

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

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

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Коликов Константин Сергеевич

Москва – 2026

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. Батутина 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 «ВНИПИПромтехнологии», 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 $\lambda_{obs} \approx 0.09 \div 0.20 \text{ год}^{-1}$ 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 параметризованой 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).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, связанная с необходимостью геоэкологического обоснования долговременной безопасности подземной изоляции высокоактивных РАО в районе строительства подземной исследовательской лаборатории Нижне-Канского массива; сформулированы цель, идея и задачи работы, приведены научные положения, выносимые на защиту, раскрыты научная новизна, практическая значимость, достоверность результатов, личный вклад автора, апробация и структура диссертации.

В первой главе рассмотрены геодинамические и геоэкологические основы безопасной подземной изоляции высокоактивных РАО, приведена характеристика подземного захоронения как природно-технической системы, проанализированы нормативные требования к геодинамическим исследованиям при обосновании безопасности ПИЛ и ПГЗРО, а также обобщено современное состояние геодинамической изученности района размещения подземной исследовательской лаборатории в Красноярском крае.

Образование радиоактивных отходов является неизбежным следствием эксплуатации объектов ядерного топливного цикла, предприятий оборонно-промышленного комплекса, исследовательских, медицинских и энергетических ядерных технологий. Наибольшую геоэкологическую опасность представляют долгоживущие высокоактивные РАО 1 и 2 классов опасности, период радиобиологической опасности которых превышает 10 тыс. лет. Их изоляция от биосферы не может быть обеспечена только

инженерными решениями, поскольку долговременная безопасность должна сохраняться на интервалах, существенно превышающих расчетный срок функционирования большинства технических барьеров.

Наиболее обоснованным направлением окончательной изоляции высокоактивных РАО является их захоронение в глубоких геологических формациях. Такая система основана на мультибарьерном принципе, при котором безопасность обеспечивается совокупностью инженерных и природных барьеров: матрицей с РАО, контейнером, буферными и закладочными материалами, подземными сооружениями и вмещающим массивом горных пород. При этом на сверхдлительных временных интервалах основная барьерная функция переходит к геологической среде, которая должна сохранять изоляционные свойства, ограничивать миграцию радионуклидов и обеспечивать устойчивость природно-технической системы.

Пункт глубинного захоронения радиоактивных отходов представляет собой сложную природно-техническую систему, состояние которой определяется взаимодействием радиоактивных отходов, инженерных барьеров, комплекса подземных сооружений и структурно-тектонического блока вмещающих пород. Нарушение устойчивости любого из элементов этой системы может привести к изменению напряженно-деформированного состояния массива, развитию трещиноватости, активизации зон повышенной проницаемости и формированию потенциальных путей миграции радионуклидов. Поэтому долговременная безопасность подземной изоляции РАО является не только инженерной, но и геозкологической задачей, связанной с оценкой состояния и эволюции геологической среды.

Одним из определяющих факторов такой оценки являются современные геодинамические процессы. Современные движения земной коры, локальные деформации, градиенты смещений, изменение напряженно-деформированного состояния пород и возможная активизация разломных структур могут снижать устойчивость вмещающего массива и ухудшать его изоляционные свойства. В связи с этим геодинамические и сейсмотектонические исследования входят в обязательный комплекс работ при обосновании безопасности объектов использования атомной энергии, включая ПИЛ и ПГЗРО.

Отечественные нормативные документы и рекомендации МАГАТЭ предусматривают изучение геодинамических и сейсмотектонических условий района и площадки размещения объекта, выделение активных разломов, геодинамически опасных зон и зон возможного возникновения очагов землетрясений, а также организацию режимного сейсмического, геотехнического и геодинамического мониторинга. Однако практическая реализация этих требований осложняется тем, что для района Нижне-Канского массива отсутствует достаточный объем крупномасштабных геологических и тектонических материалов, а существующие схемы разломно-блокового строения различаются между собой и не всегда имеют однозначное геолого-геофизическое обоснование.

В таких условиях прямое использование нормативного понятия «активный разлом» становится методически затрудненным. Для слабоактивных платформенных территорий, характеризующихся низкими скоростями современных движений, редкой сейсмичностью и недостаточной выраженностью поверхностных признаков активности, традиционная разломная интерпретация не всегда позволяет надежно перейти к количественной оценке опасности для объекта со сверхдлительным сроком функционирования. Поэтому особое

значение приобретает анализ современных движений и деформаций земной коры как инструментально наблюдаемого проявления текущего состояния геологической среды.

Данные режимного ГНСС-мониторинга позволяют оценивать скорости современных движений земной поверхности, рассчитывать параметры деформационного поля, выявлять пространственную неоднородность деформаций и локализовать участки с потенциально неблагоприятным геодинамическим режимом. Такой подход не подменяет геологическую и сейсмотектоническую интерпретацию, но обеспечивает количественную основу для оценки состояния структурно-тектонического блока, вмещающего подземную исследовательскую лабораторию, особенно в условиях неопределенности разломной модели района.

В этой связи появилась объективная необходимость использования формализованного количественного подхода к анализу современных движений и деформаций земной коры для оценки состояния геологической среды и выделения потенциально неблагоприятных участков в районе строительства ПИЛ. На основании результатов выполненного анализа геоэкологических и геодинамических условий подземной изоляции высокоактивных РАО, нормативных требований и современного состояния изученности района исследования были сформулированы цель, идея и основные задачи диссертационной работы.

Во второй главе изложены методические основы деформационного анализа ГНСС-данных, рассмотрены подходы к оценке скоростей современных движений земной коры, приведена методика расчета компонент тензора плановых деформаций по дискретным геодезическим наблюдениям, охарактеризована сеть ГНСС-пунктов Нижне-Канского геодинамического полигона и обоснованы требования к методике ГНСС-измерений и геометрии наблюдательной сети.

Методическая основа исследования современных деформаций земной коры базируется на использовании данных режимных ГНСС-наблюдений, позволяющих перейти от приращений координат геодезических пунктов к количественным параметрам движений и деформаций земной поверхности. Исходными величинами являются смещения пунктов и скорости смещений, определяемые по результатам повторных высокоточных измерений. Эти параметры отражают кинематику современных движений земной коры и служат основой для последующего расчета деформационных характеристик, необходимых для геодинамической и геоэкологической интерпретации состояния вмещающего массива.

