаций на территории геодинамического полигона за период 2012–2024 гг. Серые линии – тектонические разломы

Далее, на рисунках среднего ряда, для периода 2016–2022 гг. наблюдается относительно сходная структура поля дилатации, однако она отличается от распределения, характерного для первого периода. В 2016 г. пространственная картина дилатационных деформаций с незначительными различиями повторяет эпоху 2012–2014 гг.; следовательно, продолжительность цикла смены режима сжатия–растяжения составила приблизительно 2 года. В 2020–2021 гг. отмечается распределение, близкое к эпохе 2012–2013 гг. При этом зоны отрицательных значений дилатации практически сохраняют свое пространственное положение.

В 2022 г. на большей части территории зафиксированы высокие положительные значения дилатации, достигающие по модулю $10 \div 12 \times 10^{-6}$, что отражает процесс активного растяжения. Вероятно, растяжение должно характеризоваться и положительными значениями вертикальных движений земной поверхности. Особенно ярко аномальные зоны растяжения (красный цвет) видны у Правобережного и Муратовского разломов, а также в узле

пересечения Красноярского I и Кантатского разломов. Одновременно в южной части полигона прослеживаются изолированные области локального сжатия, однако их амплитуда существенно уступает зонам растяжения.

В 2023 г. отмечено значительное изменение дилатационных процессов, которые на карте представлены аномально высокими значениями деформаций растяжения (до 16×10^{-6}), концентрирующихся в северо-восточном секторе полигона вблизи узла Канско-Атамановского и Правобережного разломов. На фоне общего преобладания растяжения заметны компактные зоны сжатия, локализованные вдоль Красноярского I и Минжульт-Седельниковского разломов. При этом в районе расположения самой площадки ПИЛ зарегистрированы деформации дилатации сжатия (синий цвет).

В 2024 г. получена наиболее сложная картина за весь период наблюдений. Зоны растяжения и сжатия приобретают мозаичный характер, формируя чередуемые аномалии. На самой площадке ПИЛ образовались высоко градиентные зоны, характеризующие переход деформаций от сжатия к растяжению. Особо выделяются области значительного растяжения вдоль Муратовского и Енисейского разломов, где достигаются экстремальные положительные значения дилатации. Одновременно в северной части полигона фиксируется устойчивая зона сжатия, связанная с Красноярским I разломом. Такая пространственно-временная трансформация полей дилатации подтверждает псевдоциклический характер деформационного процесса, однако демонстрирует его усложнение за счёт наложения локальных эффектов в тектонических узлах.

Таким образом, развитие процессов сжатия и растяжения земной поверхности в пределах Нижне-Канского массива за 12-летний интервал имеет псевдоциклический характер с ориентировочным периодом $T \approx 2-3$ года. Вместе с тем необходимо еще раз подчеркнуть, что за счет цикличности достаточно большие среднегодовые значения скоростей деформаций сглаживаются на более длительном интервале времени за счет т.н. временного масштабного эффекта. Поэтому временную экстраполяцию полученных значений на период времени более 10 тыс. лет необходимо проводить с понижающим коэффициентом, который приблизительно равен 100 для четвертичного периода 2,6 млн. лет (Гзовский М.В.).

На рисунке 3.7 показана динамика изменения во времени деформации чистого сдвига по аналогичным периодам на рис. 3.6. В отличие от дилатации этот параметр позволяет оценить тип кинематических смещений земной поверхности, т.е. сдвиг.

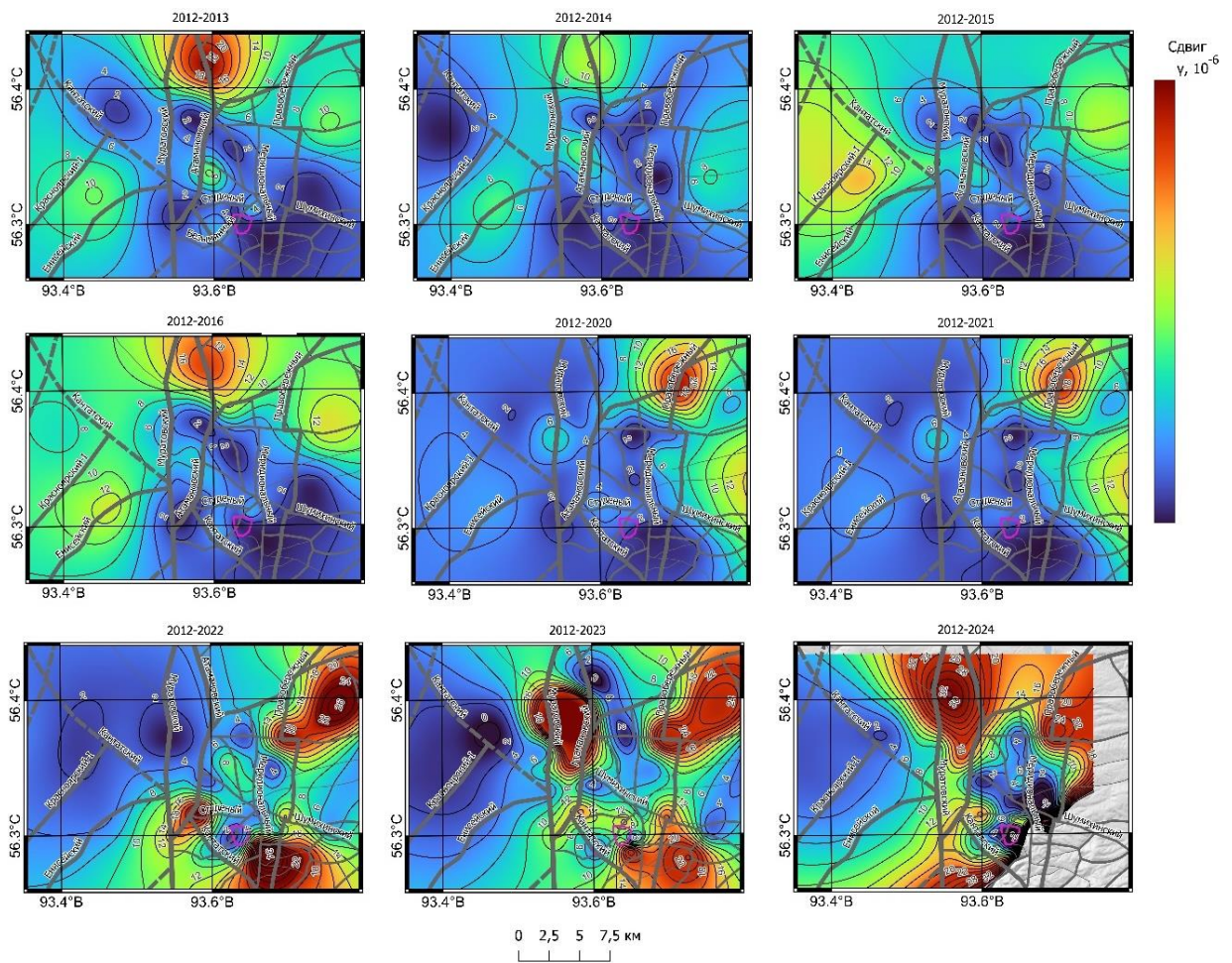


Рисунок 3.7 – Динамика пространственного распределения сдвиговых деформаций на территории геодинамического полигона за период 2012–2024 гг. Серые линии – тектонические разломы

В 2013 г. в пределах полигона фиксируется выраженный максимум сдвиговых деформаций в северо-восточном секторе, приуроченный к узлу сочленения Канско-Атамановского и Правобережного разломов. В 2014 г. деформационное поле становится более сглаженным, при этом основные максимумы смещаются к восточной границе полигона. В 2015 г. вновь фиксируется локализация положительных значений вблизи Муратовского разлома. В эпоху 2012–2016 гг. общая структура поля в целом воспроизводит распределение, характерное для 2012–2014 гг., однако отличается увеличением амплитуды сдвиговых деформаций в северной части территории.

В 2021 г. абсолютные значения сдвиговых деформаций возрастают в восточном секторе, приуроченном к Красноярскому I разлому, где формируются наиболее интенсивные аномалии. В эпоху 2022 г. отмечается существенная активизация сдвиговых процессов в южной части полигона, где величины достигают порядка 9×10^{-6} . Максимальные значения локализуются вблизи узлов Красноярского I и Кантатского разломов, что отражает активное

перераспределение напряжений в смежных блоках. Северо-восточная часть массива характеризуется более спокойным полем, где преобладают отрицательные значения, указывающие на снижение интенсивности сдвиговых деформаций.

В 2023 г. отмечается дальнейшая интенсификация деформаций: формируются протяжённые зоны положительных значений сдвига (до 16×10^{-6}), приуроченные к узлам Канско-Атамановского и Муратовского разломов. Зоны отрицательных значений, напротив, концентрируются в центральной части полигона.

В 2024 г. поле сдвиговых деформаций приобретает наиболее сложный мозаичный характер. Высокие положительные значения фиксируются в северо-восточном секторе (район Правобережного разлома) и вдоль Муратовского разлома, в то время как отрицательные аномалии смещаются в западную часть полигона. Временную экстраполяцию полученных значений деформации сдвига на период времени более 10 тыс. лет также необходимо делать с уменьшающим коэффициентом близким к 100. Таким образом третья установленная особенность состоит в том, что наиболее контрастные деформационные аномалии и зоны повышенных градиентов не распределены хаотично, а тяготеют к тектоническим узлам, крупным разломным нарушениям и к участку размещения площадки ПИЛ. При этом на поздних этапах наблюдений, особенно в 2023–2024 гг., возрастает мозаичность поля деформаций и усиливается роль локальных эффектов, тогда как на длительных интервалах времени их вклад частично сглаживается за счет компенсации разнонаправленных деформационных импульсов

3.3 Нормативная оценка степени опасности смещений

Рассмотрим основные подходы оценки геодинамической опасности территорий на основе анализа напряженно-деформированного состояния исследуемого района. В первую очередь необходимо разделить два термина встречающиеся в данном направлении – геодинамическая опасность и геодинамический риск. Под *геодинамической опасностью* понимается состояние геологической среды, при котором возможно возникновение геодинамических явлений и процессов, способных причинять ущерб и оказывать влияние на окружающую среду [Петухов и Батугина, 1999; Батугин, 2010]. В свою очередь *геодинамический риск* является количественной мерой опасности, частотой реализации опасности [Кузьмин, 1999]. Риск может выражать возможную вероятность наступления геодинамической опасности и так же последующую оценку величины ее последствий, оценку социального и экономического ущерба [Кузьмин, 1999; Куликова и др., 2023].

Согласно приложению № 3 к НП-064-17 «Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии», для ОИАЭ устанавливается степень опасности внешних воздействий. В том числе геодинамическая опасность рассматривается в составе номенклатуры процессов, явлений и факторов природного и техногенного происхождения, способных повлиять на безопасность объекта использования атомной энергии. Риск реализации природных, включая геодинамические, опасностей должен оцениваться с учетом вероятности их возникновения на интервале один год 10^{-4} и выше [НП-064-17].

При нормировании геодинамической опасности и геодинамического риска для различных объектов недропользования ключевое значение имеет понятие «активный разлом». В научной и нормативной литературе существует значительное число определений данного термина. В фундаментальном обзоре [Никонов, 1995] приведены различные формулировки, применявшиеся в разных странах и предложенные специалистами разных направлений – геологами, геофизиками, сейсмологами и др. Как правило, под активностью разлома в этих определениях понимается его «повторное оживление» в течение последних 1–2 млн лет либо активизация в пределах указанного временного интервала. Такой подход характерен для ряда специалистов из России, США, Китая и Японии. В рассмотренных определениях активизация разлома соотносится преимущественно с выбранным временным интервалом, тогда как интенсивность движений по разлому фактически не учитывается. Этот методический пробел был восполнен А.А. Никоновым, который ввел понятие активного разлома как «такое дизъюнктивное тектоническое нарушение геологических тел на поверхности (в рельефе) и/или в недрах, которое несет признаки *направленного* перемещения разделяемых им блоков (крыльев) в течение последних сотен тысяч лет на величину не менее 0.5÷1.0 м на базе (поперек нарушения) не более 0.5÷1.0 км, т.е. со среднерасчетной скоростью не менее сотен долей мм/год» [Никонов, 1995]. В строительных правилах СП 115.13330.2016 и СП 286.1325800.2016 указывается что активный разлом – это тектоническое нарушение с признаками постоянных или периодических перемещений его крыльев в позднем плейстоцене-голоцене (за последние ~100 000 лет), величина (скорость) которых такова, что она представляет опасность для сооружения и требует специальных конструктивных и/или компоновочных мероприятий для обеспечения его безопасности.

Относительно ОИАЭ в нормативных документах дается его однозначное понятие – это тектонический разлом, по которому за последние 1 млн. лет (четвертичный период) произошло относительное перемещение примыкающих блоков земной коры на 0.5 м и более (согласно НП-032-01). А согласно нормам МАГАТЭ [SSG-9, 2010] разлом следует считать активным если он проявляет признаки смещений в прошлое или настоящее время

повторяющегося характера, в течение такого периода времени, который позволяет предположить возможность проявления таких смещений в будущем. При этом для зон повышенной сейсмической активности, для которых геологические и сейсмологические данные уверенно свидетельствуют о коротких интервалах повторяемости землетрясений, оценка потенциальных тектонических нарушений может производиться для периодов времени порядка десятков тысяч лет (поздний плейстоцен – голоцен). Для менее сейсмоактивных зон рекомендуется использовать более продолжительные период (плиоцен – четвертичный период) [SSG-9, 2010]. Современная геодинамика асейсмичных разломов характеризуется короткопериодическим, знакопеременным и/или пульсационным режимом и не ограничивается только сдвиговыми перемещениями их бортов [Кузьмин, 2002; 2016]. В этой связи под современным активным разломом следует понимать разломную зону, в пределах которой фиксируются современные короткопериодические, с длительностью от первых месяцев до нескольких лет, пульсационные и/или знакопеременные деформации (со скоростями не менее 10^{-5} в год [Кузьмин, 2002; 2016]. Согласно работе [Кузьмин, 2016] «...необходимо различать понятия “активный разлом” и “опасный разлом”. “Активный разлом” характеризуется наличием аномальных, по сравнению с регулярными (фоновыми), движений. Эти аномальные движения могут и не являться опасными».

Для оценки пространственного распределения современных движений земной поверхности, в том числе для выявления активных разломов, использовались результаты расчета скоростей горизонтальных и вертикальных движений земной коры ГНСС-пунктов, накопленные за двенадцатилетний период наблюдений с 2012 по 2024 гг. (раздел 3.1).

В нормативе НП-064-17, в разделе II Геологические и инженерно-геологические процессы и явления «Современные дифференцированные движения земной коры, тектонический крип», в столбце 3 критерии даны для «Геодинамические зоны с градиентом скорости четвертичных движений». Т.е. говорится о современных движениях (временной интервал до 100 лет), а критерии даются для 2,6 млн. лет. В нормативе НП-064-17 п.2.2 и Приложении 1 говорится о дифференцированных движениях (без строгого определения) без их разделения на вертикальные и горизонтальные движения. Эти параметры необходимо разделять, т.к. методы измерений, а главное чувствительность устройств наблюдений разные.

Что касается выявления активных разломов, то при строгом выполнении норм все разломы в районе надо считать активными, т.к. согласно принципу максимального риска ни для одного разлома нет данных об измерении перемещений за 1 млн лет. В НП-064-17 указано, что для активных разломов она должна быть 0,5 м.

Поэтому, для оценки степени опасности осуществляется классификация степеней опасности для вертикальных и горизонтальных современных движений из НП-064-17, Приложение 1:

I степень – особо опасный процесс (явление, фактор), характеризующийся максимально возможными для данного вида процесса значениями параметров и характеристик в заданном интервале времени и сопровождающийся природными и/или техногенными катастрофами $grad V_{гор}$ и $|grad V_{верт}| \geq 10^{-6}$ м/год;

II степень – опасный процесс (явление, фактор), характеризующийся достаточно высокими (но не выше, чем известное максимальное значение для данного вида процесса) значениями параметров и характеристик в заданном интервале времени и сопровождающийся ощутимыми последствиями для окружающей среды 10^{-6} м/год $< |grad V_{гор}|$ и $|grad V_{верт}| \leq 10^{-9}$ м/год;

III степень – не представляющий опасности процесс (явление, фактор), характеризующийся низкими значениями параметров и характеристик в заданном интервале времени и не сопровождающийся ощутимыми последствиями для окружающей среды $|grad V_{гор}|$ и $|grad V_{верт}| < 10^{-9}$ м/год.

А для выполнения приблизительной оценки опасности по степеням I, II, III за четвертичный период в соответствии с известной работой М.В. Гзовского, 1975 умножить полученные значения на масштабный коэффициент $K_m, \approx 100$.

На рис. 3.8–3.9 приведены результаты расчетов. На рис. 3.8 показана карта направления и абсолютного значения градиента скорости горизонтальных движений $|grad V_{гор}|$. Простирания вектором на карте показывают направление максимального изменения градиента скорости горизонтальных движений за 10 лет. Для построения непрерывного поля $|grad V_{гор}|$ была выполнена интерполяция методом ближайшего соседа, что позволило сохранить дискретную природу классификационных градаций при последующей оценке геодинамической опасности. Визуализация пространственного распределения рассчитанных величин и соответствующих классов опасности осуществлялась в пределах регулярной прямоугольной сетки размером 150×150 ячеек.