Смещения земной поверхности определяются как приращения координат пунктов между двумя эпохами наблюдений. В зависимости от организации мониторинга интервал между измерениями может составлять от нескольких суток до нескольких лет, а при использовании постоянно действующих ГНСС-станций – задаваться на этапе обработки временных рядов. Для задач оценки геодинамического режима особое значение имеют не отдельные смещения, а их пространственное распределение, поскольку именно оно позволяет выявлять неоднородность движения блоков земной коры, локальные градиенты смещений и возможные зоны концентрации современных деформаций.

Скорости современных движений земной коры рассчитываются как отношение смещения пункта к продолжительности соответствующего временного интервала. Полученное поле скоростей характеризует среднюю кинематику земной поверхности за период наблюдений и используется как входной массив для деформационного анализа. При этом точность определения скоростей зависит от продолжительности рядов наблюдений, устойчивости пунктов, качества спутниковых измерений, условий видимости небосвода,

повторяемости методики полевых работ и корректности геодезической обработки. Для слабоактивных платформенных областей, к которым относится район Нижне-Канского массива, это имеет принципиальное значение, поскольку ожидаемые смещения сопоставимы с инструментальными погрешностями.

Переход от скоростей отдельных ГНСС-пунктов к параметрам деформационного поля выполняется на основе классического деформационного анализа дискретных геодезических данных. В пределах элементарных участков, заданных системой пунктов наблюдений, поле горизонтальных скоростей аппроксимируется линейной моделью, а затем рассчитываются компоненты тензора плановых деформаций. Такой подход позволяет перейти от локальных векторов движения к физически содержательным характеристикам деформационного режима: главным деформациям (1), дилатации (2), полному сдвигу (3), угловой скорости вращения (4):

$$E_1, E_2 = \frac{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}}{2} \pm \sqrt{\frac{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{12} + \varepsilon_{21})^2}{4}}, \quad (1)$$

$$\Delta = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}, \quad (2)$$

$$\gamma_m = \sqrt{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{12} + \varepsilon_{21})^2}, \quad (3)$$

$$\varphi_1 = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(\frac{\varepsilon_{12} + \varepsilon_{21}}{\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}} \right), \quad (4)$$

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

Главные деформации характеризуют направления и величины максимального растяжения и сжатия, дилатация отражает изменение площади элементарного участка, а полный сдвиг показывает интенсивность формоизменения без учета изменения площади. Совместный анализ этих параметров позволяет выделять участки горизонтального растяжения, сжатия, сдвигового деформирования и смешанных деформационных режимов. Именно эти характеристики имеют основное значение для интерпретации современного напряженно-деформированного состояния геологической среды, поскольку они позволяют оценивать не только величину перемещений, но и тип деформационного процесса.

ГНСС-наблюдения на Нижне-Канском геодинимическом полигоне выполняются в условиях, осложняющих достижение предельной точности измерений: таежная растительность, ограниченная видимость спутников, сложность обеспечения стабильных условий установки антенн и необходимость строгого соблюдения единой методики полевых работ. В этих условиях основным требованием является получение субсантиметровой точности, достаточной для выявления малых современных движений и деформаций. Практически значимыми являются плановые смещения на уровне первых миллиметров и высотные смещения на уровне нескольких миллиметров, поскольку именно такой порядок величин соответствует ожидаемым современным движениям в слабоактивной платформенной области.

Сформированная методическая схема обеспечивает последовательный переход от результатов ГНСС-измерений к параметрам деформационного поля, пригодным для геодинимической и геоэкологической интерпретации. Она позволяет рассматривать современные движения земной поверхности не как набор изолированных геодезических величин, а как количественную характеристику состояния геологической среды. На этой основе становится возможным выявление пространственных градиентов деформаций, оценка деформационных режимов, локализация аномальных участков и последующее

использование полученных параметров при обосновании долговременной безопасности подземной изоляции радиоактивных отходов.

В третьей главе представлены результаты анализа современных движений и деформаций земной коры на Нижне-Канском геодинамическом полигоне по данным ГНСС-наблюдений 2012–2024 гг., выполнена оценка поля скорости современных движений земной коры, пространственно-временной изменчивости деформационных параметров, ориентации главных осей деформаций и деформационных режимов, а также проведена нормативная оценка степени опасности выявленных смещений и деформационных аномалий.

Результаты режимных ГНСС-наблюдений за 2012–2024 гг. позволяют охарактеризовать современное поле движений земной коры в районе строительства ПИЛ как слабоконтрастное по величине смещений, но неоднородное по пространственно-временной структуре деформаций. Измерительная сеть Нижне-Канского геодинамического полигона охватывает территорию строительной площадки, пересекает основные локальные тектонические нарушения и позволяет сопоставлять инструментально определяемые смещения с разломно-блоковым строением района. По результатам обработки наблюдений получены временные ряды смещений и скорости горизонтальных движений для 27 геодезических пунктов за разные интервалы наблюдений 2012–2024 гг.

Пространственное распределение векторов скоростей не формирует устойчивой картины направленного регионального смещения или выраженной современной тектонической перестройки территории (рис. 1). Среднегодовые скорости горизонтальных смещений на отдельных пунктах в основном составляют 1–3 мм/год, а максимальные суммарные смещения за весь период наблюдений достигают порядка 30–35 мм. Направления перемещений изменяются во времени, что указывает не на однонаправленное накопление смещений, а на локальный, переменный и частично компенсированный характер современных движений. Для слабоактивной платформенной области такая картина соответствует фоновому геодинамическому режиму, в котором значимыми становятся не абсолютные величины смещений, а их пространственные градиенты и изменение деформационного поля во времени.

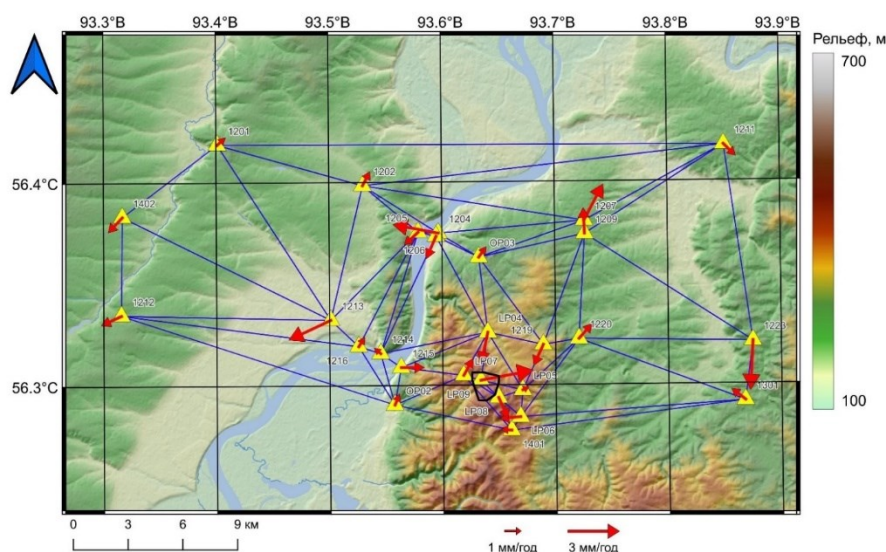


Рисунок 1 – Векторы скоростей смещений, установленные по результатам ГНСС-наблюдений за период с 2012 по 2024 гг.

Деформационный анализ горизонтальных смещений позволил перейти от векторного поля скоростей к количественной оценке параметров современного деформационного режима. Для расчетных элементов были определены компоненты тензора плановых деформаций, главные деформации, дилатация и полный сдвиг. Дилатация использовалась как показатель преобладания растяжения или сжатия земной поверхности, а полный сдвиг – как характеристика интенсивности формоизменения и возможных сдвиговых смещений. Такой переход принципиален для геоэкологической интерпретации, поскольку именно деформационные параметры отражают потенциальное изменение состояния вмещающего массива, а не только кинематику отдельных пунктов наблюдений.

Распределение дилатационных деформаций показывает выраженную изменчивость во времени: участки растяжения и сжатия меняют положение, амплитуду и пространственную конфигурацию в разные эпохи наблюдений (рис. 2). На отдельных временных интервалах выделяются локальные зоны преобладающего сжатия или растяжения, однако на более длительном интервале их влияние частично компенсируется. Это указывает на псевдоциклический характер современного деформационного режима, при котором фазы локальной активизации сменяются фазами относительного выравнивания поля деформаций.

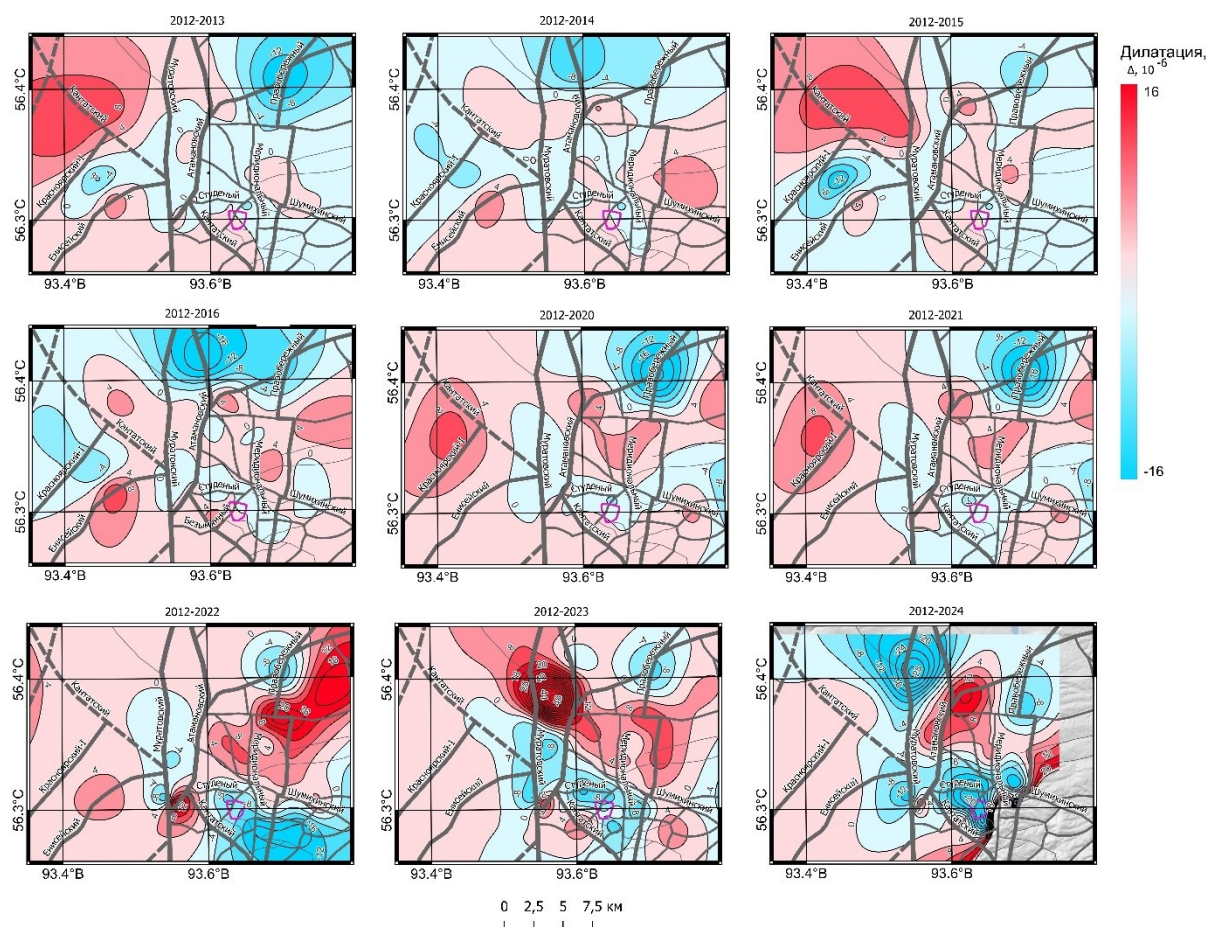


Рисунок 2 – Динамика пространственного распределения дилатационных деформаций на территории геодинамического полигона за период 2012–2024 гг. Серые линии – тектонические разломы

Сдвиговые деформации имеют более устойчивую связь с кинематикой локальных блоковых смещений и позволяют выявлять зоны повышенного формоизменения земной поверхности (рис. 3). Максимумы полного сдвига в разные годы локализуются неодинаково, но часть из них пространственно тяготеет к участкам сочленения или пересечения разломных структур. Такие зоны не следует автоматически отождествлять с активными разломами в нормативном смысле, однако они представляют интерес как участки повышенной деформационной неоднородности, требующие учета при геоэкологической и геодинамической интерпретации состояния массива.