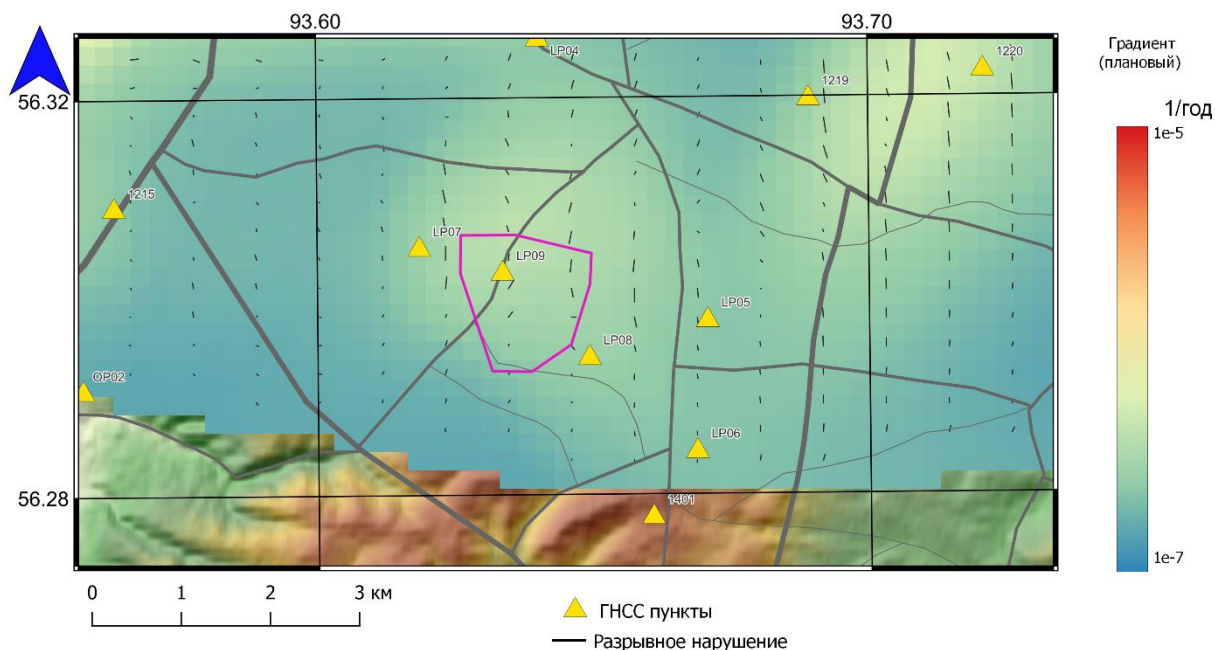


Рисунок 3.8 – Карта направления и абсолютного значения градиента скорости горизонтальных движений $|grad V_{гор}|$ за период 2012-2024 гг. по данным ГНСС

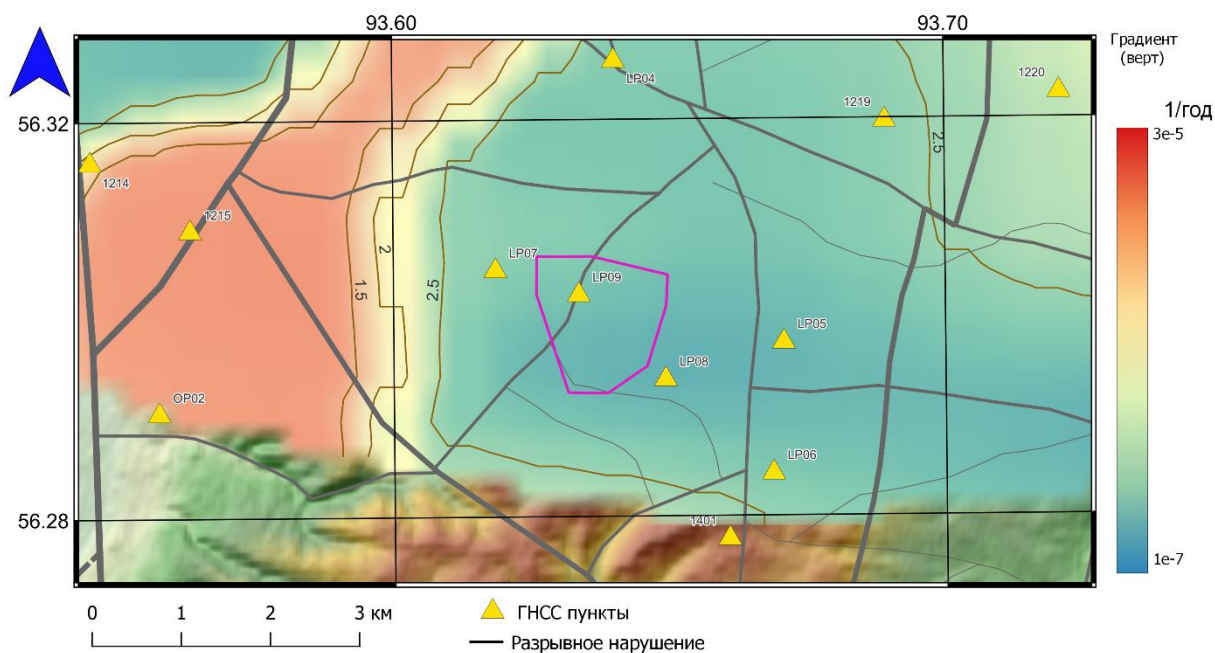


Рисунок 3.9 – Карта распределения модуля градиента скорости вертикальных движений $|grad V_{верт}|$ за период 2012-2024 гг. по данным ГНСС

На рис. 3.10 видно, что практически на всей территории значения $|grad V_{гор}|$ находятся в пределах $10^{-7} \div 5 \times 10^{-7}$ м/год. Наиболее мощная зона аномальных значений $|grad V_{гор}| \sim 10^{-5} \div 5 \times 10^{-6}$ м/год располагается на левом берегу р. Енисей параллельно Атамановскому разлому.

Такая же зона, но с немного меньшими $|grad V_{гор}|$ находится на противоположном берегу реки. Это может свидетельствовать о возможном сдвиговом кинематическом характере деформаций по этому разлому, когда противоположные крылья движутся в разных направлениях. Кроме этого, визуально видны еще две зоны, но с величинами градиентов порядка 10^{-6} м/год. Это зона южнее широтного Канско-Атамановского разлома и зона Правобережного разлома. Первая - смещена на юг относительно трассы Канско-Атамановского разлома, но это может быть вызвано искажением при интерполяции, т.к. в этом месте нет пунктов наблюдений.

На рис. 3.9 показана полученная карта распределения рассчитанных значений $|grad V_{верт}|$. Для Атамановского разлома получена практически такая же картина, что и для горизонтальных движений. В целом фоновые значения градиента лежат в пределах $10^{-7} \div 5 \times 10^{-7}$ м/год, а аномальные значения на порядок выше $\sim 10^{-6}$ м/год.

Далее полученные на рисунках 3.8 и 3.9 карты были пересчитаны в соответствии с НП-064-17, Приложение 1 в степени опасности I, II, III. Видно, что практически вся территория относится к категории II. Однако надо иметь ввиду, что карты на рисунках 3.10 и 3.11 отражают современные движения, а если их сравнивать с указанным в НП-064-17 периодом 1 млн. лет, то их надо уменьшить в 100 раз. Тогда вся территория района согласно классификации НП-064-17 будет соответствовать степени III – не представляющий опасности процесс (явление, фактор), характеризующийся низкими значениями параметров и характеристик в заданном интервале времени и не сопровождающийся ощутимыми последствиями для окружающей среды $|grad V_{гор}|$ и $|grad V_{верт}| < 10^{-9}$ м/год.

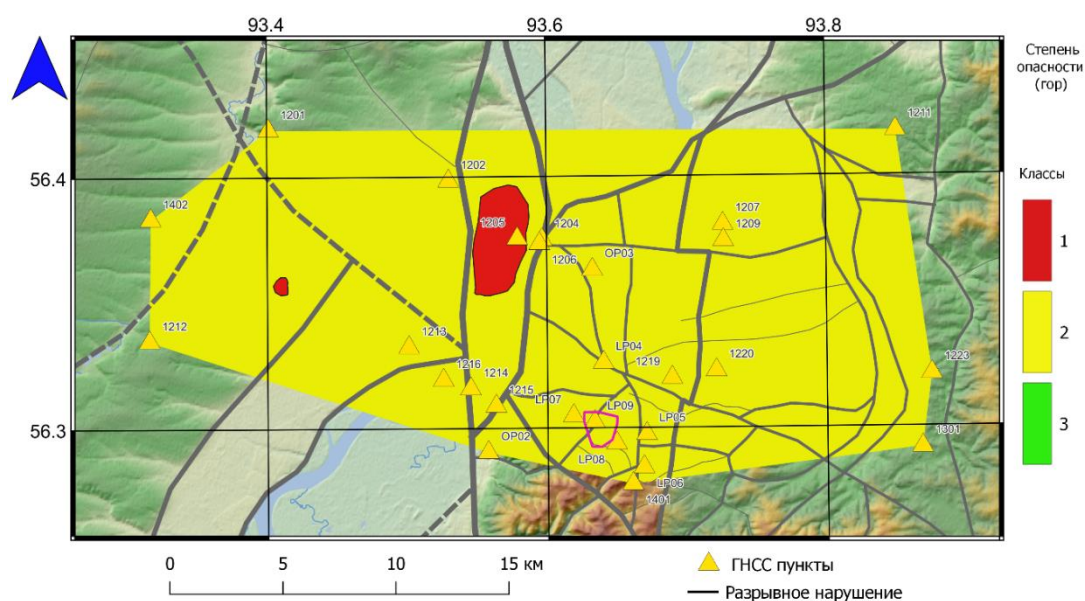


Рисунок 3.10 – Карта степеней опасности по НП-064-17 $|grad V_{гор}|$ за период 2012-2024 гг. по данным ГНСС-наблюдений

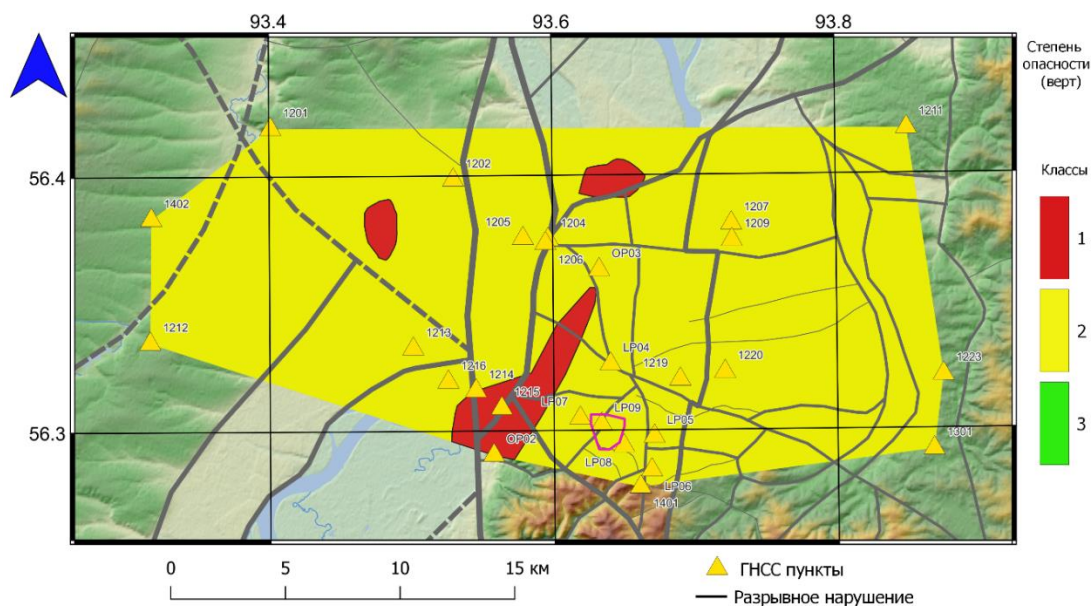


Рисунок 3.11 – Карта степеней опасности по НП-064-17 $|grad V_{верт}|$ за период 2012-2024 гг. по данным ГНСС-наблюдений

3.4 Выводы

По данным ГНСС-наблюдений за 2012–2024 гг. установлено, что современное поле смещений на Нижне-Канском геодинамическом полигоне не формирует устойчивой картины направленных долговременных перемещений. Средние годовые скорости смещений на отдельных пунктах в основном составляют 1–3 мм/год, суммарные смещения за весь период наблюдений достигают 30–35 мм, а возможные накопленные смещения на горизонте 10 тыс. лет после учета масштабного эффекта остаются в пределах нескольких десятков сантиметров. Это указывает на отсутствие признаков интенсивной современной тектонической перестройки территории в региональном масштабе.

Вместе с тем показано, что деформационное поле полигона является существенно неоднородным и нестационарным. Пространственно-временной анализ выявил перестройку ориентации главных осей деформаций, смену режимов сжатия, растяжения и сдвига, а также мозаичную локализацию аномалий, особенно выраженную в 2024 г. Наиболее заметные проявления деформаций приурочены к узлам сочленения крупных разломных структур и к зоне площадки ПИЛ, а общее развитие процесса сжатия-растяжения в пределах массива имеет псевдоциклический характер с ориентировочным периодом 2–3 года. Следовательно, для интерпретации геодинамического состояния массива решающее значение имеют не осредненные скорости сами по себе, а пространственно-временная организация поля деформаций.

Оценка градиентов горизонтальных и вертикальных движений показала наличие локальных аномальных зон, однако при приведении результатов к нормативной классификации с учетом временного масштабного эффекта вся территория района соответствует III степени по НП-064-17. Это означает, что в региональном плане современные деформационные процессы характеризуются низким нормативным уровнем, но внутри полигона сохраняется локальная неоднородность.

Таким образом, третья глава обосновывает первое научное положение диссертации – установлены особенности пространственно-временной изменчивости полей современных деформаций на Нижне-Канском геодинамическом полигоне по данным ГНСС-наблюдений 2012–2024 гг., выражающиеся в перестройке ориентации главных осей деформаций, смене деформационных режимов и локализации аномалий в пределах разломно-блоковой структуры и площадки ПИЛ.

ГЛАВА 4. ЦИКЛИЧНОСТЬ СОВРЕМЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В РАЙОНЕ РАЗМЕЩЕНИЯ ПИЛ

4.1 Модель учета цикличности деформационных процессов

Современные движения и деформации земной коры проявляют пульсационный характер – чередование фаз повышенной геодинамической активности и относительного покоя. Эта концепция сформулирована Ю.А. Мещеряковым на основе геодезических и морфотектонических данных, показавших цикличность деформаций на разных масштабах времени [Мещеряков, 1981]. Подтверждение этому приводят и современные исследования: на активных разломах Калифорнии геодезическими методами выявлены квазипериодические циклы деформации, когда активные смещения чередуются с паузами [Несмеянов, 2004; Nadeau and McEvilly, 2004]. Этот аспект отражен и в исследованиях Ю.О. Кузьмина, где показано, что современные деформационные (СД) процессы земной коры характеризуются ярко выраженным пульсационным характером [Кузьмин, 2002; 2016], при котором периоды аномальной геодинамической активности ΔT_A чередуются с периодами относительной стабилизации (покоя) ΔT_S . Следовательно, современное движение земной коры нельзя считать строго равномерным: оно реализуется через серии импульсов различной длительности и амплитуды. Данное обстоятельство имеет принципиальное значение при оценке длительности безопасного функционирования инженерных объектов, поскольку игнорирование импульсного характера деформаций приводит к существенному занижению оценок времени безопасной эксплуатации. Очевидно, что при определении среднегодовой скорости деформирования земной поверхности в условиях неравномерного развития современных геодинамических процессов необходимо учитывать вклад как периодов активизации, так и интервалов стабилизации. В геоэкологическом отношении эта задача сводится к переходу от наблюдаемых параметров современного деформационного режима к количественным критериям, характеризующим состояние геологической среды и допустимость длительного использования подземного пространства для изоляции радиоактивных отходов.

Цикличность деформационных процессов в целом сходна с классическим сейсмическим циклом (см. пример на рис. 4.1), однако охватывает не только землетрясения, но и «медленные» тектонические процессы. В периоды тектонической активизации фиксируются ускоренные движения, высокие скорости деформаций и/или частое возникновение смещений (в том числе сейсмических событий). В периоды относительной стабилизации наблюдается замедление скоростей и паузы в разрывных событиях, при сохранении медленного накопления упругих деформаций. Эта смена фаз лежит в основе

деформационного цикла: накопление напряжений во время покоя сменяется быстрым высвобождением в активную фазу, после чего цикл повторяется (рис. 4.1).

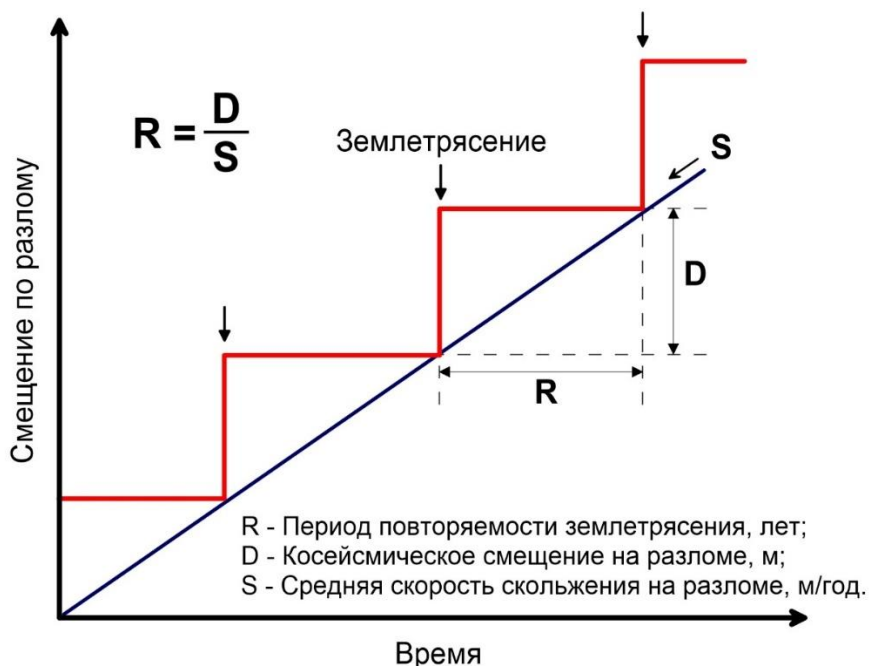


Рисунок 4.1 – Пример сейсмического цикла

Глобальная и локальная периодизация современных движений земной коры как количественная модель не имеет теоретического обоснования. И опирается на общегеологические модели [Гзовский, 1975; Несмеянов, 2005] и отдельные геодезические, геоморфологические, геологические и палеосейсмологические наблюдения за СДЗК.

Ранее в работе [Кузьмин, 2000] предложена модель для оценки периода безопасного функционирования объекта на основе анализа периодизации современных движений земной коры. Рассмотрим участок земной поверхности, в пределах которого возможно проявление современных деформационных процессов и расположен объект недропользования. Для оценки продолжительности его безопасной эксплуатации необходимо определить предельно допустимую среднегодовую скорость деформирования земной поверхности на данном участке. Предположим, что в течение периода безопасного функционирования объекта ΔT_{safety} может реализоваться N активизаций, или импульсов, современных деформационных процессов длительностью ΔT_A , разделенных интервалами стабилизации длительностью ΔT_S . В этом случае суммарная продолжительность безопасного функционирования объекта определяется соотношением [Кузьмин, 2000]:

$$\Delta T_{safety} = N \times \Delta T_A + (N + 1) \times \Delta T_S, \quad (4.1)$$

где ΔT_{safety} – время безопасного функционирования объекта, лет;

ΔT_A – длительность импульса современного деформационного процесса, лет;

ΔT_S – длительность периода стабилизации деформационного процесса, лет;

N – количество активизаций современных деформационных процессов.