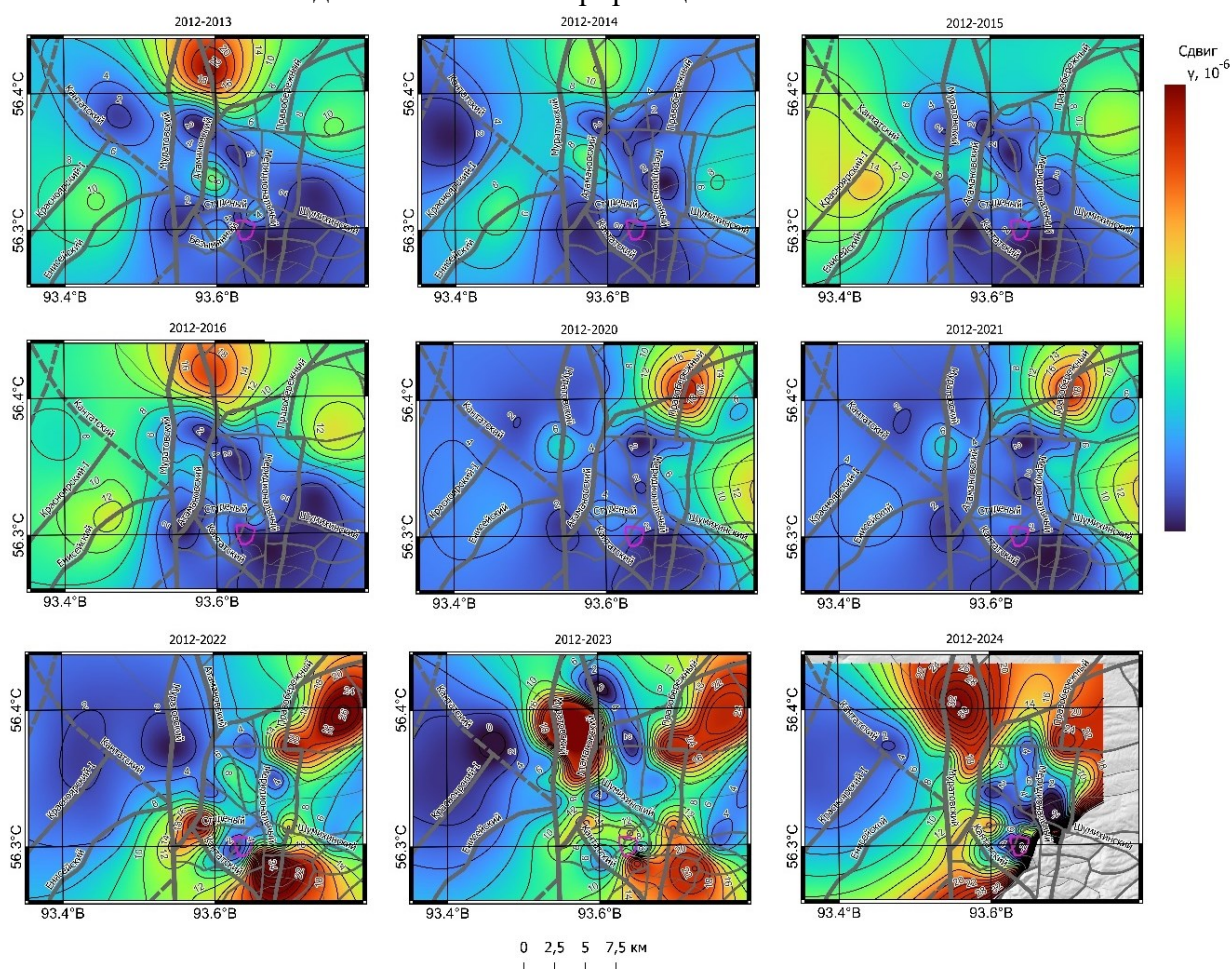


Рисунок 3 – Динамика пространственного распределения сдвиговых деформаций на территории геодинамического полигона за период 2012–2024 гг. Серые линии – тектонические разломы

Нормативная оценка степени опасности была выполнена через расчет градиентов скоростей горизонтальных и вертикальных движений с последующим сопоставлением с классификационными критериями НП-064-17. Полученные значения градиента скорости горизонтальных движений на большей части территории находятся в пределах низких значений и после учета временного масштабного эффекта соответствуют III степени опасности – процессу, не представляющему опасности в заданном интервале времени (рис. 4). Это означает, что по формальным нормативным критериям за период наблюдений не выявлены признаки интенсивного современного геодинамического процесса, способного непосредственно угрожать устойчивости объекта.

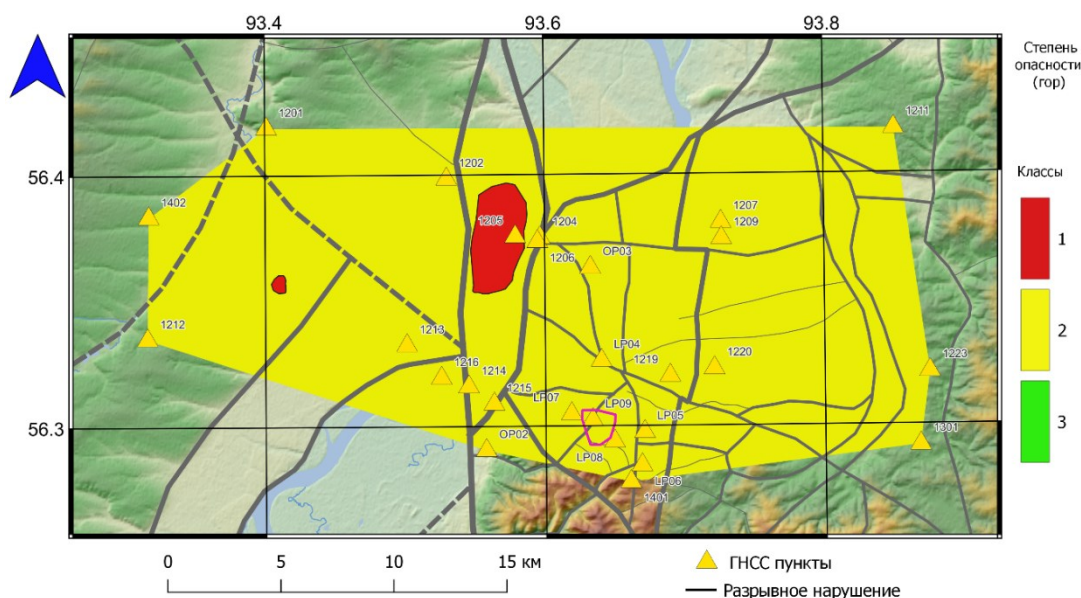


Рисунок 4 – Карта степеней опасности по НП-064-17 $|grad V_{гор}|$ за период 2012-2024 гг. по данным ГНСС-наблюдений

Вместе с тем отсутствие нормативно опасных градиентов не исключает необходимости дальнейшего анализа пространственно-временной структуры деформационного поля. Результаты показывают, что район размещения ПИЛ характеризуется слабым по амплитуде, но нестационарным деформационным режимом, в котором локальные аномалии возникают, смещаются и частично компенсируются во времени. Поэтому для задач долговременной безопасности ПГЗРО основное значение имеет не только фиксация текущих скоростей смещений, но и выявление повторяющихся участков деформационной неоднородности, оценка их кинематического режима и последующее включение этих участков в систему приоритетного геоэкологического и геодинамического мониторинга.

Таким образом, по результатам ГНСС-наблюдений 2012–2024 гг. установлено, что современное деформационное поле Нижне-Канского геодинамического полигона характеризуется пространственно-временной нестационарностью, выраженной в перестройке ориентации главных осей деформаций, смене локальных режимов растяжения, сжатия и сдвига, а также в эпизодической локализации деформационных аномалий в пределах структурно-тектонического блока, вмещающего площадку ПИЛ. При этом выявленные аномалии не формируют устойчивой однонаправленной тенденции накопления деформаций и на длительных интервалах наблюдений частично компенсируются, что указывает на циклический и неоднородный характер современных движений земной коры. Полученные результаты обосновывают первое научное положение о том, что геоэкологическая оценка состояния геологической среды в районе размещения ПИЛ должна опираться не только на абсолютные величины смещений, но и на анализ пространственно-временной изменчивости деформационного поля, отражающей текущую динамику структурно-тектонического блока.

В четвертой главе разработана и параметризована модель учета цикличности современных деформационных процессов для оценки критических деформаций в районе размещения ПИЛ; выполнена оценка интенсивности активизаций современных

деформаций, выделены временные интервалы активизации деформационного режима и рассчитано время накопления опасных значений деформаций, используемое для выделения зон приоритетного геоэкологического и геодинамического мониторинга.

Современные движения и деформации земной коры имеют не строго равномерный, а импульсно-циклический характер. Периоды относительной стабилизации сменяются фазами активизации, в течение которых возрастают скорости смещений, изменяются параметры деформационного поля и формируются локальные зоны повышенной деформационной неоднородности. Для объектов подземной изоляции высокоактивных РАО это обстоятельство имеет принципиальное значение, поскольку оценка долговременной безопасности не может основываться только на средних скоростях современных движений за короткий инструментальный интервал. Необходим переход к модели, учитывающей повторяемость активизаций, их интенсивность, длительность деформационного импульса и пространственный масштаб нормируемого элемента.

Количество активизаций современных деформационных процессов за период эксплуатации объекта задается через среднюю интенсивность λ , а допустимый уровень средней опасной деформации определяется с учетом срока эксплуатации, числа импульсов и длительности активной фазы. Для этого используется модель средней опасной деформации $\bar{\varepsilon}_{avg}$, учитывающая интенсивность активизаций λ , расчетный срок T и длительность импульса ΔT_A (5):

$$\bar{\varepsilon}_{avg}(T) = \frac{\varepsilon_{max}}{(2\lambda T + 1) \times \Delta T_A}, \quad (5)$$

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

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

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

ΔT_A – длительность импульса современного деформационного процесса, лет;

рассматриваемого временного интервала T

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.

Параметризация модели выполняется с учетом разных сценариев цикличности современных деформационных процессов. В качестве расчетных сценариев выделяются межгодовые, десятилетние и вековые активизации, различающиеся интервалом цикла, количеством активизаций за 10 тыс. лет, интенсивностью λ и длительностью активного импульса ΔT_A (табл. 1). Эти параметры не рассматриваются как строго периодические константы, а задают интервальные оценки квазипериодического деформационного режима. Для долговременной оценки сезонные колебания исключаются, поскольку они не отражают устойчивую геодинамическую опасность для вмещающего массива.

Значимым условием расчета является учет пространственной масштабируемости деформаций. Один и тот же уровень относительной деформации имеет различное значение для структурно-тектонического блока, участка, локальной площадки и подземной выработки. Поэтому расчетные значения средней опасной деформации приводятся к пространственному масштабу нормируемого элемента. Для этого используются регрессионные зависимости средней опасной деформации от площади S расчетного элемента для межгодового, десятилетнего и векового сценариев цикличности (6–8):

Для межгодового сценария:

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

Для десятилетнего сценария:

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

Для векового сценария:

$$\bar{\varepsilon}_{avg}^3 = -8.46 \times 10^{-7} \ln(S) + 3.16 \times 10^{-6}, \quad (8)$$

Эти зависимости позволяют интерполировать критические значения $\bar{\varepsilon}_{avg}$ для промежуточных площадей конечных элементов и сопоставлять результаты деформационного анализа с расчетными критериями долговременной опасности (рис. 5).
де S – площадь нормируемого конечного элемента, км².