Пусть ε_{max} – деформационный порог разрушения элемента конструкции или объекта в целом. Тогда среднегодовая скорость деформации, определённая путём осреднения за весь период ΔT_{safety} , может быть записана в виде:

$$\bar{\varepsilon}_{avg} = \frac{\varepsilon_{max}}{\Delta T_{safety}} = \frac{\varepsilon_{max}}{N \times \Delta T_A + (N + 1) \times \Delta T_S}, \quad (4.2)$$

ε_{max} – порог деформации разрушения элемента конструкции или объекта в целом, б/р;

$\bar{\varepsilon}_{avg}$ – средняя скорость деформации, 1/год.

Из выражения (4.2) следует, что традиционный подход к оценке предельно допустимой среднегодовой скорости деформации соответствует частному случаю при $N=1$ и $\Delta T_S=0$. Такое допущение приводит к существенному завышению допустимой скорости деформирования и, соответственно, к занижению расчетного периода безопасной эксплуатации объекта. В реальных геодинамических условиях продолжительность СД-импульса, как правило, несколько меньше либо сопоставима с длительностью периода стабилизации, то есть $\Delta T_S \approx \Delta T_A$. При таком допущении выражение (4.2) может быть преобразовано к виду [Кузьмин, 2000]:

$$N\Delta T_A + (N + 1)\Delta T_S = N\Delta T_A + (N + 1)\Delta T_A = (2N + 1)\Delta T_A, \\ \bar{\varepsilon}_{avg} = \frac{\varepsilon_{max}}{(2N + 1) \times \Delta T_A}, \quad (4.3)$$

Таким образом, при разработке геодинамических критериев безопасного функционирования объектов использования атомной энергии и объектов недропользования необходимо разграничивать среднегодовую скорость деформирования земной поверхности, полученную путем осреднения за расчетный интервал времени (формулы 4.2, 4.3), и фактическую скорость современных деформационных процессов, определяемую как отношение амплитуды аномальной деформации к продолжительности соответствующего СД-импульса [Кузьмин, 2000]:

$$\bar{\varepsilon}_A = \frac{\varepsilon_A}{\Delta T_A}, \quad (4.4)$$

где ε_A – амплитуда аномальной деформации, накопленная за один импульс ΔT_A ;

$\bar{\varepsilon}_A$ – скорость аномальной деформации в фазе активного СД-импульса, 1/год.

В этом случае при использовании среднегодовой скорости деформации в качестве критерия геодинамической опасности обязательным становится учёт повторяемости (числа M)

импульсов СД-процессов. Используя выражение 4.2, можно получить формулу для оценки времени безопасного функционирования объектов недропользования:

$$\Delta T_{safety} = \frac{\varepsilon_{max}}{\bar{\varepsilon}_{avg}}, \quad (4.5)$$

Таким образом используя формулу 4.5 и варьируя ее параметры, можно эмпирически оценить величины максимальных деформаций разрушения и среднегодовые деформации для объекта исследований на период его эксплуатации [Кузьмин, 2000]. Однако применение данного подхода в практических задачах оценки геодинамической опасности ОИАЭ сталкивается с принципиальной методической проблемой, связанной с оценкой количества активизаций N СД-процессов на период проектного срока эксплуатации ПГЗРО. В условиях ограниченной длительности инструментальных ГНСС-наблюдений (за период измерений на полигоне с 2010 года было выполнено измерений 12 эпох [Татаринов и др., 2022]) определение числа таких активизаций на период эксплуатации ПГЗРО, $T=10\,000$ лет, оказывается невозможным. Наличие коротких (по геологическим меркам) рядов наблюдений, охватывающих 10–15 лет, не позволяет выявить повторяемость СД-процессов и тем более экстраполировать их на весь срок эксплуатации объекта.

В этой связи целесообразно отказаться от попыток прямого инструментального определения числа активизаций в модели [Кузьмин, 2000] и перейти к их формализованному описанию в виде функции времени. Опишем количество активизаций СД-процессов за период эксплуатации объекта вводится в виде функции $N(T)$, зависящей от продолжительности рассматриваемого временного интервала T . При этом предполагается, что активизации СД-процессов можно рассматривать как случайные события, характеризующиеся некоторой средней интенсивностью возникновения во времени. В наиболее общем виде это позволяет записать:

$$N(T) = \lambda T, \quad (4.6)$$

где λ – средняя интенсивность (частота) активизаций СД-процессов, 1/год.

Такое представление не предполагает строгой периодичности деформационных импульсов и допускает их неравномерное распределение во времени. Параметр λ в данной постановке не является непосредственно измеряемой величиной и определяется косвенно, на основе совокупности инструментальных и геологических данных. Таким образом выражение 4.3 будет записано в виде:

$$\bar{\varepsilon}_{avg}(T) = \frac{\varepsilon_{max}}{(2\lambda T + 1) \times \Delta T_A}, \quad (4.7)$$

Перейдем к оценке средней скорости деформации $\bar{\varepsilon}_{avg}$ на период проектного срока эксплуатации ПГЗРО $T = \Delta T_{safety} = 10\ 000$ лет. Для этого необходимо определить необходимые исходные данные в соответствии с формулами выше.

В первую очередь необходимо определить границы порогов рассматриваемых деформаций разрушения ε_{max} . Следуя приведенным в таблице 4.1 значениям деформаций разрушения, приведем их к нормализованному виду (что бы учесть эффект их пространственной масштабируемости [Manevich et al., 2019b; Маневич, 2020]).

Таблица 4.1 – Оценка значений деформаций разрушения

№	Значение ε_{max} , б/р	Источник	Определение
1	1×10^{-3}	Кузьмин, 2022; 2024	Подземные горные выработки, инженерные подземные сооружения
2	$(2-3.5) \times 10^{-4}$	Минь и др., 2021	Подземные горные выработки. Уровень главной растягивающей деформации массива ($350 \mu\varepsilon$), соответствующий появлению первых трещин растяжения и принимаемый как численный критерий внешней границы вторичного поля напряжений.
3	$(0.8-1.8) \times 10^{-2}$	Li et al., 2023	Локальная площадка в пределах активной зоны разрывообразования, необходимой для формирования косейсмического поверхностного разрыва. Относится к узкой зоне в 50–500 м
4	$(2.5-5.0) \times 10^{-3}$	Кузьмин, 2020	Локальные площадки до 1–2 км, в пределах активной зоны разлома
5	1.5×10^{-4} – 1.5×10^{-3}	Кузьмин, 2016	Район, пересечённый разломом, по которому есть движения (масштаб 2–5 км). Оценка накопленной горизонтальной относительной деформации для зон повышенной деформационной активности по данным многолетнего геодезического мониторинга.

6	1.0×10^{-5} – 1.5×10^{-4}	<i>Holden et al., 2015</i>	Структурно-тектонический блок в масштабе 5–10 км в активной рифтовой/разломной обстановке. Оценка по главным горизонтальным деформациям и дилатации, полученным из GPS-скоростей на базах порядка 10–27 км.
7	$(1.0–3.0) \times 10^{-5}$	<i>Árnadóttir et al., 2009</i>	Структурно-тектонический блок 5–10 км в более умеренной региональной обстановке. Оценка накопленной ареальной или максимальной сдвиговой деформации по GPS-данным для межсейсмического/межэпизодического режима

Перейдем к оценке параметров импульсной модели (формулы 4.4, 4.6). Иерархически СД-процессы можно разделить на следующие группы:

1. Сверхкороткие (сутки–месяцы) – сезонные нагрузки и кратковременные транзиенты длительностью дни и недели;
2. Межгодовые ($\approx 1–10$ лет) – многолетние транзиенты, постсейсмические процессы, скольжение на разломах (к примеру: ~ 2 -летние пульсации скорости подвижки на разломной системе Сан-Андреас [*Turner et al., 2015*]);
3. Десятилетние ($\approx 10–50$ лет) – смена режимов скольжения на разломах и сейсмические циклы в тектонически активных районах (к примеру: Паркфилд, ~ 22 года [*Bakun et al., 2005*]; Северо-Анатолийский разлом с интервалом $\sim 3–5$ лет и последующим затишьем ~ 20 лет [*Ambraseys, 2002*]);
4. Вековые–тысячелетние циклы – активизация движений каждые 300–500 лет [*Ambraseys, 2002*], или $\sim 100–200$ лет и паузы до ~ 1000 лет [*Стрельников, 2024*];
5. Глобальные циклы (> 10 тыс. лет) – пульсации тектонической активности (например, циклы скорости плит за последние 20 млн лет) [*Morley et al., 2021*].

Доля активной фазы ΔT_A различна сезонные колебания имеют до 50%, медленные события до 5–10%, кластеры землетрясений $\sim 20–30\%$ времени цикла. Амплитуды смещений варьируют от мм и сантиметров до метров и десятков метров (при сильных сейсмических событиях). Из этих предположений можно оценить границы параметра средней интенсивности активизаций λ (табл. 4.2).

Таблица 4.2 – Оценка параметра средней интенсивности активизаций λ

№	Периодизация	Интервал цикла T , лет	Количество активизаций за 10 000 лет, N , шт.	Интенсивность активизаций λ , 1/год	Длительность импульса активизации ΔT_A , лет
1	Сезонная	< 1	> 10 000	> 1	$(0.25-0.5) \times T$
2	Межгодовая	1–10	1000–10 000	1–0.1	$(0.05-0.1) \times T$
3	Десятилетние	10–50	200–1000	0.1–0.02	$(0.1-0.3) \times T$
4	Вековые	100–1000	10–100	0.01–0.001	$(0.05-0.2) \times T$

Следует отметить, что значения λ , N и ΔT_A являются оценочными и отражают не строго периодический, а квазипериодический характер современных деформационных процессов. Доля активной фазы $\Delta T_A/T$ определяется типом деформационного режима: для сезонных и техногенных колебаний она может достигать 0.5, для медленных деформаций обычно составляет 0.05–0.1, для сейсмотектонических активизаций до 0.1–0.3 полного цикла. В связи с этим значения таблицы 4.2 следует использовать как интервальные сценарные оценки для параметризации модели интенсивности активизаций, а не как жёстко фиксированные константы.

4.2 Параметризация модели интенсивности активизаций λ СДЗК

Используя интервалы параметризации модели, выше (табл. 4.1, 4.2) выполним оценку $\bar{\varepsilon}_{avg}$ (формула 4.7). При этом сезонные деформации из расчёта исключаются, поскольку для оценки долгосрочной геодинамической опасности ПГЗРО релевантны межгодовые, десятилетние и вековые активизации. Важным аспектом расчёта является пространственное нормирование деформации по длине базы или площади ячейки [Шевчук и др., 2025]. Поэтому пороги $\bar{\varepsilon}_{avg}$ приведены сразу по четырём пространственным уровням, соответствующим принятым в табл. 4.2 значениям ε_{max} (структурно-тектонический блок, район, локальная площадка, подземные выработки и инженерные сооружения) (табл. 4.3).

Таблица 4.3 – Оценка параметра средней интенсивности активизаций λ

Масштабный уровень	Интервал ε_{max} , б/р	$\bar{\varepsilon}_{avg}$, 1/год, (вековой цикл)	$\bar{\varepsilon}_{avg}$, 1/год, (десятилетний цикл)	$\bar{\varepsilon}_{avg}$, 1/год, (межгодовой цикл)
Структурно-тектонический блок 5–10 км	1.0×10^{-5} – 1.5×10^{-4}	2.4×10^{-9} – 1.5×10^{-7}	1.6×10^{-9} – 7.5×10^{-8}	5.0×10^{-9} – 1.5×10^{-7}
Район 2–5 км, пересечённый разломом	1.0×10^{-4} – 1.5×10^{-3}	2.4×10^{-8} – 1.5×10^{-6}	2.4×10^{-8} – 7.5×10^{-7}	7.5×10^{-8} – 1.5×10^{-6}
Локальная площадка 1–2 км	2.5×10^{-3} – 5.0×10^{-3}	6.0×10^{-7} – 5.0×10^{-6}	4.0×10^{-7} – 2.5×10^{-6}	1.25×10^{-6} – 5.0×10^{-6}
Подземные выработки и инженерные подземные сооружения	2.0×10^{-4} – 1.0×10^{-3}	4.8×10^{-8} – 1.0×10^{-6}	3.2×10^{-8} – 5.0×10^{-7}	1.0×10^{-7} – 1.0×10^{-6}

Таким образом, в итоговом виде средняя опасная деформация для ПГЗРО при сроке эксплуатации 10 000 лет может быть оценена как интервал от 10^{-9} – 10^{-8} год⁻¹ для блокового масштаба до 10^{-7} – 10^{-6} год⁻¹ для локальных площадок и выработок. При сопоставлении с результатами ГНСС-деформационного анализа эта величина должна интерпретироваться не как фиксированная компонента тензора, а как порог для соответствующего инварианта или главного значения в зависимости от кинематики деформирования.

Полученная номограмма показывает, что средняя опасная деформация $\bar{\varepsilon}_{avg}$, допустимая для горизонта эксплуатации ПГЗРО $T=10^4$ лет, закономерно зависит от масштаба нормирования. Для масштаба структурно-тектонического блока 5–10 км расчётные значения $\bar{\varepsilon}_{avg}$ минимальны и составляют первые 10^{-9} – 10^{-8} год⁻¹ что соответствует фоновому или умеренно аномальному режиму долговременного деформирования крупных геодинамических структур. Для зон 2–5 км, пересечённых активными разломами, опасные средние деформации возрастают до диапазона 10^{-8} – 10^{-6} год⁻¹, а для локальных площадок 1–2 км достигают максимальных значений порядка 10^{-7} – 10^{-6} год⁻¹. Для подземных выработок расчётные значения остаются высокими, но уже не отражают только геодинамический масштаб, а характеризуют переход к инженерно-геомеханическому уровню, где опасность определяется

не столько величиной региональной деформации, сколько чувствительностью ослабленного и структурно нарушенного массива к внешнему полю деформаций [Еременко и др., 2020].

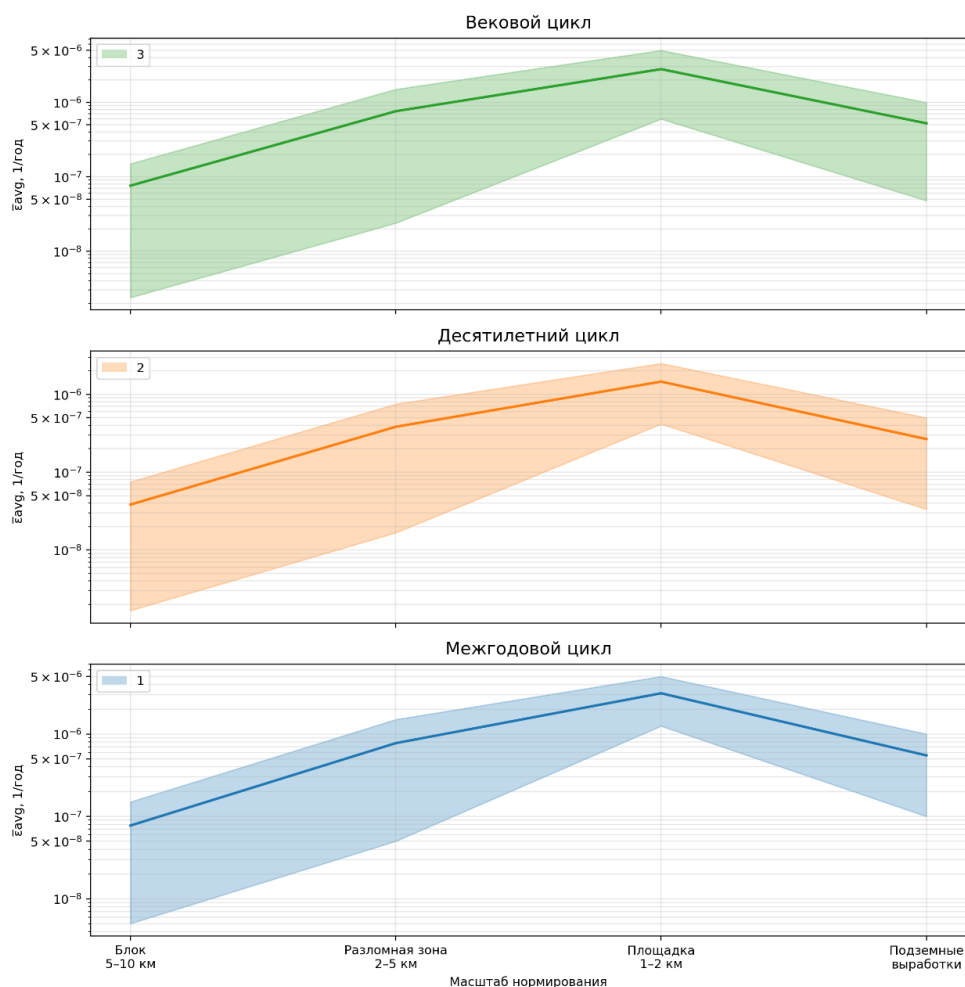


Рисунок 4.2 – Сценарные графики оценки средней опасной деформации $\bar{\epsilon}_{avg}$. 1 – межгодовая модель цикличности; 2 – десятилетняя модель цикличности; 3 – вековая модель цикличности

Физически уменьшение порогов опасной деформации на крупных базах связано с тем, что в пределах структурно-тектонического блока деформация распределяется по значительному объёму среды и осредняется по сети разломов, зон трещиноватости и межблоковых контактов. Поэтому даже сравнительно малые средние значения деформации, вычисленные на базах 5–10 км, могут соответствовать существенному накоплению упругой энергии и приближению блока к состоянию неустойчивости. При переходе к масштабу района и локальной площадки усреднение ослабевает, и в расчёт входят уже не только фоновые блоковые смещения, но и локальные градиенты поля деформаций, приуроченные к активным структурам. В результате наблюдаемые активные деформации возрастают: малая база фиксирует не интегральный отклик блока, а локальную концентрацию деформации.

Для подземных выработок картина меняется. Здесь объект уже не является просто элементом крупномасштабного поля деформации, а представляет собой искусственно ослабленную неоднородность в массиве. Горная выработка создаёт свободную поверхность, перераспределяет напряжения, формирует контурные зоны концентрации и область нарушения вокруг выработанного пространства. Поэтому даже при меньших или сопоставимых внешних геодинамических деформациях вблизи выработки возникают большие локальные растягивающие и сдвиговые деформации [Еременко, 2020; Конюхов и др., 2022]. Иными словами, для выработки опасность определяется не только амплитудой внешнего деформирования, но и высокой чувствительностью самого объекта к этому воздействию. Именно поэтому масштабный ряд «блок – район – площадка» отражает чисто геодинамическую локализацию деформаций, а переход к «выработке» отражает уже инженерно-геомеханическое усиление эффекта за счёт концентрации напряжений и снижения устойчивости массива.

Полученные в табл. 4.3 и на рис. 4.2 оценки средней опасной деформации $\bar{\epsilon}_{avg}$ позволяют перейти от качественного представления о цикличности современных деформационных процессов к количественному критерию долговременной геодинамической опасности. Вместе с тем для интерпретации результатов необходимо сопоставить предложенные критерии с уже существующими подходами оценки деформационного состояния геологической среды, а именно с эмпирическими зависимостями масштабного эффекта, приведёнными в табл. 4.4 [Manevich et al., 2019; Маневич, 2020; Шевчук и др., 2025], и с нормативными критериями предельной величины скорости деформации, представленными в табл. 4.5 [РБ-019-17].

Таблица 4.4 из работы [Шевчук и др., 2024] отражает регрессионную зависимость наблюдаемых аномальных деформаций дилатации от площади нормируемого конечного элемента. По существу, она описывает масштабный эффект в деформационных полях, получаемых по геодезическим данным: при уменьшении площади треугольников или других расчётных элементов наблюдаемые деформации закономерно возрастают. Однако приведённые в ней величины не являются критическими в инженерном смысле. Это не пороги разрушения и не предельные значения допустимого деформирования, а эмпирические уровни аномальности, полученные по фактическим данным наблюдений [Manevich et al., 2019; Маневич, 2020; Шевчук и др., 2025]. Их основная функция заключается в том, чтобы оценивать, насколько выявленная по результатам ГНСС или нивелирования деформация отклоняется от типичного уровня для данного масштабного диапазона и данного геодинамического режима. Следовательно, табл. 4.4 является инструментом диагностики

аномальных зон, но не даёт прямого ответа на вопрос об опасности деформационного процесса для объекта длительной эксплуатации.

Иной смысл имеет табл. 4.5, основанная на критериях РБ-019-17. Здесь приведены предельные величины скорости деформации для различных уровней наблюдательной базы: района, площадки и приконтурной части массива. Эти значения уже имеют нормативный характер и могут использоваться как инженерный ориентир при оценке допустимости наблюдаемых деформаций. Однако и этот подход остаётся неполным применительно к задаче геодинамического обоснования безопасности ПГЗРО. Его ограничение состоит в том, что предельные скорости деформации заданы как статический порог и не учитывают ни проектную длительность существования объекта, ни циклический, импульсный характер современных деформационных процессов. Между тем именно для ПГЗРО принципиально важно оценивать не только мгновенный или среднегодовой уровень деформации, но и возможность накопления опасного эффекта на интервале времени порядка $T=10^4$ лет.

Таблица 4.4 – Сводная регрессионная зависимость скорости деформации от площади треугольников для различных районов из работы [Шевчук и др., 2024]

№	Деформация	Уравнение регрессии
1	Сжатие в активных районах	$\varepsilon = 46.36 \times \ln(S) - 510$
2	Сжатие в умеренно-активных районах	$\varepsilon = 18.31 \times \ln(S) - 210$
3	Сжатие в слабоактивных районах	$\varepsilon = 12.15 \times \ln(S) - 150$
4	Растяжение в активных районах	$\varepsilon = -46.36 \times \ln(S) + 510$
5	Растяжение в умеренно-активных районах	$\varepsilon = -18.31 \times \ln(S) + 210$
6	Растяжение в слабоактивных районах	$\varepsilon = -12.15 \times \ln(S) + 150$

где S – площадь нормируемого конечного элемента, км²

Таблица 4.5 – Критерии оценки предельной величины скорости деформации [РБ-019-17]

Исследуемая территория	Размеры базы наблюдений, м	Скорость деформации, год ⁻¹
Район	$L_3 = 3 \times 10^4 \div 5 \times 10^4$ м	$ \varepsilon_3 = 10^{-6} \div 3 \times 10^{-7}$
Площадка	$L_2 = 3 \times 10^3 \div 10^4$ м	$ \varepsilon_2 = 10^{-5} \div 5 \times 10^{-6}$
Приконтурная часть массива	$L_1 = 1 \div 10^2$ м	$ \varepsilon_1 = 10^{-3} \div 10^{-4}$

Таким образом, табл. 4.4, табл. 4.4 и предложенные критерии табл. 4.3 не дублируют, а дополняют друг друга. Таблица 4.4 позволяет оценить степень аномальности деформационного поля с учётом пространственного масштабного эффекта. Таблица 4.5 задаёт

нормативные пределы допустимых скоростей деформации для различных уровней наблюдений. В свою очередь, табл. 4.3 и рис. 4.2 вводят новый блок оценки – критерий долговременной деформационной опасности, учитывающий срок эксплуатации объекта и сценарий цикличности СД-процессов через параметры λ , N и ΔT_A . Иначе говоря, если табл. 4.4 отвечает на вопрос, является ли деформация аномальной для данного масштаба, а табл. 4.5 – не превышает ли она инженерно-допустимый уровень, то табл. 4.3 позволяет ответить на ключевой для ПГЗРО вопрос: будет ли такая деформация опасной на интервале в 10 000 лет при заданном сценарии активизации.

С методической точки зрения предложенные критерии также могут быть приведены к регрессионному виду, аналогичному зависимостям табл. 4.4. Это целесообразно для удобства интерполяции по промежуточным значениям площади нормируемого элемента и для сопоставления с картами деформаций, рассчитанными по ГНСС-сетям различной плотности. Однако в отличие от регрессий табл. 4.4, которые описывают наблюдаемые аномальные деформации дилатации, новые зависимости являются не эмпирическими регрессиями по фактическим наблюдениям, а аппроксимацией расчётных пороговых значений $\bar{\varepsilon}_{avg}$, полученных в рамках сценарной модели цикличности. Поэтому они должны рассматриваться как интерполяционные уравнения в пределах принятых масштабных уровней и не могут без дополнительной калибровки экстраполироваться на иные пространственные диапазоны.

Для геодинамических масштабов, охватывающих структурно-тектонический блок, район, пересечённый разломом, и локальную площадку, расчётные значения $\bar{\varepsilon}_{avg}$, приведённые в табл. 4.3, могут быть аппроксимированы логарифмическими зависимостями вида:

$$\bar{\varepsilon}_{avg} = a \times \ln(S), \quad (4.8)$$

де S – площадь нормируемого конечного элемента, км²

Для межгодового сценария:

$$\bar{\varepsilon}_{avg}^1 = -9.47 \times 10^{-7} \ln(S) + 3.51 \times 10^{-6}, \quad (4.9)$$

Для десятилетнего сценария:

$$\bar{\varepsilon}_{avg}^2 = -4.39 \times 10^{-7} \ln(S) + 1.63 \times 10^{-6}, \quad (4.10)$$

Для векового сценария:

$$\bar{\varepsilon}_{avg}^3 = -8.46 \times 10^{-7} \ln(S) + 3.16 \times 10^{-6}, \quad (4.11)$$

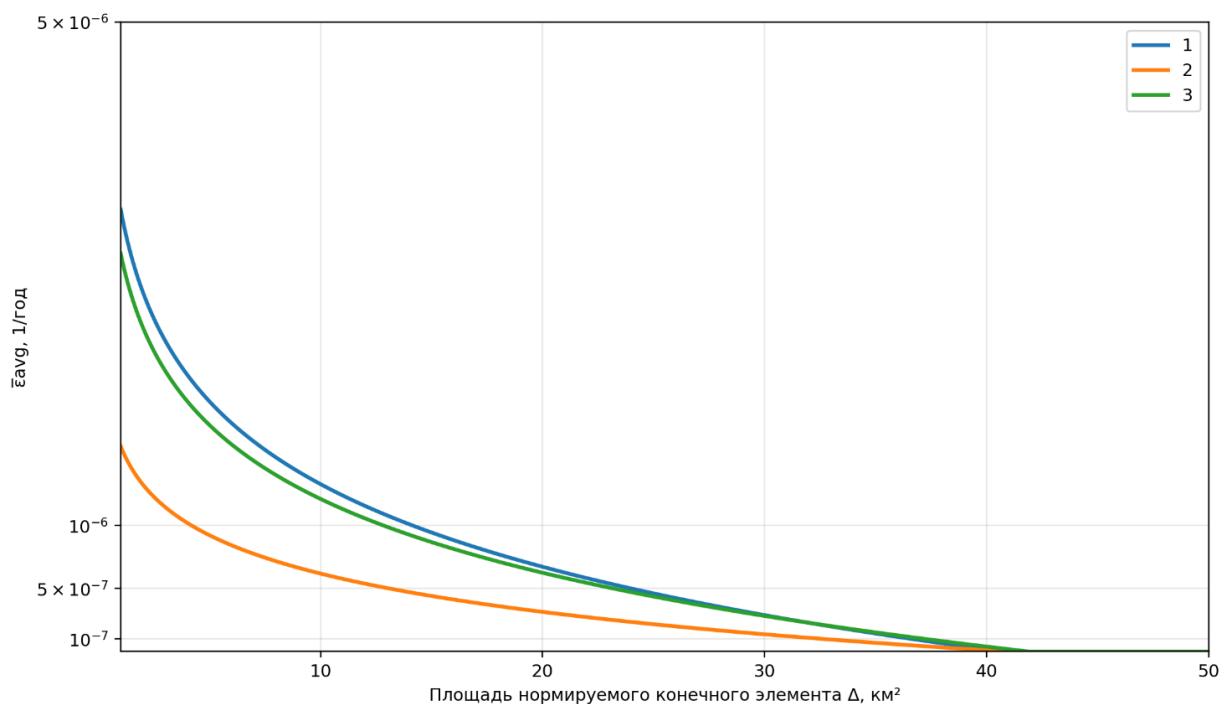


Рисунок 4.3 – Регрессионные зависимости средней опасной деформации $\bar{\epsilon}_{avg}$ от площади треугольников. 1 – межгодовая модель цикличности; 2 – десятилетняя модель цикличности; 3 – вековая модель цикличности

Эти зависимости построены для диапазона площадей, соответствующего трём уровням интерпретации, и описывают расчётные пороговые значения средней опасной деформации для разных сценариев цикличности. При этом подземные выработки не включались в указанную регрессионную аппроксимацию, поскольку они представляют собой не просто маломасштабный элемент геодинамического поля, а инженерный геотехнический объект с собственной концентрацией напряжений и иным механизмом отклика на внешнее деформирование.

Следует подчеркнуть, что сопоставление указанных критериев с результатами деформационного анализа ГНСС должно выполняться не по произвольным компонентам тензора деформаций, а по его физически содержательным характеристикам. Для блоковых и площадных оценок наибольший интерес представляют главные деформации ϵ_1 и ϵ_2 , а также дилатация Δ , характеризующая изменение площади элемента. Для разломных зон, где доминирует локализация деформаций сдвига, основным параметром становится максимальная сдвиговая деформация γ . В этом смысле табл. 4.4 в первую очередь применима к анализу дилатационных аномалий, табл. 4.5 – к интегральной оценке скорости деформации как скалярной характеристики, а табл. 4.3 – к определению предельных уровней опасности по

главным деформациям, дилатации или максимальному сдвигу в зависимости от типа деформационного режима.

Из изложенного следует, что выбор сценария цикличности становится ключевым звеном всей дальнейшей методики. Именно сценарий активизации определяет параметры λ , N и ΔT_A , а следовательно – и итоговый уровень средней опасной деформации $\bar{\varepsilon}_{avg}$ для заданного срока эксплуатации. Поэтому следующая задача состоит не просто в расчёте мгновенных или средних деформаций по данным ГНСС, а в анализе временной структуры этих деформаций, то есть в выявлении циклов, фаз активизации и периодов относительной стабилизации. Только такой подход позволяет обоснованно выбрать сценарий цикличности, соответствующий реальному режиму деформационного процесса, и тем самым перейти от формального расчёта деформаций к выделению деформационно-геодинамических зон, действительно опасных для ПГЗРО.

Таким образом, в разделе 4.2 разработана и параметризована модель оценки критических деформаций для объектов подземной изоляции радиоактивных отходов, учитывающая цикличность современных деформационных процессов, пространственную масштабируемость и сценарные параметры активизации – интенсивность λ , количество активизаций N и длительность импульса современного деформационного процесса ΔT_A . Показано, что учет указанных факторов обеспечивает переход от наблюдаемых параметров современного деформационного режима к оценке критических уровней деформирования для различных масштабных уровней, что позволяет использовать предложенную модель для геоэкологического обоснования безопасности подземной изоляции радиоактивных отходов. Разработанная модель имеет прикладное значение как для интерпретации современных деформационных процессов, так и для геоэкологического обоснования безопасности подземной изоляции радиоактивных отходов. Она обеспечивает возможность сопоставления наблюдаемого деформационного режима с критическими уровнями деформирования геологической среды на разных масштабных уровнях.

4.3 Выделение временных интервалов активизации и цикличности современных деформаций

В предыдущем разделе рассмотрен подход к оценке опасных деформаций, введены параметры ε_{max} , ε_{avg} , N , ΔT_A , λ , а также показано, что выбор сценария цикличности определяет дальнейшую интерпретацию результатов деформационного анализа. В связи с этим следующий шаг – разработка процедуры анализа временной структуры полей деформаций по данным повторных ГНСС-измерений, позволяющей выявлять параметры цикличности

активизаций современных деформационных процессов и локализовать зоны их повышенной интенсивности в пределах исследуемого полигона.

В отличие от анализа отдельных базисных линий/конечных элементов, предлагаемый подход исходит из того, что для рассматриваемой территории разломная схема характеризуется значительной степенью неопределённости (как это показано в разделе 1.3 настоящей диссертации). Наличие нескольких конкурирующих схем, различия в трактовке положения отдельных структурных нарушений и дискуссионность вопроса об их современной активности ограничивают возможности прямой привязки деформационного анализа к конкретным разломам. По этой причине в основу настоящего раздела положен иной принцип: объектом анализа выступает не априорно заданный разлом, а поле современных деформаций, дискретизированное в виде совокупности регулярных пространственных ячеек.

Переход от линейных структур к конечным элементам поля деформаций позволяет решить две взаимосвязанные задачи. Первая из них состоит в оценке параметра λ для различных моделей цикличности (межгодовой, десятилетней и вековой). Вторая заключается в выделении зон повышенной интенсивности современных деформационных процессов по устойчивым пространственно-временным проявлениям деформационной активности, а не по положению разломов, задаваемых априорно.

Исходную основу анализа составляют результаты расчета параметров деформаций на Нижне-Канском геодинамическом полигоне в десяти временных интервалах: 2012–2013, 2014, 2015, 2016, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023 и 2024 гг. Для каждого временного среза построены карты главных деформаций E_1 , E_2 , деформации дилатации Δ , и деформации сдвига γ (первичные результаты анализа которых представлены в разделе 3.3).

При интерпретации этих данных необходимо учитывать ряд принципиальных ограничений. Во-первых, длительность интервалов наблюдений не является одинаковой, вследствие чего прямое сопоставление накопленных значений деформации между временными срезами методически некорректно. Во-вторых, пространственное разрешение получаемых деформационных схем определяется геометрией исходной сети и параметрами её триангуляции. Следовательно, любые попытки перейти к более мелкому масштабу анализа, чем допускается размером конечного элемента, будут приводить к искусственной детализации и потере физической интерпретируемости результата. Во-вторых, продолжительность инструментального ряда по геологическим меркам остаётся ограниченной. Поэтому непосредственно по данным ГНСС возможно оценивать лишь краткочастотную структуру активности, тогда как характеристики десятилетнего и тем более векового масштаба могут быть получены только в форме укрупнённой или сценарной интерпретации. Именно такая постановка соответствует ранее введённому представлению о λ как о средней интенсивности

активизаций, не являющейся прямо измеряемой величиной и определяемой косвенно на основе совокупности данных.

Для обеспечения сопоставимости пространственных и временных данных серия схем параметров деформаций (рис. 3.5–3.7) переводится в форму пространственно-временного куба. Под таким кубом понимается трёхмерная структура данных с координатами x , y и t , в которой каждой пространственной ячейке в каждый временной момент или интервал соответствует набор параметров деформаций. Принципиально важно, что базовой единицей анализа при этом является не разлом и не отдельный треугольник исходной сети, а регулярная ячейка единой расчётной сетки.

Построение куба начинается с выбора характерного размера пространственной ячейки. Поскольку исходные параметры деформаций получаются по конечным элементам исходной триангуляции, минимально допустимый масштаб интерпретации должен определяться геометрией этих элементов. Для этого по каждому треугольнику с площадью S_k вычисляется его эквивалентный линейный размер:

$$l_{eq,k} = \sqrt{\frac{4S_k}{\sqrt{3}}}, \quad (4.12)$$

Данное выражение позволяет привести площадь произвольного треугольника к стороне равновеликого равностороннего треугольника и использовать эту величину как меру пространственной разрешающей способности. В качестве базового размера регулярной ячейки целесообразно принимать не минимальное значение l_{eq} , а её медиану распределения. Для действующей сети Нижне-Канского массива вычислены значения l_{eq} (график распределения представлен на рис. 4.4), медианное значение составляет ~ 3000 м, которое было принято за размер ячейки при построении расчётной сетки.