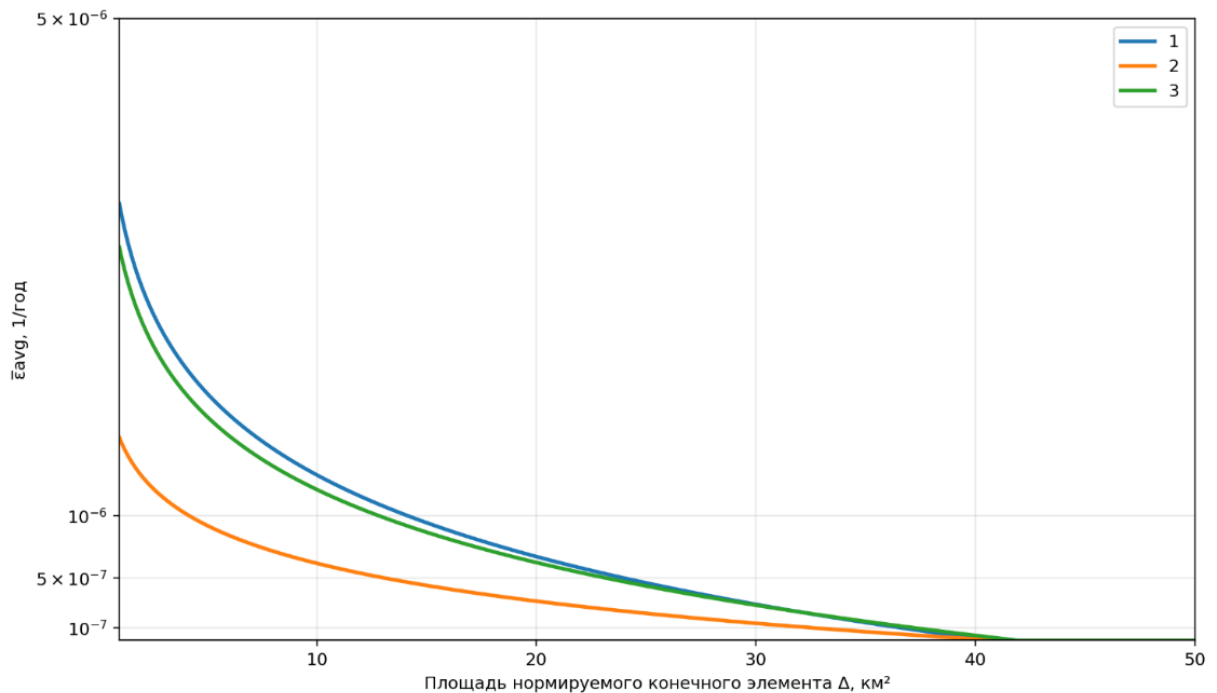


Рисунок 5 – Регрессионные зависимости средней опасной деформации $\bar{\varepsilon}_{avg}$ от площади треугольников. 1 – межгодовая модель цикличности; 2 – десятилетняя модель цикличности; 3 – вековая модель цикличности

Таблица 1 – 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	$(0.05-0.2) \times T$

Пространственно-временной анализ деформационного поля по регулярной расчетной сетке позволяет выделить интервалы активизации современных деформационных процессов. Активным состоянием считается такое состояние ячейки, при котором параметры дилатации или полного сдвига превышают фоновый уровень и отражают локальную перестройку деформационного режима. Для каждой ячейки определяется число независимых интервалов активизации, после чего рассчитывается наблюдаемая межгодовая интенсивность λ_{obs} . Полученные значения показывают, что деформационное поле Нижне-Канского геодинамического полигона за период инструментальных наблюдений реализуется преимущественно в межгодовом–субдесятилетнем режиме: $\lambda_{obs} \approx 0,09–0,20 \text{ год}^{-1}$ (рис. 6).

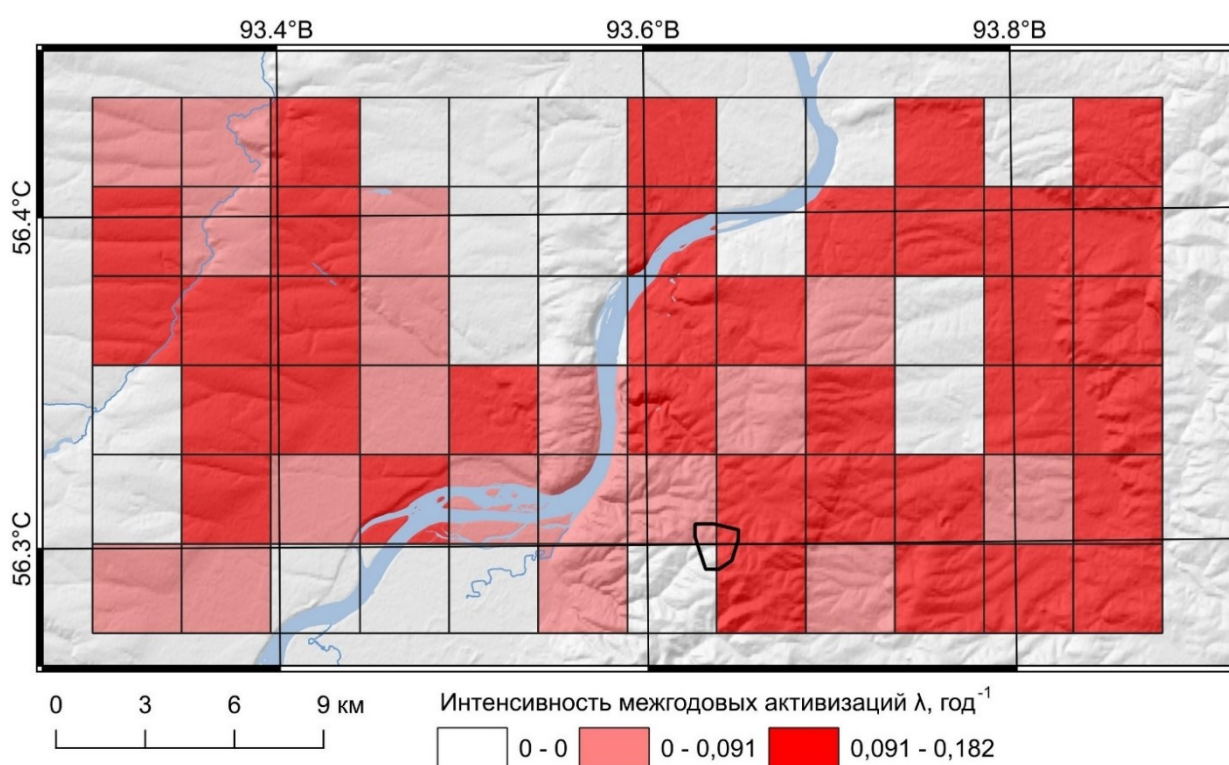


Рисунок 6 – Межгодовая интенсивность активизаций λ_{obs}

Кинематическая интерпретация расчетных ячеек показывает, что фоновым режимом для большей части территории является сдвиговый режим, однако в центральной части полигона, особенно вблизи долины р. Енисей, формируются участки смешанного деформирования. Здесь выделяются зоны сдвига с растяжением и сдвига со сжатием, соответствующие режимам сдвига с растяжением и сдвига со сжатием (рис. 7). Такие участки имеют повышенное значение для оценки состояния массива, поскольку именно сочетание сдвиговой компоненты с растяжением или сжатием может способствовать локализации деформаций, раскрытию трещин, дроблению пород и изменению фильтрационно-прочностных свойств геологической среды.