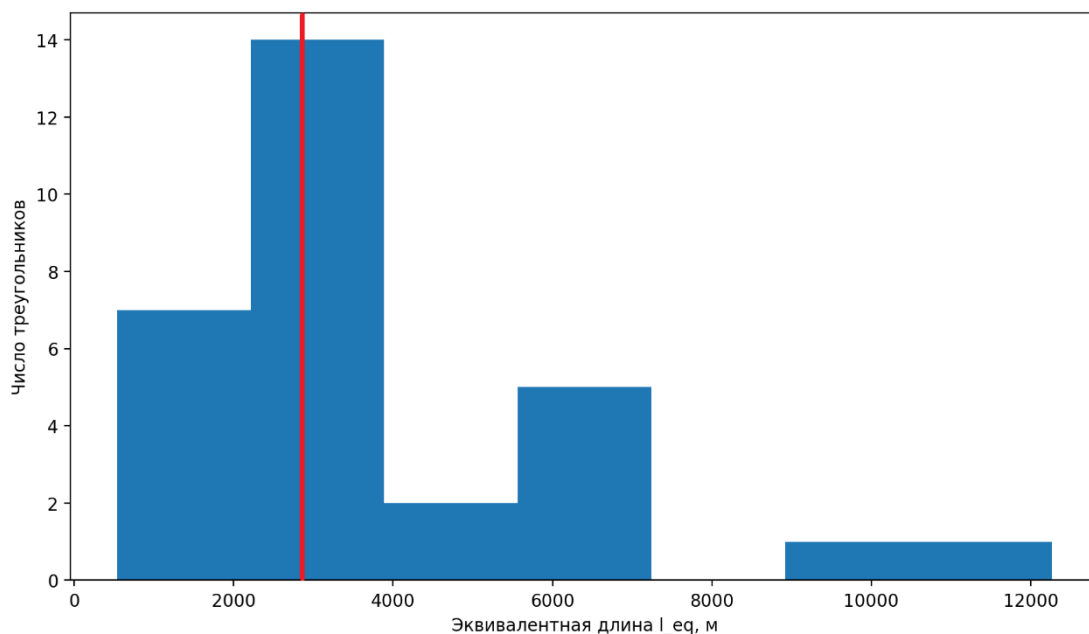


Рисунок 4.4 – Распределение длин эквивалентного линейного размера l_{eq}

В результате для каждой ячейки регулярной сетки (рис. 4.5) формируется временной ряд годовых параметров деформаций E_1 , E_2 , Δ , γ . Тем самым пространственно-временной куб становится основой дальнейшей идентификации активных фаз, оценки частоты их повторения и выделения зон повышенной интенсивности.

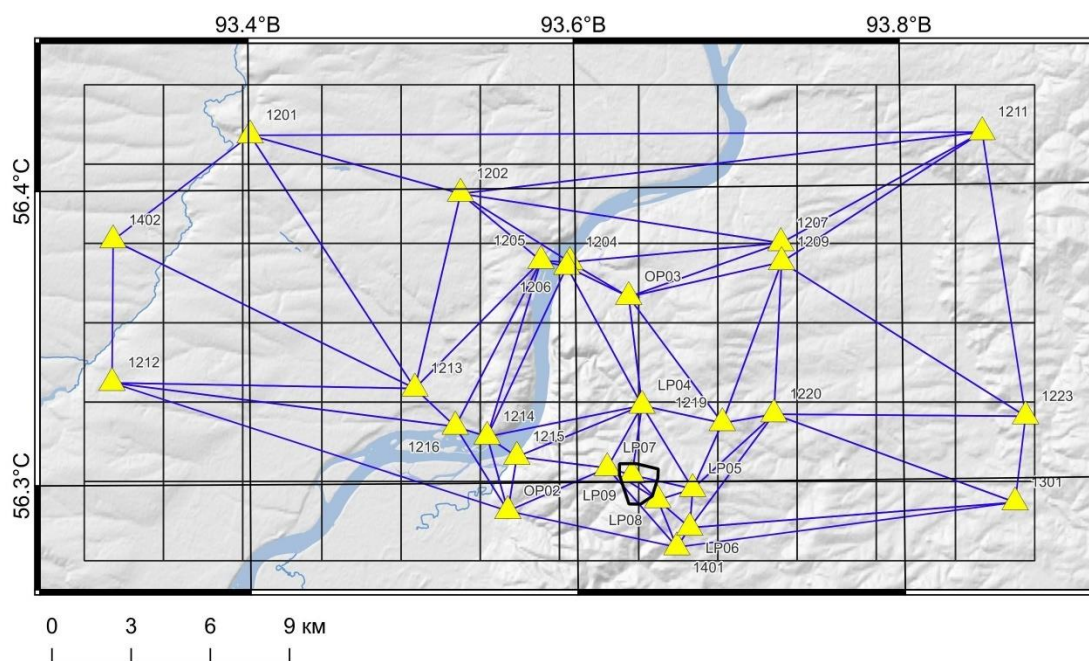


Рисунок 4.5 – Расчетная сетка пространственно-временного анализа

Следующий этап состоит в определении тех состояний ячеек, которые могут быть интерпретированы как временные интервалы активизации современных деформационных процессов. Активизация понимается не как факт превышения ранее введённых критериев опасных деформаций разрушения, а как переход ячейки или зоны в статистически и пространственно выраженное состояние повышенной деформационной активности относительно фонового режима наблюдений. Ячейка считается активизированной, если выполняется условие:

$$R_{ij} \geq 1.5, \quad (4.13)$$

В качестве фонового уровня для каждого параметра E_1, E_2, Δ, γ принималось медианное значение модуля соответствующей деформации по всем ячейкам регулярной сетки в пределах рассматриваемого временного среза. Для количественной оценки превышения фона применялась робастная оценка:

$$z = 0.6745 \times \frac{|x| - \text{med}(|x|)}{\text{MAD}(|x|)}, \quad (4.14)$$

где $|x|$ – модуль значения параметра деформаций;

$\text{med}(|x|)$ – медиана модулей данного параметра по всем ячейкам соответствующей эпохи;

$\text{MAD}(|x|)$ – медианное абсолютное отклонение от медианы, то есть робастная мера разброса.

Коэффициент 0.6745 нужен для нормировки MAD к масштабу стандартного отклонения при близком к нормальному распределении. Таким образом z -оценка позволяет выделять статистически выраженные аномалии и сохраняющая устойчивость к единичным выбросам и асимметрии распределения параметров деформаций.

По всей сетке (рис. 4.5) было зафиксировано 87 активных состояний при 240 фактически заполненных наблюдениях, то есть доля активных состояний среди заполненных составила 36.25%. Если считать от полного теоретического объема $33 \times 10 = 330$ комбинаций «ячейка–эпоха», эта доля составляет 26.36%. По отдельным эпохам число активных ячеек распределилось следующим образом: 2012–2013 – 9, 2012–2014 – 8, 2012–2015 – 8, 2012–2016 – 8, 2012–2019 – 5, 2012–2020 – 10, 2012–2021 – 10, 2012–2022 – 10, 2012–2023 – 11, 2012–2024 – 8. Наиболее выраженное пространственное проявление активизации было характерно для срезов 2012–2020, 2012–2021, 2012–2022 и особенно 2012–2023, тогда как минимум активных ячеек пришелся на срез 2012–2019.

Для расчета цикличности основным параметром стало число независимых интервалов активизации K . Интервал определялся как непрерывная последовательность активных состояний, не разделенная фазой возврата к неактивному фону. В результате по 33 ячейкам были получены следующие значения: в 2 ячейках интервалы отсутствовали, в 25 ячейках

зафиксирован 1 интервал, в 6 ячейках – 2 интервала. Среднее значение K по всей сетке составило 1.12, медианное – 1. Это показывает, что в пределах короткого ряда большая часть территории пережила либо одну устойчивую фазу активизации, либо не продемонстрировала выраженной повторяемости.

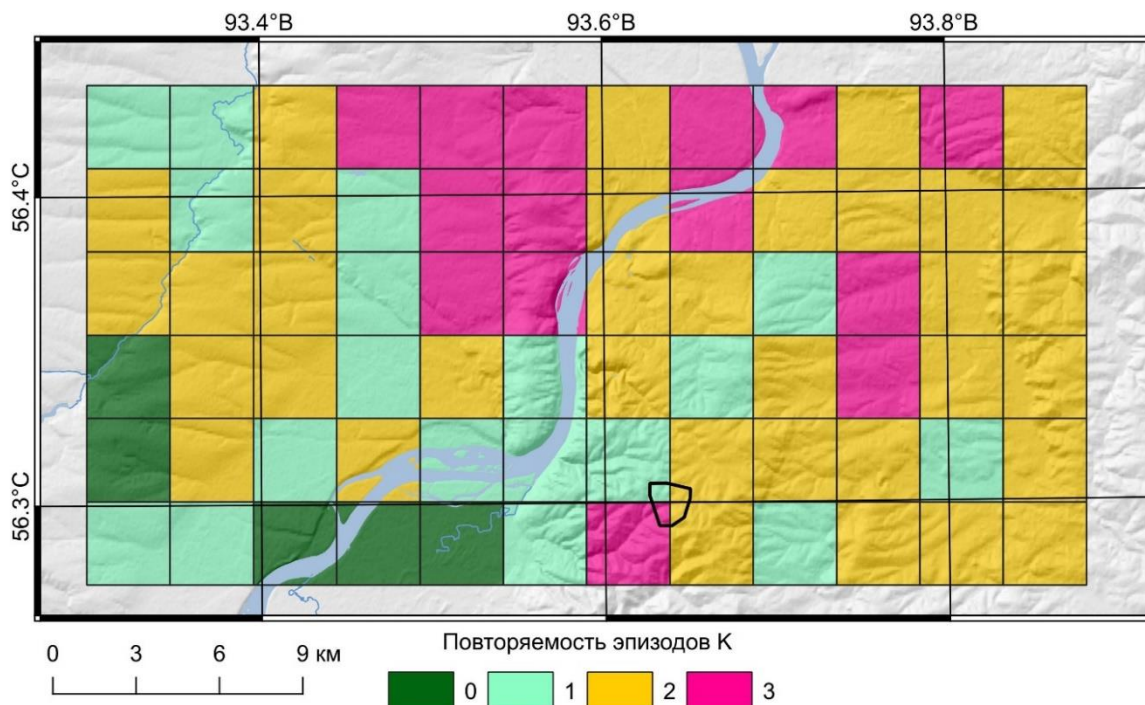


Рисунок 4.6 – Иллюстрация независимых временных интервалов активизации K

Наблюдаемая межгодовая интенсивность активизаций рассчитывается как:

$$\lambda_{obs} = \frac{K}{T_{obs}}, \quad (4.15)$$

где T_{obs} – длительность наблюдаемого временного интервала для конкретной ячейки между первой и последней эпохами измерений.

Соответственно для ячеек с полным интервалом измерений с 2012 по 2024 гг. значения интенсивности активизаций λ_{obs} оказались равны либо 0.0909 год^{-1} при $K=1$, либо 0.1818 год^{-1} при $K=2$. Среднее значение λ_{obs} по всей сетке составило 0.2035 год^{-1} (рис. 4.7). Таким образом, инструментально полученные по сетке значения $\lambda_{obs} \approx 0.09 \div 0.20 \text{ год}^{-1}$ позволяют сделать вывод, что современное деформационное поле полигона на интервале наблюдений реализуется преимущественно в межгодовом-субдесятилетнем режиме, а не в редком вековом режиме. При этом непосредственно из данного ряда нельзя надежно вывести самостоятельную вековую цикличность.

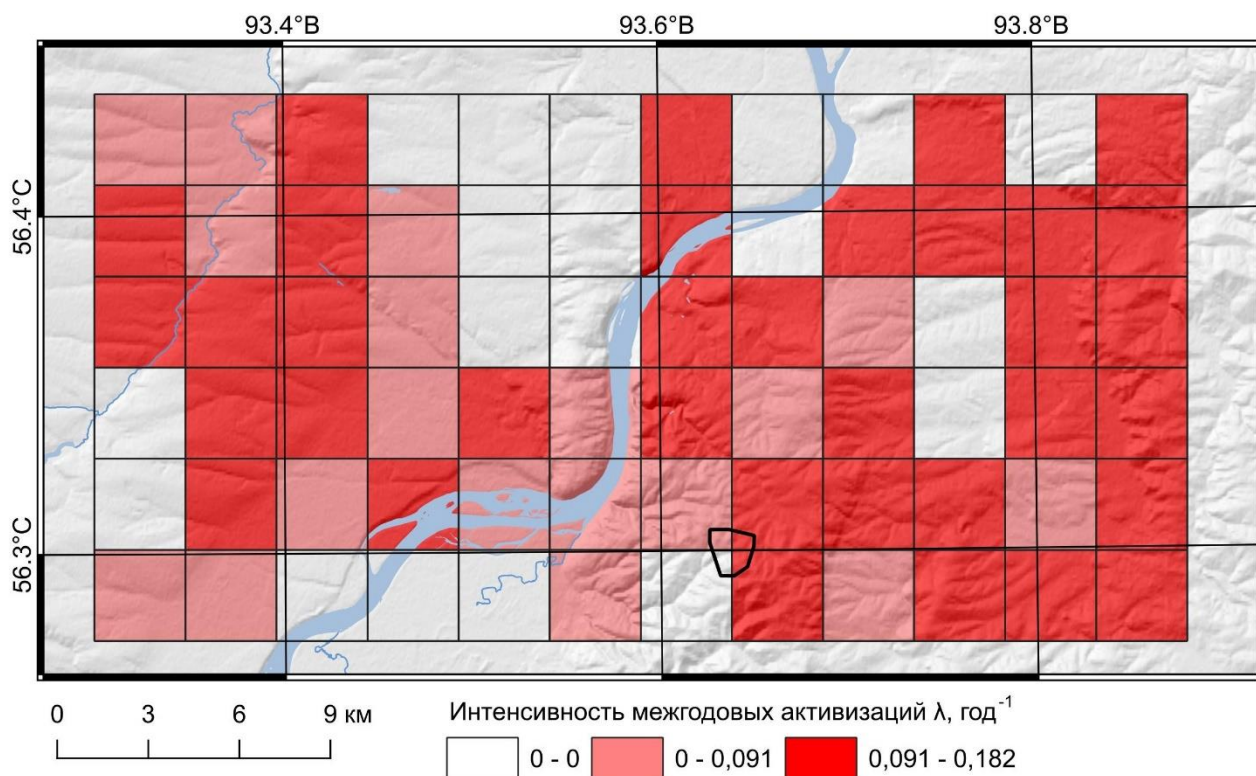


Рисунок 4.7 – Межгодовая интенсивность активизаций λ_{obs}

На следующем шаге для каждой из ячейки матрицы вычислены изменения величин параметров деформаций дилатации и полного сдвига (рис. 4.8). Матрица по деформации дилатации Δ показывает устойчивую смену знака и амплитуды дилатации между эпохами, что позволяет визуально выделять фазы преобладающего растяжения и сжатия в разных частях сетки. Особенно информативны группы ячеек, где знак Δ сохраняется в нескольких последовательных эпохах, а затем меняется, что указывает на перестройку деформационного режима. Матрица по деформации полного сдвига γ лучше подчеркивает именно интенсивность сдвиговой компоненты. По ней видны ячейки с относительно устойчиво повышенными значениями, а также эпохи, когда зона повышенного сдвига расширяется или, наоборот, локализуется.

а)

б)

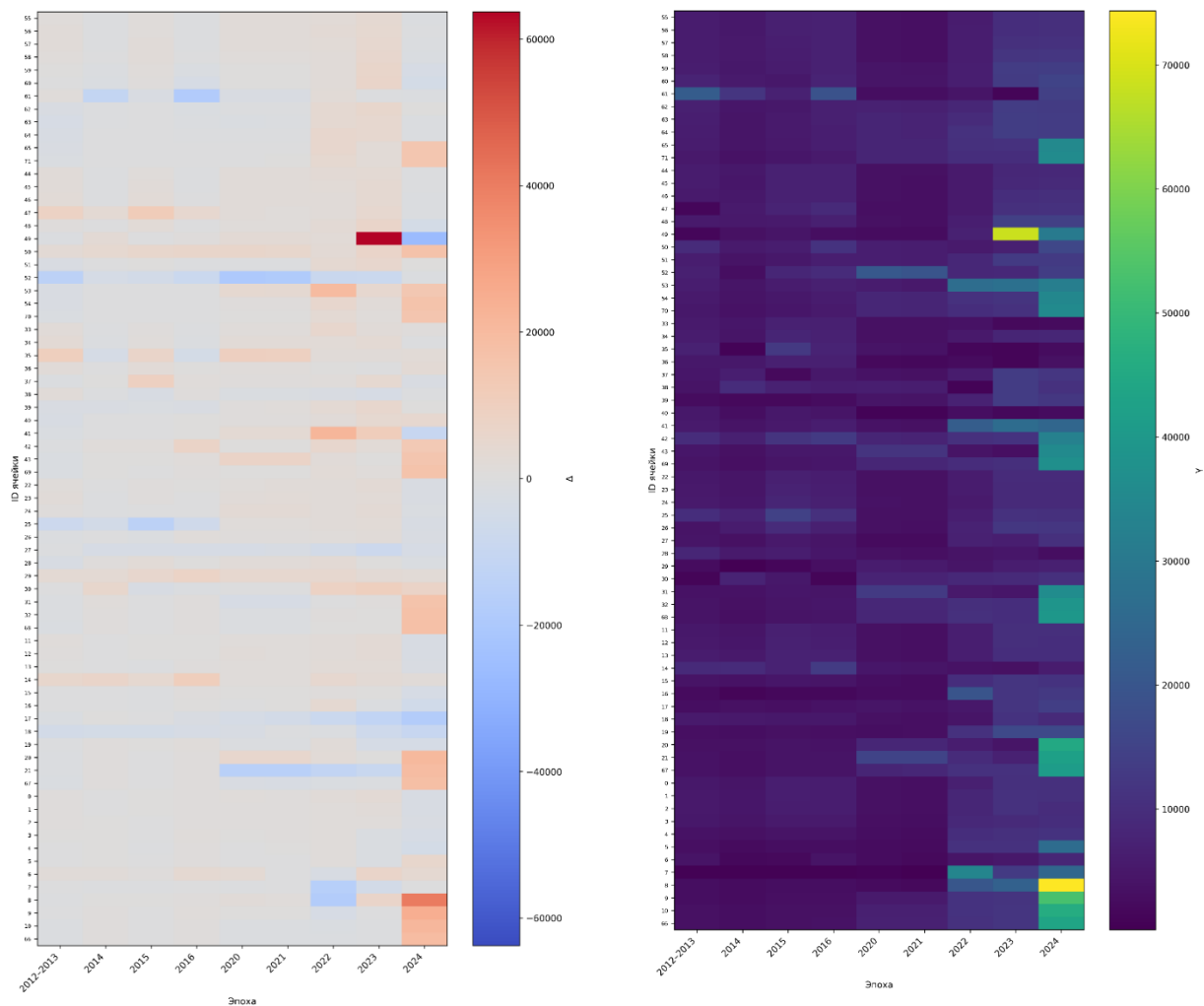


Рисунок 4.8 – Матрица изменений параметров деформаций расчетных ячеек. а – деформации дилатации Δ ; б – деформации полного сдвига γ

Суммарный анализ всех классов ячеек приведен на рис. 4.9-4.10. График показывает, что в 2012–2015 гг. несколько преобладают ячейки с отрицательной дилатацией (сжатием), в 2020–2023 гг. доминируют положительные значения (растяжением), а в 2024 г. снова усиливается доля отрицательной дилатации. Это можно интерпретировать как смену фаз деформационного режима. На рис. 4.10 показано распределение ячеек по кинематическим классам во времени. Эпохах доминируют два режима – сдвиговой и транстензионный. Сдвиговой режим занимает наибольшую долю ячеек практически на всем интервале наблюдений, особенно заметно в 2014 и 2016 гг., где его доля достигает примерно 47%. В то же время начиная с 2020 г. возрастает роль транстензионного режима, и в 2020–2023 гг. его доля стабильно составляет около 35–36%. Транспрессионный режим наиболее выражен в начале ряда, особенно в 2012–2014 гг., после чего его доля снижается. Это позволяет говорить о смене соотношения между сдвигово-сжимающими и сдвигово-растягивающими компонентами деформационного режима.

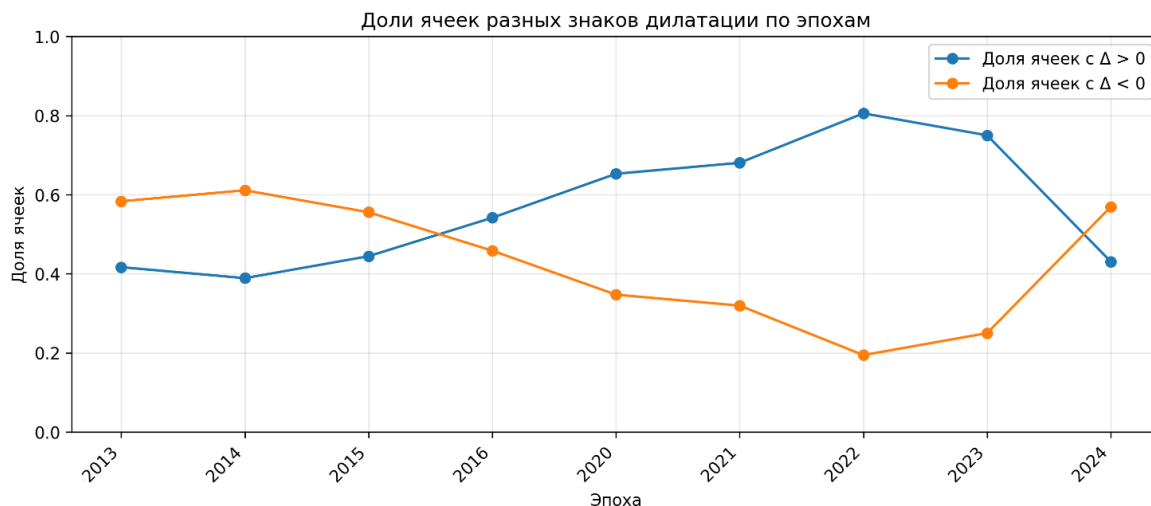


Рисунок 4.9 – Доли ячеек разных знаков деформации дилатации по эпохам наблюдений

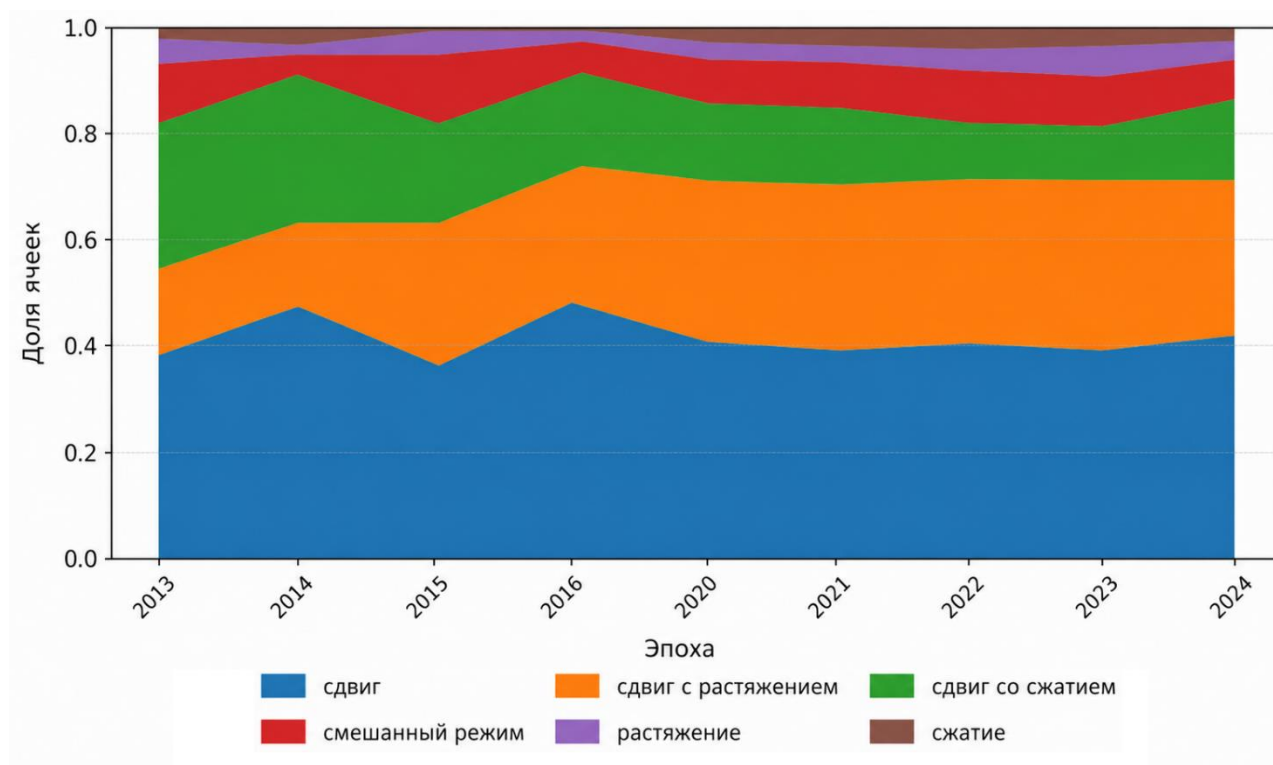


Рисунок 4.10 – Доли ячеек кинематического режима по эпохам наблюдений

4.4 Оценка времени накопления опасной деформации с учетом модели цикличности

На рис. 4.11 представлена схема кинематического режима. Из нее видно, что фоновым режимом для большей части площади является сдвиговый режим. Он доминирует в северной, западной, восточной и значительной части южной области карты. Однако в центральной части и особенно по обе стороны осевой речной долины формируются участки смешанного режима.

В центрально-западной, центральной и центрально-восточной частях широко развиты зоны сдвига с растяжением, то есть транстензионные ячейки. Сдвиг с сжатием, то есть транспрессионный режим, локализуется в центральной и центрально-восточной части, в том числе по восточному борту долины р. Енисей. Чистое растяжение выделяется локально в центрально-западной и центрально-восточной частях. Чистое сжатие выражено точечно, в южно-центральной части карты.

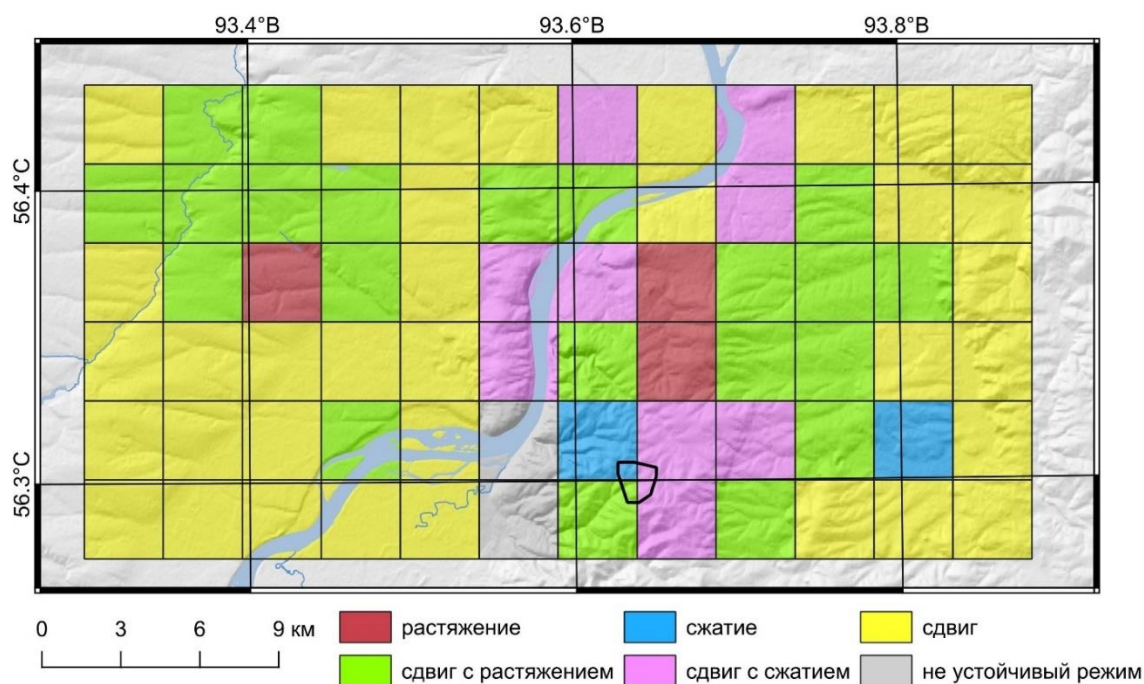


Рисунок 4.11 – Распределение ячеек по преобладающему кинематическому режиму

Используя значения регрессионных зависимостей средней опасной деформации (рис. 4.3) и измеренные значения межгодовой интенсивности активизаций ячеек λ_{obs} вычислим условный срок накопления опасной деформации дилатации и полного сдвига для условий деформационного режима геодинамического полигона Нижне-Канского массива:

$$T = \frac{\bar{\epsilon}_{avg}}{\bar{\epsilon}_{obs} \times \lambda_{obs}}, \quad (4.16)$$

где $\bar{\epsilon}_{avg}$ – значения средней опасной деформации, вычисленные по модели интенсивности активизаций λ СДЗК (рис. 4.3, табл. 4.3), $\bar{\epsilon}_{avg} = 5.5 \times 10^{-6}$, 1/год;

$\bar{\epsilon}_{obs}$ – измеренные параметры скорости деформаций по данным ГНСС-наблюдений на геодинамическом полигоне за 2012–2024 гг. (см. главу 3);

λ_{obs} – вычисленная межгодовая интенсивность активизаций (рис. 4.7).

Критическое значение опасной деформации принимается единым для расчетной ячейки заданного масштаба и сценария цикличности. Такое допущение связано с тем, что пороговое значение характеризует не отдельную кинематическую компоненту деформирования, а предельный уровень деформационного состояния ячейки в целом. Различие между дилатационной и сдвиговой составляющими проявляется не в величине критического порога, а в механизме его достижения и, соответственно, в интерпретации пространственного распределения опасных состояний.

Поле времени накопления опасной деформации по полному сдвигу (рис. 4.12) и по дилатации (рис. 4.13) выражено неоднородно и имеет четкую пространственную организацию. Наиболее короткие сроки накопления опасной сдвиговой деформации приурочены к центральной и центрально-восточной части схемы, особенно к области восточнее русловой долины р. Енисей и к южной части центрального сектора, где фиксируются значения менее 1000–2000 лет. На рис. 4.13 минимальные сроки накопления опасного деформационного состояния по данным дилатации преобладают в северной, северо-восточной, восточной и значительной части центральной области карты: здесь доминируют значения порядка 0–1000 лет. Это означает, что в этих ячейках опасное состояние по объемно-площадной перестройке среды достигается быстрее всего. Более длительные сроки по дилатации, порядка 1000–2000 и 2000–4000 лет, локализуются главным образом в центрально-западной части, в южной и юго-восточной части центральной области, а также вблизи осевой речной долины.

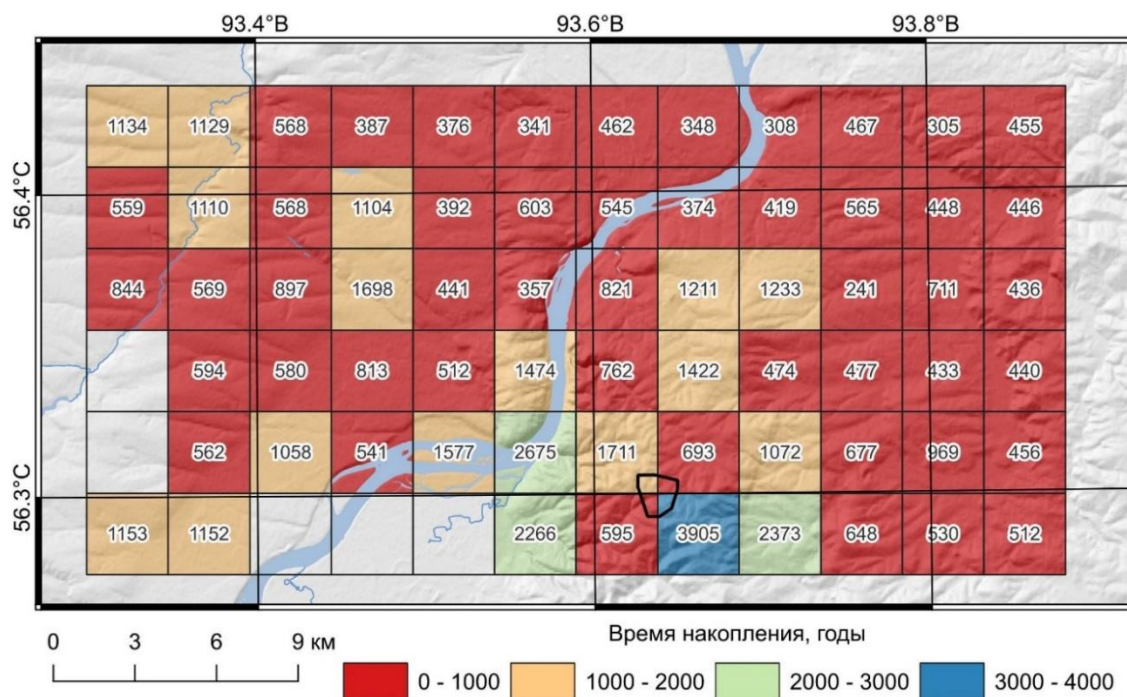


Рисунок 4.12 – Распределение ячеек по времени накопления опасных значений деформации полного сдвига

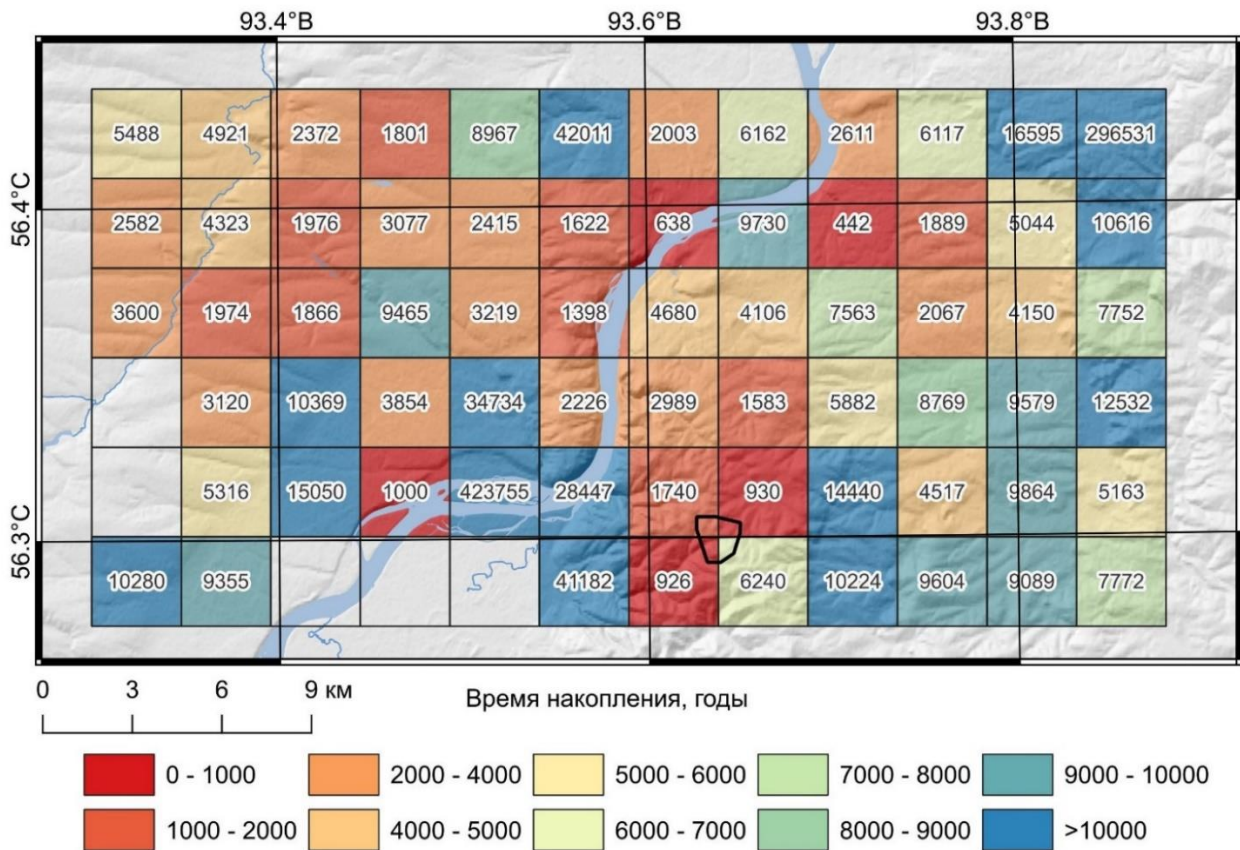


Рисунок 4.13 – Распределение ячеек по времени накопления опасных значений деформации дилатации

С точки зрения прочности материала наиболее потенциально опасны зоны, где короткие сроки накопления опасной деформации совпадают с неблагоприятным кинематическим режимом. В первую очередь это центрально-восточная и южно-центральная части карты, примыкающие к долине р. Енисей. Здесь короткие сроки накопления опасной сдвиговой деформации сочетаются со сдвигом с растяжением и сдвигом с сжатием. Для горных пород это наиболее неблагоприятное сочетание: в транстензионных участках возрастает вероятность раскрытия трещин, разуплотнения, развития зон повышенной проницаемости и потери сплошности, тогда как в транспрессионных участках реализуются концентрация касательных напряжений, сдвиговое дробление и уплотнение с развитием локализованных зон разрушения. Особенно значима центрально-южная область вблизи выделенного черным контуром участка: она попадает в переход между транстензионными, транспрессионными и локально сжимающими ячейками и одновременно характеризуется малыми сроками накопления опасной сдвиговой деформации. Это указывает на повышенную вероятность формирования локальной зоны структурно-механической неустойчивости.