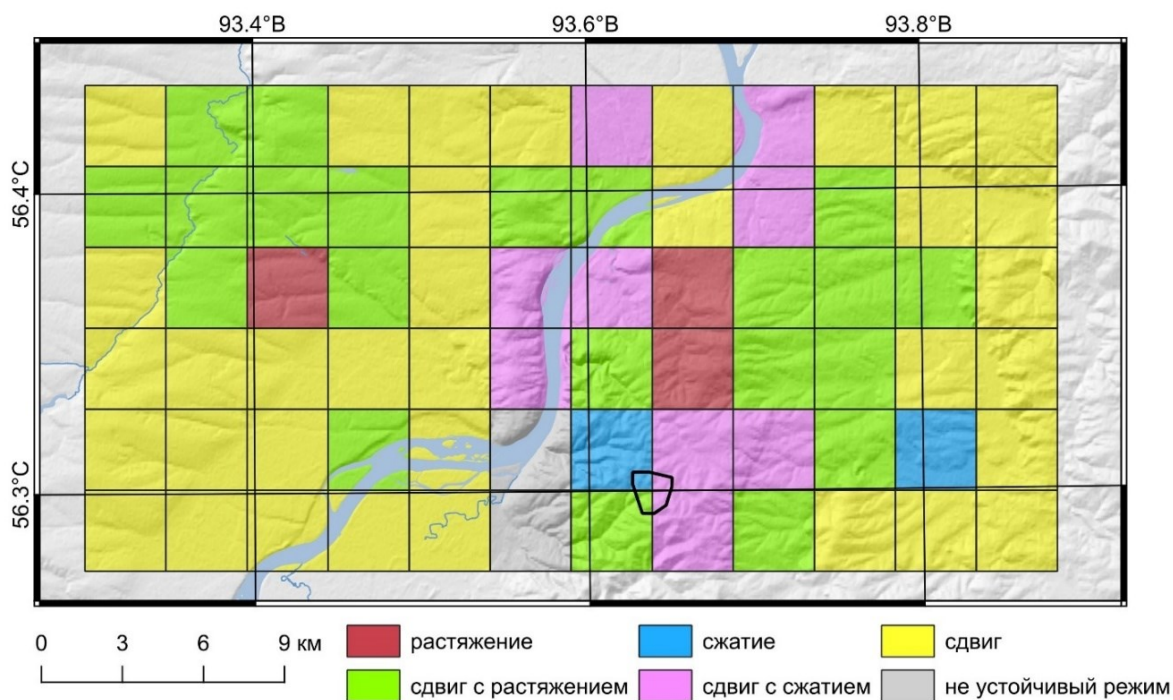


Рисунок 7 – Распределение ячеек по преобладающему кинематическому режиму

Используя значения регрессионных зависимостей средней опасной деформации (формулы 6-8) и измеренные значения межгодовой интенсивности активизаций ячеек λ_{obs} (рис. 6) вычислим условный срок накопления опасной деформации дилатации и полного сдвига для условий деформационного режима геодинамического полигона Нижне-Канского массива:

$$T = \frac{\bar{\epsilon}_{avg}}{\bar{\epsilon}_{obs} \times \lambda_{obs}}, \quad (8)$$

где $\bar{\epsilon}_{avg}$ – значения средней опасной деформации, вычисленные по модели интенсивности активизаций λ СДЗК (рис. 5, табл. 1), $\bar{\epsilon}_{avg} = 5.5 \times 10^{-6}$, 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. 6).

Поле времени накопления опасной деформации имеет выраженную пространственную неоднородность. Минимальные сроки накопления опасных значений полного сдвига приурочены к центральной и центрально-восточной частям территории, главным образом восточнее долины р. Енисей и в южной части центрального сектора (рис. 8). Для деформаций дилатации наиболее короткие сроки характерны для северной, северо-восточной и восточной частей полигона (рис. 9). Наибольшую значимость для геоэкологического и геодинамического контроля имеют зоны, где малое время накопления критической деформации сочетается со смешанными кинематическими режимами – сдвигом с растяжением и сдвигом со сжатием.

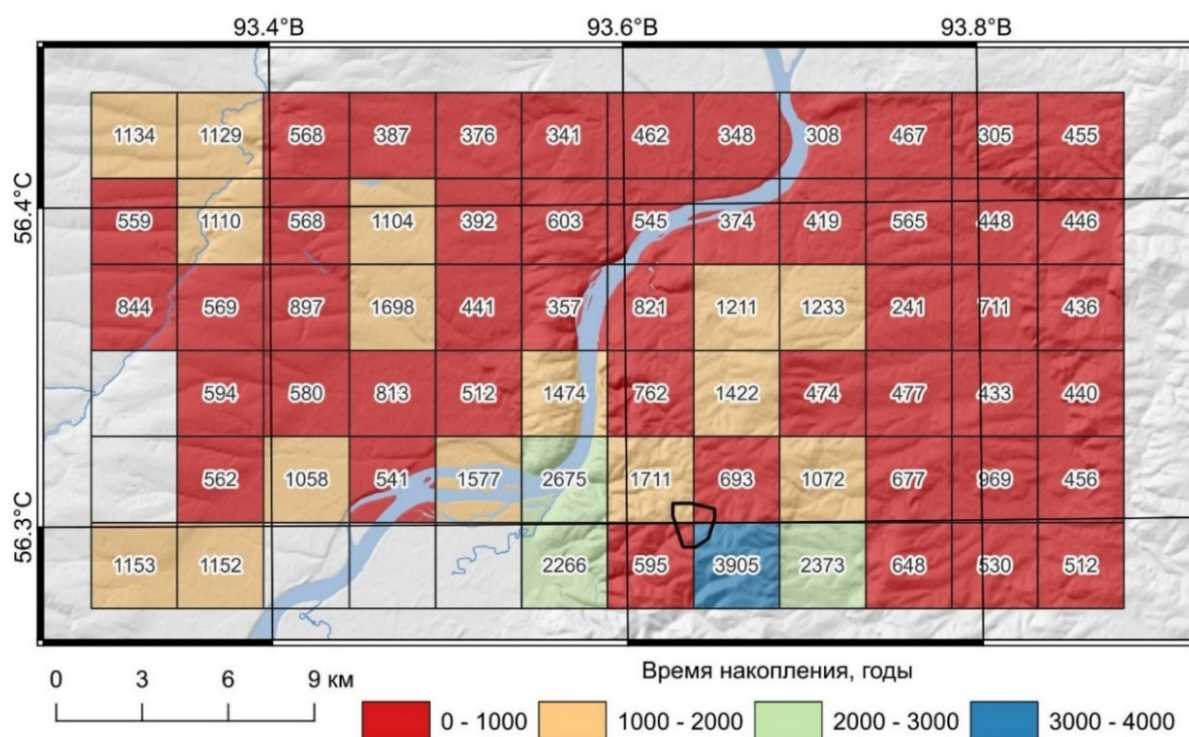


Рисунок 4.12 – Распределение ячеек по времени накопления опасных значений деформации полного сдвига

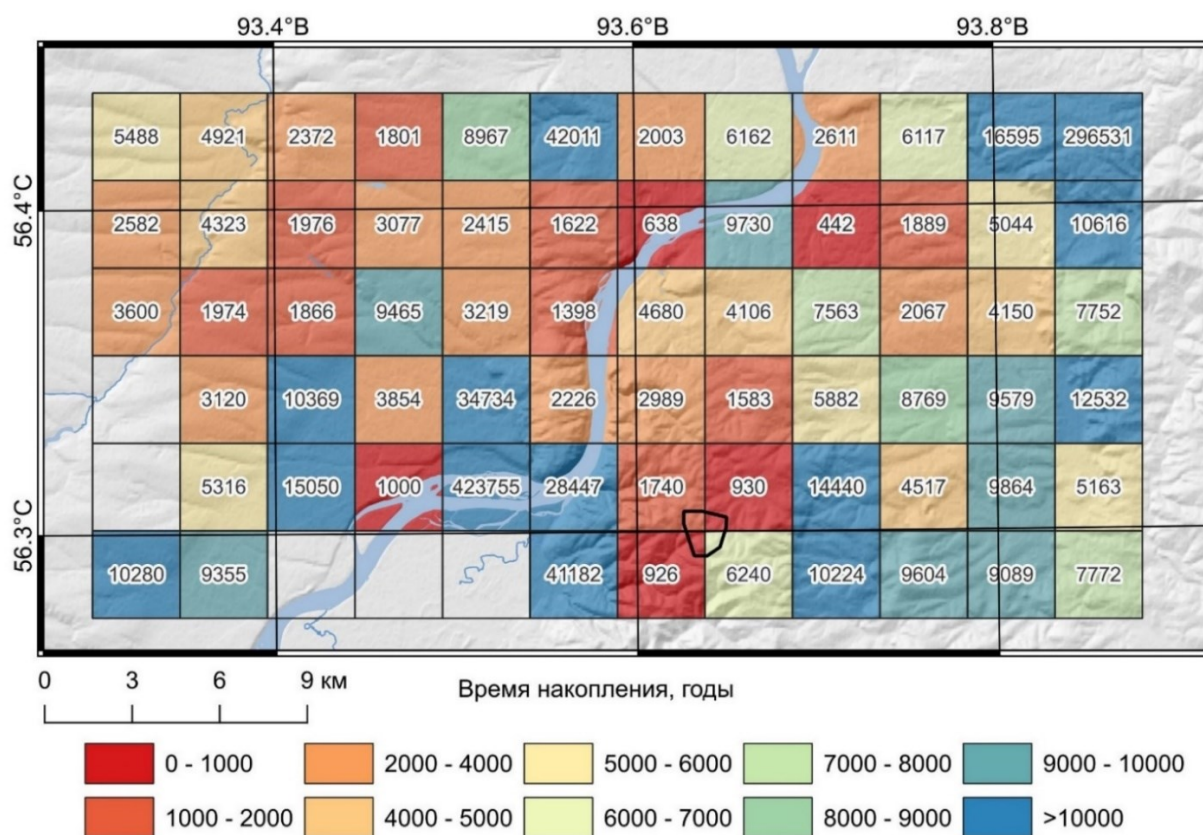


Рисунок 4.13 – Распределение ячеек по времени накопления опасных значений деформации дилатации

Таким образом, разработанная и параметризованная модель учета цикличности современных деформационных процессов обеспечивает переход от инструментально наблюдаемых скоростей деформаций к расчетной оценке критических деформаций, значимых для геоэкологического обоснования безопасности подземной изоляции РАО. Учет пространственной масштабируемости, интенсивности активизаций λ , числа активизаций N и длительности импульса современного деформационного процесса ΔT_A позволил определить расчетные пороговые значения средней опасной деформации для разных временных сценариев и пространственных масштабов, что отражает второе научное положение. На основе анализа пространственно-временной изменчивости деформационного поля Нижне-Канского геодинамического полигона установлена наблюдаемая интенсивность активизаций $\lambda_{obs} \approx 0,09-0,20 \text{ год}^{-1}$, рассчитаны интервалы времени накопления критических деформаций и выделены участки, требующие приоритетного геоэкологического и геодинамического мониторинга, что составляет содержание третьего научного положения.

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, проводимых совместно с ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами». Полученные результаты применяются при эксплуатации геодинимического полигона ПИЛ, а также при реализации научной программы геодинимических 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.

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы: В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, и входящих в международную систему цитирования Web of Science/SCOPUS:

1. **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.
2. **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.
3. **Manevich A.I.,** Tatarinov V.N., Kolikov K.S. Detection of crustal deformation anomalies with regard to spatial scale effect // Eurasian mining. 2019. №2. p. 19 - 22.
4. **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>.
5. **Маневич А.И.,** Шевчук Р. В., Кафтан В.И., Татаринцов 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.
6. Шевчук Р.В., **Маневич А.И.,** Лосев И.В., Алешин И.М., Акматов Д.Ж. Татаринцова 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.
7. Гвишиани А.Д., Татаринцов В.Н., Кафтан В.И., **Маневич А.И.,** Дзедобоев Б.А., Лосев И.В. Скорости современных горизонтальных движений земной коры в южной части Енисейского кряжа по результатам ГНСС-измерений // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 493, № 1. С. 73-77.
8. Гвишиани А.Д., Татаринцов 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.
9. Татаринцов 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.
10. Шевчук Р.В., **Маневич А.И.,** Лосев И.В., Алёшин И.М., Акматов Д.Ж., Татаринцова Т.А. Оценка аномальных деформаций земной поверхности Нижнеканского геодинамического полигона с учетом их пространственной масштабируемости // Геофизические процессы и биосфера. 2025. Т. 24, № 4. С. 23–37.

Программы для ЭВМ:

1. **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.
2. 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 NKM v.2.0). Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024625328 от 19.11.2024 г.