Вторая группа потенциально опасных участков связана с северной, северо-восточной и восточной частями карты, где сроки накопления опасной деформации по дилатации малы, но по сдвигу часто существенно больше. Здесь доминирует не столько вероятность сдвигового разрушения, сколько опасность объемного разуплотнения, развития трещиноватости, раскрытия существующих дислокационных поверхностей и ухудшения фильтрационно-прочностных свойств породы. Такие участки менее опасны в смысле быстрого сдвигового срыва, но потенциально неблагоприятны для долговременной устойчивости массива из-за постепенной деградации его структурной целостности.

Полученные оценки времени накопления опасной деформации позволяют уточнить приоритетные направления дальнейшего геодинамического мониторинга на участке ПИЛ. В первую очередь наблюдения следует сосредоточить в центрально-восточной и южно-центральной частях полигона, примыкающих к долине р. Енисей, где короткие сроки накопления опасной сдвиговой деформации сочетаются с неблагоприятными смешанными кинематическими режимами – сдвигом с растяжением и сдвигом с сжатием. Отдельного контроля требуют северная, северо-восточная и восточная части территории, где по данным дилатации опасное деформационное состояние достигается в наиболее короткие сроки. Для этих зон целесообразно сохранить ежегодные режимные ГНСС-наблюдения как базовый уровень мониторинга, а на наиболее чувствительных участках предусмотреть уплотнение наблюдательной сети и повышение повторяемости измерений. Приоритетом дальнейших работ должно быть уточнение устойчивости выявленных зон во времени, сопоставление их с данными нивелирования и последующая корректировка схемы размещения пунктов наблюдений с учетом участков ускоренного накопления опасной деформации.

4.5 Выводы

В четвертой главе разработана и параметризована модель оценки критических деформаций для объектов подземной изоляции РАО, учитывающая цикличность современных деформационных процессов, пространственную масштабируемость деформаций и сценарные параметры активизации λ , N и ΔT_d . Показано, что оценка допустимого деформационного уровня для горизонта эксплуатации порядка 10 тыс. лет не может основываться только на мгновенных или среднегодовых скоростях, а должна учитывать импульсный характер деформационного процесса и его масштабную зависимость. Тем самым сформирован количественный переход от наблюдаемых современных деформаций к критериям долгосрочной оценки состояния массива.

По результатам параметризации установлено, что средняя критическая деформация для срока эксплуатации 10 тыс. лет изменяется от порядка 10^{-9} – 10^{-8} год⁻¹ для структурно-тектонического блока до 10^{-7} – 10^{-6} год⁻¹ для локальных площадок и подземных выработок, что является прямым развитием критериев предельных величин деформаций документа [РБ-019-17]. При этом показано, что сопоставление расчетных критериев с результатами ГНСС-анализа должно выполняться не по произвольным компонентам тензора, а по физически содержательным характеристикам деформационного состояния – главным деформациям, дилатации и полному сдвигу.

Выполненный пространственно-временной анализ по регулярной сетке позволил оценить наблюдаемую межгодовую интенсивность активизаций современных деформационных процессов на Нижне-Канском геодинамическом полигоне $\lambda_{obs} \approx 0.09$ – 0.20 год⁻¹. Полученные значения показывают, что современное деформационное поле полигона на интервале наблюдений реализуется преимущественно в межгодовом-субдесятилетнем режиме. На этой основе рассчитано время накопления критических деформаций в пределах площадки ПИЛ. Наименьшие расчетные интервалы достижения опасных значений полного сдвига установлены для центральной и центрально-восточной частей территории, главным образом восточнее долины р. Енисей и в южной части центрального сектора. Для дилатационных деформаций минимальные сроки накопления приурочены к северной, северо-восточной и восточной частям полигона. С практической точки зрения наиболее неблагоприятными являются зоны, где малое время накопления критической деформации сочетается со смешанными кинематическими режимами – сдвигом с растяжением и сдвигом с сжатием. Таким образом четвертая глава обосновывает второе и третье научные положения диссертации: разработана и параметризована модель оценки критических деформаций для объектов подземной изоляции РАО, учитывающая цикличность современных деформационных процессов, пространственную масштабируемость и сценарные параметры активизации интенсивности λ , количества активизаций N и длительность импульса современного деформационного процесса ΔT_A ; установлена средняя интенсивность активизации современных деформационных процессов на Нижне-Канском геодинамическом полигоне $\lambda_{obs} \approx 0.09$ – 0.20 год⁻¹ и определены интервалы времени накопления критических деформаций на участках площадки ПИЛ, что позволяет выделять зоны приоритетного геодинамического мониторинга и инженерного контроля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся завершенной научно-квалификационной работой, на основе выполненных автором исследований решена актуальная научная задача анализа цикличности современных движений и деформаций земной коры, разработки модели оценки критических деформаций и определения времени их накопления по данным ГНСС-мониторинга, имеющая важное значение для геоэкологического обоснования безопасности подземной изоляции радиоактивных отходов в районе строительства подземной исследовательской лаборатории Нижне-Канского массива.

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

1. Геоэкологическая безопасность подземной изоляции высокоактивных РАО определяется не только принятыми инженерными решениями, но и состоянием геологической среды, выполняющей функцию основного природного барьера на сверхдлительных временных интервалах. Установлено, что в условиях неоднозначности разломно-блоковой модели района и ограниченности крупномасштабных геолого-геофизических данных наиболее обоснованным подходом к оценке состояния массива является анализ параметров современных движений и полей деформаций земной коры по данным режимного ГНСС-мониторинга, а не формальная идентификация активных разломов

2. Обоснована методическая основа исследования современных деформаций по данным режимных ГНСС-наблюдений, включающая требования к точности измерений, геометрии наблюдательной сети, оценке скоростей современных движений земной коры и расчету параметров тензора деформаций. Показано, что интерпретационно значимыми характеристиками состояния геологической среды являются не абсолютные смещения, а инвариантные параметры деформационного поля – главные деформации, дилатация, полный сдвиг и ориентация главных осей деформирования.

3. По данным ГНСС-наблюдений 2012–2024 гг. установлены особенности пространственно-временной организации полей современных деформаций на Нижне-Канском геодинамическом полигоне, выражающиеся в постоянной перестройке ориентации главных осей деформаций, смене деформационных режимов и локализации аномалий в пределах разломно-блоковой структуры и площадки ПИЛ. Показано, что современное поле деформаций полигона является неоднородным, а его эволюция имеет псевдоциклический характер, которые на коротких временных интервалах носят компенсационный характер и на длительных интервалах наблюдений сглаживаются, формируя трендовую составляющую деформационного режима массива.

4. Установлено, что средние годовые скорости смещений на пунктах полигона в основном составляют первые миллиметры в год, а в региональном плане территория не демонстрирует признаков интенсивной современной тектонической перестройки. Вместе с тем выявлены локальные деформационные аномалии и повышенные градиенты смещений, приуроченные к узлам сочленения разломных структур и к району площадки ПИЛ. Медианные значения деформации полного сдвига γ составляют $\sim 6\ 000$ нанодеформаций год^{-1} , а деформации дилатации Δ \sim от $-2\ 000$ до $+2\ 000$ нанодеформаций год^{-1} . При приведении результатов к нормативной классификации с учетом временного масштабного эффекта территория в целом соответствует III степени по НП-064-17, что указывает на низкий общий нормативный уровень деформационных проявлений при сохранении локальной пространственной неоднородности.

5. Разработана и параметризована модель оценки критических деформаций для объектов подземной изоляции РАО, учитывающая цикличность современных деформационных процессов, пространственную масштабируемость и сценарные параметры активизации интенсивности λ , количества активизаций N и длительности импульса современного деформационного процесса ΔT_A . Установлено, что средняя критическая деформация для срока эксплуатации порядка 10 тыс. лет изменяется от 10^{-9} – 10^{-8} год^{-1} для структурно-тектонического блока до 10^{-7} – 10^{-6} год^{-1} для локальных площадок и подземных выработок.

6. На основе пространственно-временного анализа поля деформаций по регулярной расчетной сетке впервые для района строительства ПИЛ выделены интервалы времени активизации современных деформационных процессов и получена количественная оценка наблюдаемой интенсивности активизаций $\lambda_{obs} \approx 0.09 \div 0.20$ год^{-1} . Показано, что поле современных деформаций полигона на интервале наблюдений реализуется преимущественно в межгодовом–субдесятилетнем режиме.

7. Впервые для участков площадки ПИЛ определены интервалы времени накопления критических деформаций по основным параметрам деформационного состояния. Установлено, что наиболее короткие сроки накопления опасных значений полного сдвига приурочены к центральной и центрально-восточной частям территории, включая участки восточнее долины р. Енисей и южную часть центрального сектора. Для дилатационных деформаций минимальные сроки накопления характерны для северной, северо-восточной и восточной частей полигона. Показано, что наибольшую ответственность для инженерного контроля представляют участки, где малое время накопления критических деформаций сочетается со смешанными кинематическими режимами – сдвигом с растяжением и сдвигом со сжатием.

8. Разработанные подходы к обработке данных режимных ГНСС-наблюдений, выполнению деформационного анализа и интерпретации времени накопления критических деформаций апробированы в рамках научно-исследовательских, производственных и полевых работ Института безопасного развития атомной энергетики РАН (Приложение А), проводимых совместно с ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами». Полученные результаты применяются при эксплуатации геодинамического полигона ПИЛ, а также при реализации научной программы геодинамических и геомеханических исследований в подземной исследовательской лаборатории. Результаты проведенных исследований формируют количественную основу для выделения зон приоритетного геоэкологического и геодинамического мониторинга и могут рассматриваться как элемент геоэкологического обоснования безопасности подземной изоляции радиоактивных отходов в районе строительства ПИЛ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Абалкина И.Л., Большов Л.А., Капырин И.В., Линге И.И., Савельева Е.А., Свистельман 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.
- Акматов Д.Ж.* Оценка устойчивости породного массива на основе разработки трехмерной геомеханической модели при захоронении радиоактивных отходов: дис. ... канд. техн. наук: Москва, 2024. 151 с.
- Акматов Д.Ж., Маневич А.И., Татаринев В.Н., Шевчук Р.В., Морозов О.А.* Трёхмерная структурно-тектоническая модель участка «Енисейский» (Нижне-Канский массив) // Горный журнал. 2023. №1. С. 69–74. DOI: 10.17580/gzh.2023.01.11.
- Алексеев В.К., Батугин А.С., Батугина И.М., Гаранькин Н.В., Калинин А.М., Петухов И.М., Челпан П.И.* Геодинамическое районирование территории Московской области. Ступино: СМТ, 2003. 126 с.
- Андерсон Е.Б., Белов С.В., Камнев Е.Н., Колесников И.Ю., Лобанов Н.Ф., Татаринев В.Н., Морозов В.Н.* Подземная изоляция радиоактивных отходов. Под научной редакцией д-ра техн. наук, профессора В.Н. Морозова / Москва, 2011. Сер. Атомная энергетика.
- Аржанник С.Г., Гладков А.С., Семенов Р.М.* Позднечетвертичная геодинамика и импульсные тектонические движения в зоне влияния Канской системы разломов // Геология и геофизика. 2004. Т. 45. №45. с. 430-442.
- Баклашов И.В.* Геомеханика. Учебник для вузов. Том 1. Основы геомеханики. М.: МГГУ, 208 с.
- Батугин А.С.* Классификация участков земной коры по степени геодинамической опасности // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2010. №12. с. 87–94.
- Батугина И.М., Петухов И.М.* Геодинамическое районирование месторождений при проектировании и эксплуатации рудников. М.: Недра, 1988. 166 с.
- Белов С.В., Морозов В.Н., Татаринев В.Н., Камнев Е.Н., Хаммер Й.* Изучение строения и геодинамической эволюции Нижне-Канского массива в связи с захоронением высокоактивных радиоактивных отходов // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2007. №3. с. 248-266.
- Боровиков С.М.* Теоретические основы конструирования, технологии и надежности. - Мн.: Дизайн ПРО, 1998. – 336 с.
- Верниковский В.А., Верниковская А.Е., Сальникова Е.Б. и др.* Позднерифейский щелочной магматизм западного обрамления Сибирского кратона: результат континентального рифтогенеза или аккреционных событий? // Докл. РАН. 2008. Т. 419, ч 1. С. 90–94.

- Габсатаров Ю.В.* Кинематика микроплит в Северо-Восточной Азии: дисс. ... канд. физ.-мат. наук: 25.00.10 / Габсатаров Юрий Владимирович – М., 2015. – 193 с.
- Гвишиани А.Д., Добровольский М.Н., Дзеранов Б.В., Дзебоев Б.А.* Большие данные в геофизике и других науках о Земле // Физика Земли. 2022. № 1. С. 3-34. DOI: 10.31857/S0002333722010033.
- Гвишиани А.Д., Кафтан В.И., Красноперов Р.И., Татаринев В.Н., Вавилин Е.В.* Геоинформатика и системный анализ в геофизике и геодинамике // Физика Земли. 2019. № 1. С.42–60. <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019142-60>.
- Гвишиани А.Д., Соловьев А.А., Дзебоев Б.А.* Проблема распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений: актуальный обзор // Физика Земли. 2020. № 1. С. 5-29. DOI: 10.31857/S0002333720010044.
- Гвишиани А.Д., Татаринев В.Н., Кафтан В.И., Маневич А.И., Дзебоев Б.А., Лосев И.В.* Скорости современных горизонтальных движений земной коры в южной части Енисейского кряжа по результатам ГНСС-измерений // Доклады Академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 493, № 1. С.73–77. DOI:10.31857/S2686739720070075.
- Гвишиани А.Д., Татаринев 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, изоляционные свойства пород // Доклады академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 507. №1. с. 67-74. DOI: 10.31857/S2686739722601399.
- Геодезические методы изучения деформаций земной коры на геодинамических полигонах: методическое руководство. – М.: ЦНИИГАиК, 1985.
- Геодинамическое районирование недр: методические указания. Л.: ВНИМИ, 1990.
- Гзовский М.В.* Основы тектонофизики. Из-во Наука. М. 1975. 536 с.
- Горшков В.Л., Мохнаткин А.В., Щербакова Н.В.* База скоростей станций ГНСС Восточно-Европейской платформы для решения научных и прикладных задач // Геодезия и картография. 2021. №1. с. 34–44. DOI: 10.22389/0016-7126-2021-967-1-34-44.
- 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.32–41.
- Еременко В.А.* Разработка и обоснование параметров системы анкерного крепления междукамерного целика большого сечения и протяженности // Горный журнал. 2020. № 1. С. 67–73.
- Еременко В.А., Галченко Ю.П., Косырева М.А.* Оценка влияния геометрических параметров традиционно применяемых и природоподобных систем подземной разработки рудных

- месторождений на исходное поле напряжений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. № 3. С. 98–109.
- Есиков Н.П.* Современные движения земной поверхности с позиции теории деформации. – Новосибирск: Наука, СО РАН. 1991. 226 с.
- Есиков Н.П.* Тектонофизические аспекты анализа современных движений земной поверхности. Новосибирск: Наука. 1979. 182 с.
- Ильина О.А., Крупская В.В., Винокуров С.Е., Калмыков С.Н.* Современное состояние в разработках и использовании глинистых материалов в качестве инженерных барьеров безопасности на объектах консервации и захоронения РАО в России // Радиоактивные отходы. 2019. № 4 (9). С. 71–84. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-71-84.
- Итоги деятельности государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» за 2023 год. М.: Росатом. 2024, 399 с.
- Камнев Е.Н., Морозов В.Н., Шишиц И.Ю.* Выбор площадок для захоронения радиоактивных отходов в геологических формациях. М.: «Горная книга», 2011. 216 с
- Кафтан В.И., Гвишиани А.Д., Морозов В.Н., Татаринов В.Н.* Методика и результаты определения движений и деформаций земной коры по данным ГНСС на геодинамическом полигоне в районе захоронения радиоактивных отходов // Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса. 2019. № 1. С.83–94. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-83-94>.
- Кафтан В.И., Татаринов В.Н.* Анализ возможностей сетей локального деформационного ГНСС мониторинга в сейсмоопасных районах // Вулканология и сейсмология. 2021. №6. с. 21-29. DOI: 10.31857/S0203030621060043.
- Кащеев В.А., Логунов М.В., Шадрин А.Ю., Рыкунова А.А., Шмидт О.В.* Стратегия фракционирования ВАО от переработки ОЯТ // Радиоактивные отходы. 2022. № 2 (19). С. 6–16. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-6-16.
- Кишкина С.Б., Татаринов В.Н., Бугаев Е.Г., Гупало В.С., Забродин С.М.* Подземная исследовательская лаборатория: преодоление неопределенностей в оценке сейсмических условий участка «Енисейский» // Радиоактивные отходы. 2021. № 3 (16). С. 80–93. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-3-80-93.
- Колмогорова П.П., Колмогоров В.Г.* Современные вертикальные движения земной коры Енисейского кряжа // Геология и геофизика. 2004. Т45. №4. с. 455-466.
- Конюхов Д.С.* Критериальный анализ современных технологий подземного строительства // Геотехника. 2021. Т. 13. № 1. С. 40–55. DOI: 10.25296/2221-5514-2021-13-1-40-54.

- Конюхов Д.С., Казаченко С.А.* Основные факторы, влияющие на сходимость расчётных и фактических значений деформаций существующих зданий // Горная промышленность. 2022. № 2. С. 103–111. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-2-103-111.
- Кочарян Г.Г.* Геомеханика разломов. М.: ГЕОС, 2016. 424 с.
- Кочкин Б.Т., Мальковский В.И., Юдинцев С.В.* Научные основы оценки безопасности оценки геологических хранилищ (Енисейский проект). М.: ИГЕМ РАН, 2017. 384 с.
- Крупская В.В., Бирюков Д.В., Белоусов П.Е., Лехов В.А., Романчук А.Ю., Калмыков С.Н.* Применение природных глинистых материалов для повышения уровня ядерной и радиационной безопасности объектов ядерного наследия // Радиоактивные отходы. 2018. № 2 (3). С. 30–43.
- Крупская В.В., Закусин С.В., Лехов В.А., Доржиева О.В., Белоусов П.Е., Тюпина Е.А.* Изоляционные свойства бентонитовых барьерных систем для захоронения радиоактивных отходов в Нижне-Канском массиве // Радиоактивные отходы. 2020. № 1 (10). С. 35–55. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-35-55.
- Кузьмин Ю.О.* Актуальные проблемы идентификации результатов наблюдений в современной геодинамике // Физика Земли. 2014. № 5. с. 51–64.
- Кузьмин Ю.О.* Современная аномальная геодинамика асейсмичных разломных зон // Вестник Отделения наук о Земле РАН. 2002. № 1(20).
- Кузьмин Ю.О.* Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании. М.: Агентство Экономических Новостей, 1999. 220 с.
- Кузьмин Ю.О.* Современная геодинамика опасных разломов // Физика Земли. 2016. №5. с. 87–101. DOI: 10.7868/S0002333716050070.
- Кузьмин Ю.О.* Современная геодинамика разломных зон: разломообразование в реальном масштабе времени // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т.5, № 2. С. 401–443.
- Кузьмин Ю.О.* Современное геодинамическое состояние недр // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2000. № 6. с. 55–64.
- Куликова Е.Ю., Гришин А.В., Мурин К.М.* Геомониторинг в городском подземном строительстве. М.: ИПО «У Никитских ворот», 2015. 292 с.
- Куликова Е.Ю., Полянкин А.Г., Потюкина А.М.* Специфика управления геотехническими рисками при проектировании подземных сооружений // Записки Горного института. 2023. Т. 264. С. 895–905.
- Лаверов Н.П., Величкин В.И., Кочкин Б.Т. Мальковский В.И., Петров В.А., Пэк А.А.* Концепция оценки безопасности хранилищ отработавших ядерных материалов, размещаемых в кристаллических породах // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2010. № 3. С. 195–206.

- Лаверов Н.П., Величкин В.И., Кочкин Б.Т. Мальковский В.И., Петров В.А., Пэк А.А.* Концепция оценки безопасности хранилищ отработавших ядерных материалов, размещаемых в кристаллических породах // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология.* 2010. № 3. С.195–206.
- Лобацкая Р.М.* Неотектоническая разломно-блоковая структура зоны сочленения Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты // *Геология и геофизика.* 2005. Т. 46, № 2. С.141–150.
- Лобацкая Р.М.* Разломно-блоковая структура Байкало-Енисейского разлома в районе эксплуатации объектов ядерной энергетики // *Геодинамика и тектонофизика.* 2014. №5(2). с. 547–562. DOI: 10.5800/GT-2014-5-2-0140.
- Лопатин А.П.* Оценка тектонической нарушенности северной части Нижне-Канского гранитоидного массива по данным дешифрирования космических снимков и выделение блоков, перспективных для дальнейших изысканий на размещение хранилища отвержденных РАО // *Исследования гранитоидов Нижне-Канского массива для захоронения РАО: матер. КНТС. СПб., 1999.* 49 с.
- Лосев И.В.* Геодинамическое районирование территории строительства подземной исследовательской лаборатории на основе системного анализа геолого-геофизической информации: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2025. 153 с.
- Лосев И.В., Маневич А.И., Шевчук Р.В., Акматов Д.Ж., Татаринов В.Н.* База данных по геодинамике Нижне-Канского массива v.2.0 (Geodynamics DataBase НКМ v.2.0). Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024625328 от 19.11.2024 г.
- Лукина Н.В.* Активные разломы зоны сочленения Сибирской платформы и Алтае-Саянской орогенетической области // *Бюл. МОИП. Отд. Геолог.* 1996а. Т. 71. Вып. 5. С. 25-32
- Лукина Н.В.* Активные разломы и сейсмичность Алтая // *Геология и геофизика,* 1996б, т. 37 (11), с. 71-74.
- Лукина Н.В.* Нижне-Канский гранитоидный массив: новейшие и современные тектонические движения, морфология и кинематика активных разломов и мегатрещин, современное поле напряжений. Возможности безопасного захоронения ВАО / Сб.: *Исследования гранитоидов Нижне-Канского массива для захоронения РАО. Материалы КНТС. СПб., 1999,* с. 49-59.
- Маневич А.И.* Анализ и мониторинг скоростей деформаций земной поверхности локальных геодинамических полигонов с учетом масштабного эффекта // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* 2020. №6-1. с. 194–203. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-61-0-194-203.

- Маневич А.И., Кафтан В.И., Лосев И.В., Шевчук Р.В.* Развитие сети деформационного ГНСС-мониторинга территории размещения подземной исследовательской лаборатории в Нижне-Канском массиве // Сейсмические приборы. 2021. Т. 57, № 2. С.43–61. <https://doi.org/10.21455/si2021.2-3>.
- Маневич А.И., Шевчук Р. В., Кафтан В.И., Татаринов В.Н., Забродин С.М.* Развитие сети ГНСС-наблюдений в пределах Нижне-Канского массива с использованием скальных геодезических центров // Сейсмические приборы. 2022. Т.58. №4. С. 111–129. DOI: 10.21455/si2020.4-7.
- Маневич А.И., Шевчук Р. В., Кафтан В.И., Татаринов В.Н., Забродин С.М.* Развитие сети ГНСС-наблюдений в пределах Нижне-Канского массива с использованием скальных геодезических центров // Сейсмические приборы. 2022. Т.58. №4. С. 111–129. DOI: 10.21455/si2020.4-7.
- Маневич А.И., Шевчук Р.В., Лосев И.В.* «Программа для расчета компонент деформаций по данным геодезических наблюдений PyGeoStrain 1.0». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021665069 от 17 сентября 2021 г.
- Маневич А.И., Шевчук Р.В., Лосев И.В., Кафтан В.И., Урманов Д.И. Шакиров А.И.* Определение и визуализация параметров движений и деформаций земной поверхности по данным ГНСС-наблюдений в среде Python 3 и QGIS 3 // Геодезия и картография. 2023. №12. с. 17–26. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-1002-12-17-26.
- Марьинских С.Г., Жигарев В.В., Ильина О.А., Крупская В.В.* Определение подвижности глинистых материалов, используемых при создании инженерных барьеров безопасности для изоляции радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2021. № 3 (16). С. 51–60. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-3-51-60.
- Мещеряков Ю.А.* Рельеф и современная геодинамика. – М.: Наука, 1981. – 278 с.
- Морозов В.Н., Кафтан В.И., Татаринов В.Н., Колесников И.Ю., Маневич А.И., Мельников А.Ю.,* Численное моделирование напряженно-деформированного состояния и результаты GPS-мониторинга эпицентральной зоны землетрясения 24 августа 2014 (г. Напа, шт. Калифорния, США) // Геотектоника. 2018а. №5. с. 90 – 102. DOI: 10.1134/S0016853X18040069.
- Морозов В.Н., Маневич А.И.* Механизм формирования разрыва землетрясения Хансин-Авадзи (г. Кобе, Япония) 17.01.1995 М 6.9 // Доклады Академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 499. №2. с. 151–158. DOI: 10.31857/S2686739721080089.
- Морозов В.Н., Татаринов В.Н., Колесников И.Ю., Маневич А.И.* Моделирование напряженно-деформированного состояния эпицентральной зоны сильного землетрясения в Иране

- (26 декабря 2003 г. Mw = 6.6) // Физика Земли. 2018б. № 4. С. 68-78. DOI: 10.1134/S0002333718040087.
- Морозов В.Н., Татаринцов В.Н., Маневич А.И.* Моделирование напряженно-деформированного состояния эпицентральной зоны сильного землетрясения в Турции (Измит, 1999 г., М 7.4) // Вулканология и сейсмология. 2020. №2, с. 43 - 54. DOI: 10.31857/S0203030620020042.
- 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.
- Несмеянов С.А.* Инженерная геотектоника. М.: Наука, 2004. 778
- Несмеянов С.А.* Перспективные направления инженерной геотектоники. М.: Научный мир, 2005. 304 с.
- Николаев Н.И.* Новейшая тектоника и геодинамика литосферы. М.: Недра, 1988. 491 с.
- Никонов А.А.* Активные разломы: определение и проблемы выделения // Геоэкология. 1995. № 4. с. 16–27.
- Никонов А.А.* Голоценовые и современные движения земной коры. М.: Наука, 1977. 240 с.
- Никулов Л.П., Бабкин А.Н., Колямкин В.М., Лещинский С.Л., Сержантов Н.Ф., Рахматуллин Р.Н.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Издание второе. Серия Енисейская. Лист О-46-XXXIV (Сосновоборск). М.: ВСЕГЕИ, 2015.
- НП-032-01. Размещение атомных станций. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности.
- НП-032-02. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций.
- НП-055-14. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности.
- НП-100-17. Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов.
- Особые радиоактивные отходы. Под общей редакцией И.И. Линге. М.: ООО «САМ полиграфист», – 2015 г., 240 с.
- Петухов И.М., Батугина И.М.* Геодинамика недр. М.: Недра. 1999, 287 с.
- Подземная исследовательская лаборатория в Нижне-Канском массиве. [Национальный оператор по обращению с РАО]. URL: <https://www.norao.ru/about/underground/> (20.02.2023).
- Постановление Правительства РФ от 19.10.2012 N 1069 (ред. от 04.02.2015) «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам,

- критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов».
- Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Оценка исходной сейсмичности района и площадки размещения объекта использования атомной энергии при инженерных изысканиях и исследованиях. РБ-019-17. М.: Ростехнадзор, 2017.
- Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Сейсмологический мониторинг участков размещения ядерно- и радиационно опасных объектов. РБ-142-18. М.: Ростехнадзор, 2018.
- Селеев И.Н., Леконцев А.В., Хафизов Р.Р., Перетокин С.А., Панасенко Н.Н., Синельщиков А.В., Яковлев П.В.* Сейсмомикрорайонирование строительной площадки города Железнодорожск // Геология, география и глобальная энергия. 2018. №3(70). С. 224–264.
- СП 115.13330.2016 Геофизика опасных природных воздействий.
- СП 286.1325800.2016 Объекты строительные повышенной ответственности. Правила детального сейсмического районирования.
- СП 408.1325800.2018 Детальное сейсмическое районирование и сейсмомикрорайонирование для территориального планирования.
- Стратегия создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов. [Национальный оператор по обращению с РАО]. URL: <https://www.nogao.ru/upload/Стратегия.pdf> (20.02.2023).
- Стрельников А.А.* Кластеризация сильных землетрясений и сейсмический риск в Иссык-Кульской впадине // Вестник Ин-та сейсмологии НАН КР. 2024. № 2. С. 33–47.
- Татаринов В.Н.* Геодинамическая безопасность на объектах ядерного топливного цикла // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2006. № 1 (85). С.46–51.
- Татаринов В.Н., Кафтан В.И., Маневич А.И., Шевчук Р.В., Забродин С.М.* 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.
- Татаринов В.Н., Маневич А.И., Лосев И.В.* Системный подход к геодинамическому районированию на основе искусственных нейронных сетей // Горные науки и технологии. 2018. №3. с. 14–25. DOI: 10.17073/2500-0632-2018-3-14-25.
- Татаринов В.Н., Морозов В.Н., Кафтан В.И., Маневич А.И.* Современная геодинамика южной части Енисейского кряжа по результатам спутниковых наблюдений // Геофизические исследования. 2018. Т. 19, № 4. С.64–79. DOI: 10.21455/gr2018.

- Татаринов В.Н., Морозов В.Н., Кафтан В.И., Маневич А.И., Татарина Т.А.* Подземная исследовательская лаборатория: задачи геодинамических исследований // Радиоактивные отходы. 2019. № 1(6). С.77–89.
- Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии “Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии”. 2017. НП-064-17.
- Федеральный закон от 11.07.2011 N 190-ФЗ (ред. От 08.12.2020) «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»
- Федеральный закон Российской Федерации от 21 ноября 1995 г. №170 «Об использовании атомной энергии»
- Цебаковская Н.С., Уткин С.С., Капырин И.В., Медянцеv Н.В., Шамина А.В.* Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО / Под ред. И.И. Линге, Ю.Д. Полякова. М.: Изд-во “Комтехпринт”, 2015. 208 с.
- Шевчук Р.В.* Обоснование и разработка метода выявления зон возможного нарушения изоляционных свойств массива горных пород на основе деформационного анализа: дис. ... канд. техн. наук, Москва, 2024. 151 с.
- Шевчук Р.В., Маневич А.И., Акматов Д.Ж., Лосев И.В., Камаев А.А.* Применение спутниковой радарной интерферометрии для анализа смещений земной поверхности // Горная промышленность. 2025. №6. с. 97–104. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-6-97-104.
- Шевчук Р.В., Маневич А.И., Лосев И.В., Алешин И.М., Акматов Д.Ж., Татарина Т.А., Урманов Д.И.* Исследование влияния помех для радиосигнала и параметров измерений на точность ГНСС-определений на локальных геодинамических полигонах // Геодезия и картография. 2024. №8. с. 23–30. DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1010-8-23-30.
- Шевчук Р.В., Маневич А.И., Лосев И.В., Алёшин И.М., Акматов Д.Ж., Татарина Т.А.* Оценка аномальных деформаций земной поверхности Нижне-Канского геодинамического полигона с учетом их пространственной масштабируемости // Геофизические процессы и биосфера. 2025. Т. 24, № 4. С. 23–37. <https://doi.org/10.21455/GPB2025.4-2>
- Allmendinger R., Cardozo N., Fisher D.* Structural Geology Algorithms: Vectors and Tensors. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 287 p. DOI:10.1017/CBO9780511920202.
- Ambraseys N. Long-term seismic activity of the North Anatolian fault // J. Geodynamics. 2002. 34: 313–332.
- Bakun W.H., et al.* Parkfield earthquake sequences: implications for earthquake precursors // Bull. Seismol. Soc. Am. 2005. 95(4): 1223–1233.

- Blewitt G., Hammond W.C., Kreemer C.* Harnessing the GPS Data explosion for interdisciplinary science // *Eos: Earth and Space Science News*. 2018. Vol. 99. DOI: 10.1029/2018EO104623.
- Blewitt G., Kreemer C., Hammond W.C., Gazeaux J.* MIDAS robust trend estimator for accurate GPS station velocities without step detection // *Journal of Geophysical Research*. 2016. Vol. 121. DOI:10.1002/2015JB012552.
- Dong D., Herring T.A., King R.W.* Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data // *J. Geod.* 1998. Vol. 72. p. 201–214.
- Nadeau R.M., McEvelly T.V.* Periodic pulsing of characteristic microearthquakes on the San Andreas Fault // *Science*. 2004. Vol. 303, Iss. 5655. P. 220–222. DOI: 10.1126/science.1090353.
- Gvishiani A.D., Tatarinov V.N., Manevich A.I., Kaftan V.I.* Geodynamic interpretation of modern movements in the southern part of the Yenisei Ridge (in application to the problems of underground isolation of radioactive waste) // *Eurasian Mining*. 2021. №2. 7-11. DOI: 10.17580/em.2021.02.02
- IAEA Safety Standards Series No. NS-G-1.5-21. External Events Excluding Earthquakes in the Design of Nuclear Power Plants.
- IAEA Safety Standards Series No. NS-G-1.6-21. Seismic Design and Qualification for Nuclear Power Plants.
- IAEA Safety Standards Series No. NS-G-3.3. Evaluation of Seismic Hazards for Nuclear Power Plants.
- Manevich A.I., Shevchuk R.V., Losev I.V., Kaftan V.I., Urmanov D.I., Shakirov A.I.* PyGeoStrain: A software package for calculation crustal strain (v1.0). 2023. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7948241>.
- Manevich A.I., Tatarinov V.N., Kolikov K.S.* Detection of crustal deformation anomalies with regard to spatial scale effect // *Eurasian Mining*. 2019. N 2. P.19–22. DOI: 10.17580/em.2019.02.04.
- Morley C.K., et al.* Unraveling Earth's tectonic pulse: Plate motion cycles in the last 20 Myr // *Geology*. 2021. 49(9): 1051–1056.
- Morozov V.N., Tatarinov V.N., Manevich A.I., Losev I.V.* Analogy method to determine the stress-strain state of structural-tectonic blocks of the Earth's crust for the disposal of radioactive waste // *Russian Journal of Earth Science*. 2019. №19. ES6001. DOI: 10.2205/2019ES000687.
- Nadeau R.M., McEvelly T.V.* Periodic pulsing of characteristic microearthquakes on the San Andreas fault // *Science*. 2004. 303(5655): 220–222.
- Sen P.K.* Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau // *Journal of the American Statistical Association*. 1968. Vol. 63. p. 1379–1389. DOI:10.2307/2285891.

- SSG-9. Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2010.
- Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management. IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.14. 2022, 88 p.
- Tatarinov V.N., Aleshin I.M., Tatarinova T.A.* Experience of Space Geodesy Observations at Nuclear Facilities // Seismic Instruments. 2019. N 55. P.676–687. <https://doi.org/10.3103/S0747923919060094>.
- Theil H.* A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis // Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie Wetenschappen, Series A Mathematical Sciences. 1950. Vol. 53. p. 386–392.
- Turner R.C., Shirzaei M., Nadeau R.M., Bürgmann R.* Slow and Go: Pulsing slip rates on the creeping section of the San Andreas Fault // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2015. 120(8): 5940–5951.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Справка об использовании материалов диссертационной работы



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО
РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

Б. Тульская ул., 52, Москва, 115191 · тел: (495) 955 22 86, факс: (495) 958 11 51
pbl@ibrae.ac.ru, www.ibrae.ac.ru · ОГРН 1027700196468, ИНН7726077310, КПП772601001

18 МАЙ 2026

№ 11407/01-0623

На № _____ от _____

Об использовании результатов
диссертационной работы

СПРАВКА

об использовании материалов диссертационной работы
Маневича Александра Ильича на тему «Моделирование и анализ полей современных
движений и деформаций в районе строительства подземной исследовательской
лаборатории Нижне-Канского массива», представленной на соискание ученой степени
кандидата наук по специальности 1.6.21 – «Геоэкология»

Настоящей справкой подтверждаю, что результаты диссертационного исследования Маневича Александра Ильича «Моделирование и анализ полей современных движений и деформаций в районе строительства подземной исследовательской лаборатории Нижне-Канского массива», включая подходы к обработке данных режимных ГНСС-наблюдений, деформационному анализу и оценке интервалов времени накопления критических деформаций, приняты к использованию в ИБРАЭ РАН.

Результаты диссертационного исследования Маневича А.И. на соискание ученой степени кандидата технических наук, включая установленные закономерности пространственно-временной организации современных деформаций на Нижнеканском геодинамическом полигоне, выделение эпизодов активизации деформационных процессов, определение интервалов времени накопления критических деформаций и обоснование участков приоритетного геоэкологического и геодинамического мониторинга, планируются к использованию в ходе реализации ИБРАЭ РАН «Комплексной программы создания подземной исследовательской лаборатории и пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов» (утверждена приказом Генерального директора ГК «Росатом» А.Е. Лихачева от 13.04.2026 № 1/646-П).

Директор



Л.В. Матвеев

Л.В. Матвеев

Исп.
Тел./ Факс: