

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

---

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

*На правах рукописи*

**Шевчук Роман Васильевич**

**ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДА ВЫЯВЛЕНИЯ ЗОН ВОЗМОЖНОГО  
НАРУШЕНИЯ ИЗОЛЯЦИОННЫХ СВОЙСТВ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД НА  
ОСНОВЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО АНАЛИЗА**

Специальность 2.8.3

«Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское  
дело и геометрия недр»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук доцент  
Тухель Екатерина Андреевна

Москва, 2024

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность.** Важным компонентом обеспечения технологической и геоэкологической безопасности при строительстве и эксплуатации подземных инженерных сооружений, предназначенных для длительного хранения и захоронения экологически опасных материалов, включая высокоактивные радиоактивные отходы (РАО), является установление зон возможного нарушения изоляционных свойств породного массива. Выявление таких участков с потенциальным риском нарушения гидроизоляционных свойств пород проводится на основе режимного маркшейдерско-геодезического мониторинга. Результаты мониторинга служат основой для принятия своевременных и эффективных мер по предотвращению возможных аварийных ситуаций.

Проект создания подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ), строительство которой начато в 2022 году, в гранитогнейсовых породах Нижне-Канского массива на глубине 500 м направлен на обоснование безопасности изоляции высокоактивных РАО в геологических формациях. Уникальность подземного объекта глубинного захоронения РАО, предполагаемый срок эксплуатации которого более 10 тыс. лет, предъявляет особые требования к геодинамическому режиму района создания ПИЛ.

В тектонически слабоактивных районах, включая Нижне-Канский массив, современные движения земной коры крайне незначительны. Надежность результатов маркшейдерско-геодезических работ связана с необходимостью обеспечения прецизионной точности полевых измерений. Международный опыт последних десятилетий подтвердил эффективность применения средств ГНСС (глобальной навигационной спутниковой системы) для выявления малых смещений земной поверхности, обусловленных тектоническими и техногенными факторами. Точность ГНСС-измерений на постоянных станциях в настоящее время достигает субсантиметрового уровня, что открывает новые перспективы для деформационного мониторинга. Однако, для локальных геодинамических полигонов по ряду причин она ниже. Повышение эффективности ГНСС-мониторинга требует совершенствования процесса наблюдений и обработки данных. Это включает в себя оптимизацию структуры геодинамической сети, оперативный контроль точности полевых измерений, применение современных алгоритмов обработки и деформационного анализа. В этой связи, разработка метода выявления зон возможного нарушения изоляционных свойств массива горных пород на основе деформационного анализа, обеспечивающих достоверность и надежность данных о современных движениях земной коры в районе захоронения высокоактивных РАО, является актуальной научно-технической задачей.

**Целью работы** является выявление зон возможного нарушения изоляционных свойств массива горных пород для обеспечения безопасности захоронения высокоактивных радиоактивных отходов в геологических формациях Нижне-Канского массива.

**Идея работы** заключается в повышении достоверности оценки деформаций верхней части земной коры для выявления зон возможного нарушения изоляционных свойств массива горных пород на основе анализа параметров, описывающих деформации земной поверхности.

**Основные задачи исследования.**

1. Изучить опыт применения маркшейдерско-геодезических наблюдений за современными движениями земной коры (СДЗК) для выявления зон возможного нарушения изоляционных свойств массива на локальных геодинамических полигонах, а также проанализировать нормативную базу, регулирующую данный процесс.

2. Разработать метод наблюдений за СДЗК средствами ГНСС, включающий оперативный контроль работы ГНСС-приемников в физико-географических условиях района расположения объекта.

3. Исследовать и оптимизировать геодезическую сеть, а также провести опробование метода на Нижне-Канском геодинамическом полигоне.

4. Разработать теоретические положения метода деформационного анализа данных ГНСС-наблюдений с учетом тектонических особенностей района.

5. Разработать графические построения, отражающие временные и пространственные изменения параметров деформаций на геодинамическом полигоне Нижне-Канского массива в течение периода с 2010 по 2021 годы.

6. Провести анализ построенных карт для выявления возможных участков нарушения изоляционных свойств породного массива в районе строительства ПИЛ.

**Методы исследования включают:** анализ научной и нормативно-методической литературы, оценка горно-геологических и физико-географических условий района строительства ПИЛ, полевые маркшейдерско-геодезические наблюдения средствами ГНСС, методы проектирования геодезических сетей, математические методы обработки, анализа и интерпретации данных. В качестве программного обеспечения использовались программы Matlab 6.5, MathCad 14, MAGNET Office Tools 7.2, QGIS.

**Основные научные положения, выносимые на защиту:**

1. Разработан комплексный метод проведения полевых ГНСС-наблюдений и деформационного анализа, позволяющий на основе пространственно-временного поведения характеристик деформаций земной поверхности выявить зоны возможного нарушения изоляционных свойств массива горных пород.

2. Для районов, отличающихся степенью геодинамической активности по данным режимных ГНСС-наблюдений установлены зависимости разграничивающие зоны опасных и неопасных деформаций, которые могут служить прогностическими признаками геодинамической устойчивости породных массивов.

3. Установлено, что повышение точности контроля ГНСС-приемников до уровней 1.5 – 2.5 мм в плане и 2.5 мм по высоте возможно за счет разработанной методики полевого контроля, изготовления и установки унифицированных центров ГНСС-пунктов на выходах коренных скальных пород и улучшения внутренней геометрии маркшейдерско-геодезической сети.

**Научная новизна работы** состоит в:

1. Разработан метод полевого контроля точности ГНСС-аппаратуры, позволяющий выявлять ошибочные параметры измерительных средств и обеспечить надежную регистрацию субсантиметровых движений и деформаций земной поверхности для тектонически умеренно-активных районов.

2. Установлены пространственные закономерности скоростей деформаций, вызванных тектоническими процессами, для различных по масштабу иерархических уровней и типов напряженного состояния участков земной коры, позволяющие априорно классифицировать деформаций на два класса, характерных для геодинамического режима исследуемого района: «относительно неопасные», и превышающие их, которые считаем «опасными».

3. Разработан новый метод деформационного анализа, отличающийся тем, что оценивается пространственно-временная динамика изменения компонент тензора деформаций земной коры, получаемых на основе режимных наблюдений средствами ГНСС, позволяющая выявить взаимосвязь кинематики движений и параметров деформаций с зонами возможного нарушения изоляционных свойств пород.

4. Установлены тенденции плановых смещений пунктов ГНСС за 2012-2021 гг., подтверждающие нелинейный геодинамический режим территории, проявляющийся в квазициклическом характере развития во времени и разнонаправленном движении блоков. Зафиксировано два цикла смены направлений движений (время цикла около 2-3 лет).

5. Впервые получены фундаментальные данные о характере горизонтальных движений в районе контакта двух региональных тектонических структур Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформы.

**Обоснованность и достоверность** научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается:

- согласованностью результатов исследований с нормативными документами по безопасности обращения с РАО;
- применением современных методов, компьютерных комплексов и алгоритмов обработки ГНСС-данных;
- метрологическим обеспечением проведения геодезических работ;
- сходимостью результатов с данными геологических и геофизических исследований в районе.

**Практическая значимость** состоит в разработке метода выявления зон возможного нарушения изоляционных свойств горного массива на основе деформационного анализа результатов ГНСС-наблюдений на локальных геодинамических полигонах, что повышает эффективность обеспечения промышленной безопасности объектов использования атомной энергии.

**Реализация выводов и результатов работы.** Разработанный метод выявления зон возможного нарушения изоляционных свойств массива горных пород позволяет определить временные и пространственные изменения параметров деформаций, необходимые для обеспечения безопасности захоронения высокоактивных радиоактивных отходов в геологических формациях Нижне-Канского массива. Представленные в диссертации методические принципы ГНСС-измерений позволяют обеспечить субсантиметровую точность регистрации движений земной поверхности в районе строительства подземной исследовательской лаборатории в Красноярском крае, что подтверждается соответствующей справкой об использовании результатов диссертационного исследования.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены на следующих научных конференциях и симпозиумах: Научной конференции молодых ученых и аспирантов Института Физики Земли РАН (Москва, 2022, 2023 гг.); Международном форуме-конкурсе студентов и молодых ученых (Санкт-Петербург, 2021, 2023.); XXIX Всероссийской молодежной конференции «Строение литосферы и геодинамика» (г. Иркутск, 11-16 мая 2021 г.); XVII International Forum-Contest of Students and Young Researchers (S.-Petersburg Mining University, May 31-June 06, 2021); V Техническом совете по геомеханике в рамках Международного научного симпозиума «Неделя горняка-2023»; Международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (Москва, 2018, 2019, 2021, 2022 гг.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 12 статей, из которых 3 - в научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 9 - в изданиях,

индексируемых наукометрической базой Scopus/WoS. Получено 1 авторское свидетельство на программу для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 2 приложений. Работа изложена на 151 страницах текста и сопровождается 51 иллюстрациями, 15 таблицами. Список цитируемой литературы включает 135 наименований.

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

Материалом для данной работы послужили результаты, полученные автором в рамках работы по теме Государственного задания ГЦ РАН №: 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, а также по проекту РФ № 18-17-00241.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** проанализирован отечественный и международный опыт мониторинга современных движений и деформаций земной коры. Выполнен анализ методов, инструментов и методик измерений для изучения геодинамической обстановки и выявления зон возможного нарушения изоляционных свойств массива горных пород в районах расположения особо ответственных объектов. Результатом современных движений является деформирование породных массивов и образование в них высокоградиентных полей напряжений, которые могут приводить к негативным и опасным геодинамическим процессам, в т. ч. авариям на промышленных объектах.

Существенный теоретический вклад в исследования в области геодинамики внесли известные ученые Гзовский М.В., Добрецов Н.Л., Есиков Н. П., Никонов А.А., Мещеряков Ю.А., Николаев П.Н., Ризниченко Ю.В., Шерман С.И., Shen Z., Reilinger R. и др. Изучению факторов, определяющих опасные природные процессы посвящены работы известных российских ученых: Гвишиани А.Д., Баряха А.А., Захарова В.Н., Кафтана В.И., Кузьмина Ю.О., Леви К.Г., Мазурова Б.Т., Морозова В.Н., Санькова В.А., Татаринова В.Н. и др.

Это направление активно развивается, однако остается целый ряд задач, решение которых связано как со сложным и неоднородным строением геологической среды, так и несовершенством нормативных и методических аспектов, особенно для оценки устойчивости объектов с сверхдлинным временем эксплуатации.

Для исследования геодинамического режима и выявления зон возможного нарушения изоляционных свойств массива горных пород в районах расположения особо ответственных объектов регламентировано создание локальных геодинамических полигонов (ГДП). Однако, методические рекомендации к выбору мест их размещения не доведены до инженерного уровня принятия решений. Отсутствуют критерии оценки активности тектонических нарушений, опасных скоростей деформаций, требования к сетям наблюдений, учета масштабного фактора и т.д. Рассмотрение наиболее известных методик изучения деформаций средствами ГНСС показало, что их применение не учитывает специфические свойства объекта и не позволяет обеспечить необходимую точность наблюдений.

Существует проблема интерпретации данных, которая связана с зависимостью от технологии их получения, например, полученные измерительными системами, обладающими различной пространственно-временной детальностью. В результате получают неоправданно завышенный (или заниженный) уровень современной геодинамической активности территорий.

Основным критерием, определяющим геодинамическую опасность особо ответственных подземных объектов на настоящий момент, является превышение наблюдаемых значений относительных деформаций земной поверхности предельных значений, регламентированных нормативными документами. При этом почти не учитывается динамика изменения состояния среды (скорость деформаций).

Таким образом, анализ опыта исследований для обеспечения безопасности строительства и эксплуатации подземных сооружений различного назначения, существующих нормативно-методических документов, а также практики изучения дифференцированных движений земной коры показал, что имеются ряд научно-методических задач, решение которых позволит повысить достоверность оценки деформаций породного массива при строительстве уникального подземного сооружения для захоронения высокоактивных РАО в пределах Нижне-Канского массива.

На основании результатов анализа сформулирована цель и идея диссертационной работы и основные задачи.

**Во второй главе** рассмотрены теоретические основы деформационного анализа определения движений земной поверхности по данным ГНСС-измерений, послужившие основой методики расчета основных параметров деформаций земной поверхности (максимального горизонтального удлинения, деформации сдвига, дилатации), а также описаны исходные данные для деформационного анализа данного района.

Основной целью деформационного анализа является определение механизма деформации, если смотреть на объект как на механическую дискретную систему, состоящую из слабоподвижных блоков и высокоподвижных зонах их контактов, деформирующуюся по законам механики. Для вычисления тензора деформаций земной поверхности, ее структура декомпозируется на геометрические фигуры, известные как конечные элементы, вершины этих конечных элементов соответствуют ГНСС-пунктам (рис. 1). В пределах каждого элемента, представленного треугольником, предполагается, что распределение деформации однородно. Однако, иногда геометрические построения, получающиеся в результате такого разбиения, могут иметь форму неравновеликих треугольников. Это несоответствие величин и форм треугольников может внести неточности в расчеты деформаций. Для коррекции таких эффектов необходимо ввести масштабные коэффициенты, которые применяются обратно пропорционально площадям этих треугольников. Эти коэффициенты позволяют сделать треугольники равновеликими и, таким образом, обеспечивают более точные результаты при анализе деформаций.

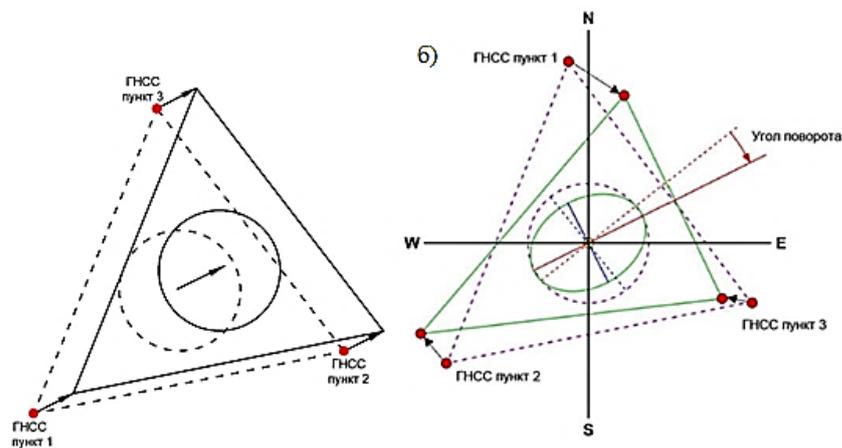


Рисунок 1 - Характер смещений конечного элемента (треугольника) земной поверхности, образованного ГНСС-пунктами: а) последовательное смещение; б) поворот

Выполняется расчет следующих параметров.

Максимальное (расширение)  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{(L_1 - L)}{L}, \quad (1)$$

где  $L_1$  - конечная длина и  $L$  - исходная длина.

Максимальная деформация сдвига  $\gamma_{max}$ :

$$\gamma_{max} = e_{1H} - e_{2H}, \quad (2)$$

где  $e_{1H}$  - изменение по большой оси,  $e_{2H}$  – изменение по малой оси.

Дилатация  $\Delta$ :

$$\Delta = e_{1H} + e_{2H}, \quad (3)$$

Для реализации данной методики разработан алгоритм и программа расчета деформационных характеристик для конечных элементов треугольной формы, центрами углов которых являются ближайшие ГНСС-пункты Нижне-Канского геодинимического полигона.

В главе также приведена характеристика данных о смещениях, которые использовались при деформационном анализе, полученные для Нижне-Канского полигона другими авторами в 2012-2018 гг. и лично автором данной работы в 2019-2022 гг. Их движение во времени и пространстве носит нелинейный, квазициклический характер, поэтому существует объективная необходимость учета параметров, характеризующих динамику пространственно-временного развития деформационных процессов. Показано, что существовавшая на 2020 год структура геодинимического полигона не соответствует нормативам по ряду параметров и требует оптимизации.

**В третьей главе** описаны основные составляющие разработанного комплексного метода полевых ГНСС-наблюдений и деформационного анализа для обеспечения необходимой точности измерений и достоверности моделирования деформаций.

Обычно процедуру проверки ГНСС-аппаратуры проводят путем сравнения измеренных величин с эталоном. Пространственные приращения координат между всеми пунктами эталонного базиса (расположенного непосредственно на ГДП) измеряются одновременно, что позволяет использовать избыточные измерения для оценки не только точности линейной компоненты, но и внести вклад в результат измерения каждого комплекта аппаратуры индивидуально. Не имея эталонных геодезических построений, в полевых условиях, удалось реализовать метод контроля точности комплекта ГНСС-аппаратуры, используя единственную базовую линию.

Разработанный метод прошел апробацию на геодинамическом полигоне Нижне-Канского массива и продемонстрировал свою эффективность, выявив некорректные паспортные характеристики двух применяемых антенн. Доказано, что с ее использованием можно для условий района обеспечить точность ГНСС-измерений в плане на уровне 1.3 – 2.5 мм, по высоте до 2.5 мм.

Система мониторинга параметров СДЗК включает в себя критерии оценки опасности деформаций с учетом особенностей объекта (в данном случае подземного сооружения со сверхдлинным сроком эксплуатации). В нормативах [*РБ-19-2018*], используются критерии оценки деформаций без учета их пространственной масштабируемости. Это означает, что оценка может быть заниженной. Необходимо учитывать максимально возможные скорости деформаций для проектируемых дистанций, а также вклад циклической-вариационной составляющей. Она, во-первых, может превышать трендовую, и, во-вторых, фактически и является прогнозной характеристикой, определяющей динамическую устойчивость приконтурной части породного массива. Это важно знать при переносе оценок с мелких масштабных уровней (дистанции 100-1000 км) на крупные (дистанции 0,1-10 км). Бессмысленно, как это делается сейчас, называть только численную величину скорости деформаций без указания площади и характера тектонического режима региона (сжатие, растяжение, сдвиг).

В этой связи, в главе приведены результаты исследований по выработке инженерных критериев интерпретации скоростей деформаций земной коры на различных масштабных уровнях. Для этого, был создан каталог скоростей деформаций на ГДП, расположенных в различных типах напряженного состояния по соотношению вертикального  $\sigma_z$ , максимального  $\sigma_x$  и минимального  $\sigma_y$  горизонтальных напряжений сжатия (рис. 2). Числовые ряды скоростей деформаций делятся на две группы: первая – это деформации, соответствующие фоновому (спокойному) геодинамическому режиму литосферы; вторая – это аномальные деформации. Сложность разделения выборки на две такие группы заключалась в отсутствии эталонов разделения.

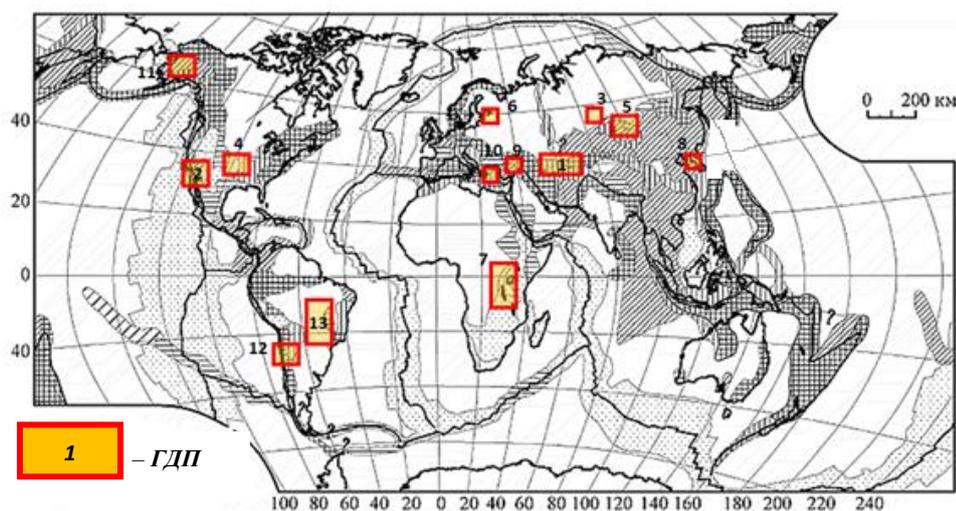


Рисунок 2 – Местонахождение геодинамических полигонов

Одной из распространенных моделей деформации земной поверхности от расстояния является линейная зависимость. Однако, линейная деформация является менее информативной, чем площадная (горизонтальная дилатация). Представляя деформацию только в виде линейной скорости, упускается возможность увидеть неоднородность деформационного поля и выделить отдельные зоны с более высокими скоростями деформации. Поэтому в качестве исследуемого параметра пространственных особенностей, была выбрана зависимость величины деформации растяжения/сжатия (горизонтальная дилатация) от площади нормированных треугольников (конечных элементов).

В результате были получены гистограммы распределения и регрессионные зависимости (табл. 1) деформаций (дилатации) от площади треугольника. Обобщенные регрессионные зависимости позволяют оценить деформационный режим на геодинамическом полигоне, уточнить степень тектонической активности и прогнозировать возможные аномалии деформаций (рис. 3).

Таблица 1 – Сводные регрессионные зависимости скорости деформации от площади треугольников для различных районов

Деформация	Регрессионные зависимости
Растяжение в активных районах	$-46.36 * LN(\Delta) + 510$
Сжатие в активных районах	$46.36 * LN(\Delta) - 510$
Растяжение в умеренно-активных районах	$-18.31 * LN(\Delta) + 210$
Сжатие в умеренно-активных районах	$18.31 * LN(\Delta) - 210$
Растяжение в слабоактивных районах	$-12.15 * LN(\Delta) + 150$
Сжатие в слабоактивных районах	$12.15 * LN(\Delta) - 150$

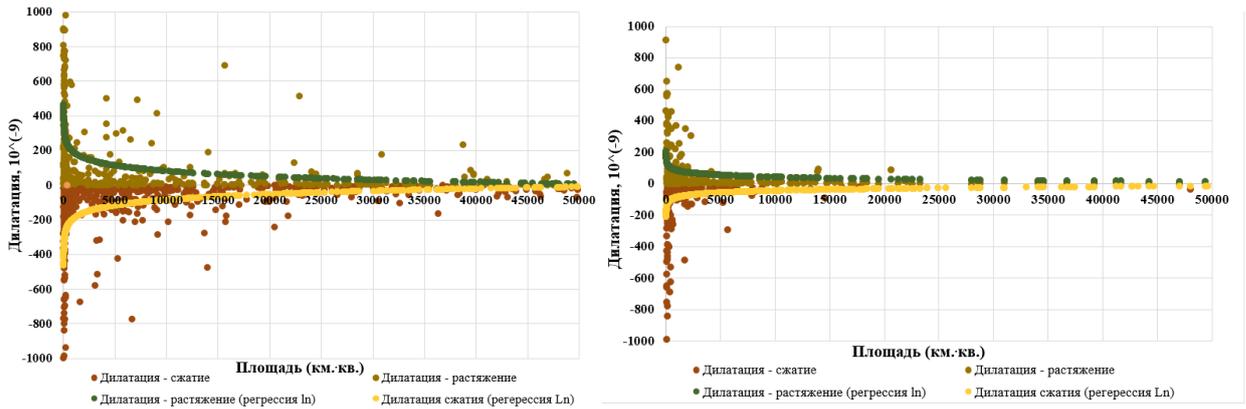


Рисунок 3 – Примеры регрессионных зависимостей дилатации от площади для активных (а) и умеренно активных (б) районов

Были проведены исследования по оптимизации структуры геодинамического полигона в пределах Нижне-Канского массива. Опыт использования скальных геодезических центров на различных геодинамических полигонах показал, что центры, предназначенные для установки в выходы скальных горных пород, имеют наиболее простую и более экономичную конструкцию.

Для этой цели спроектирована и разработана уникальная конструкция скального центра, адаптированная к условиям территории Нижне-Канского геодинамического полигона (рис. 4). Создавалось несколько экспериментальных вариантов конструкции скального центра для уточнения особенностей его установки и взаимодействия с массивом горных пород. Исследовано влияние геометрических размеров элементов конструкции (длина, форма нижнего пропила центра, форма клина) на прочность установки. С целью обеспечения более надежной фиксации скального центра в массиве пород было принято решение использовать тип центра с анкерным креплением, основанный на стержневой конструкции.

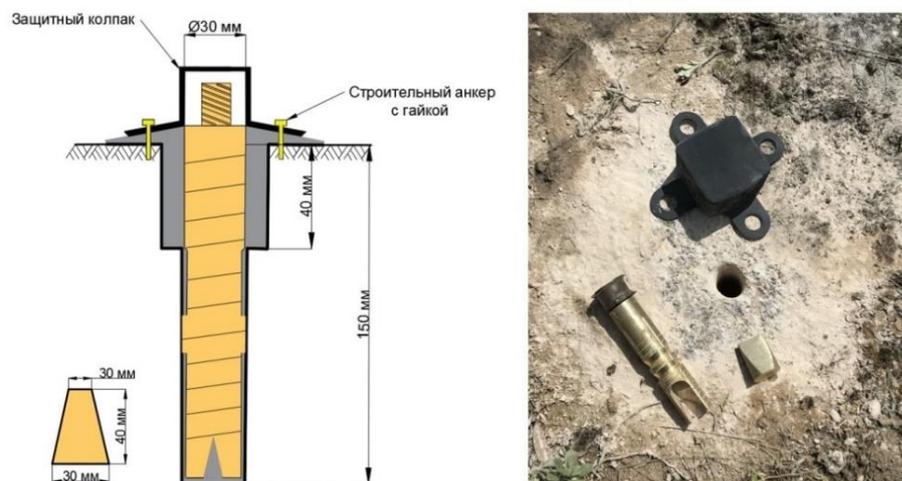


Рисунок 4 – Схема и вид оптимальной конструкции скального центра

После процедуры оптимизации ГНСС-сеть стала охватывать южный сектор региона, включая зону строительства подземной исследовательской лаборатории. Результатом улучшения сети является увеличение количества треугольников, приближенных к равносторонним, что положительно сказывается на точности определения деформаций земной поверхности в процессе анализа маркшейдерско-геодезических измерений. Этот факт проиллюстрирован на рис. 5, где отображены построенные треугольники Делоне.

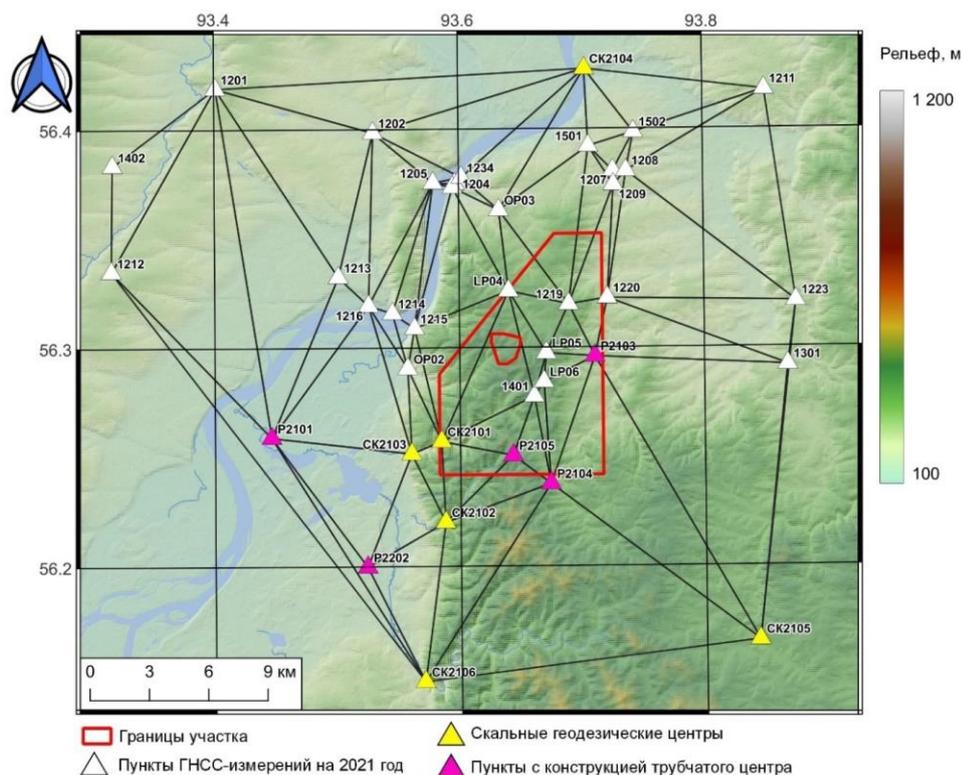


Рисунок 5 – Схема оптимизированной в 2022 г. сети геодезического полигона

**В четвертой главе** представлена геодезическая модель северной части Нижне-Канского массива, полученная по временным рядам смещений пунктов ГДП за период с 2012 по 2021 год, а также динамики пространственно-временного изменения полей деформаций.

Проведенный анализ смещений ГНСС-пунктов (рис. 6) указывает на циклический характер смещений пунктов наблюдений, изменения деформаций во времени и по площади района исследования. В период с 2012 по 2021 годы модули векторов смещений, ориентированных в субмеридиональном направлении, достигли 30-35 мм в северной и восточной частях района. В тоже время, за счет цикличности движений средняя скорость горизонтальных движений значительно меньше, чем годовые значения смещений. За все время наблюдений на ГДП было зафиксировано два цикла релаксации напряжений и смены знаков движений в 2013-2014 и в 2015-2016 гг.

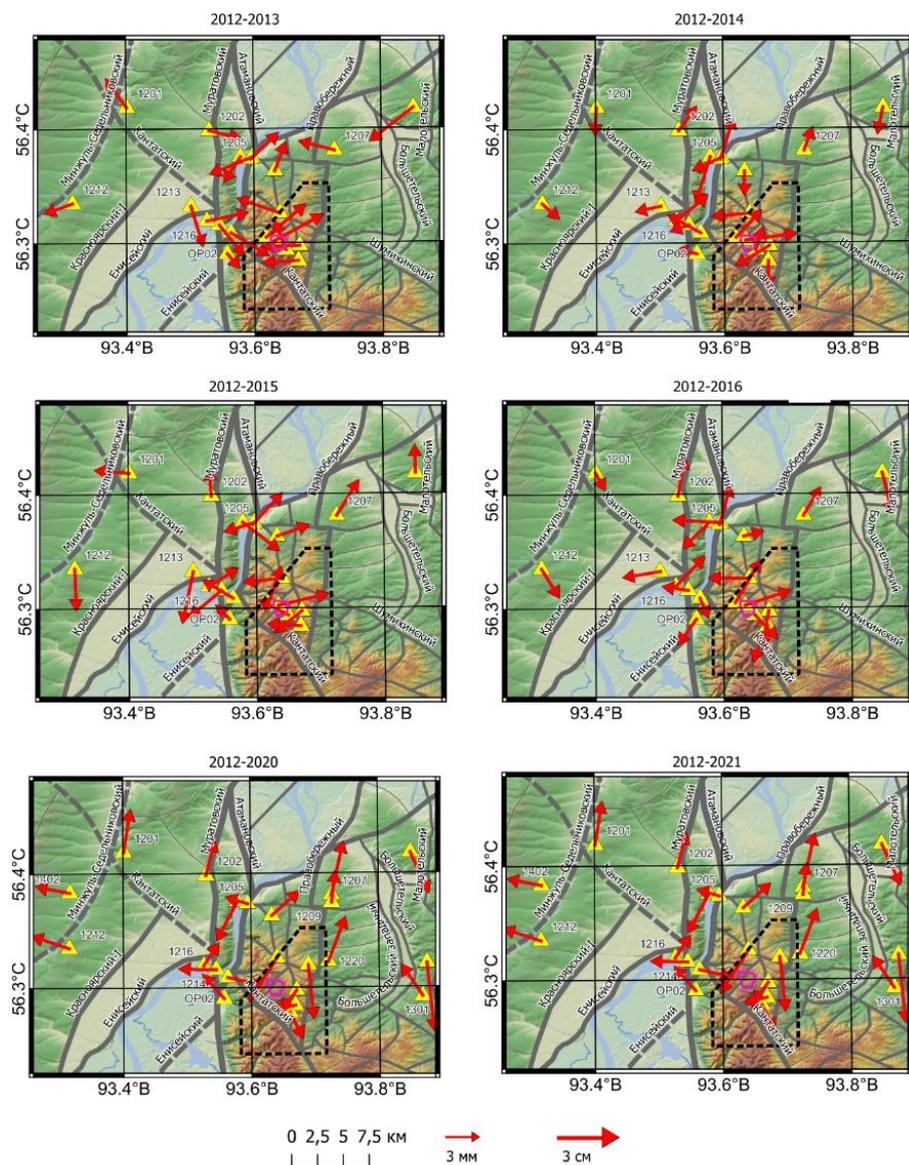


Рисунок 6 – Горизонтальные смещения ГНСС-пунктов по эпохам с 2012-2021 гг. Серые линии – тектонические разломы. Желтые треугольники – ГНСС-пункты

На рис. 7 приведены карты ориентации осей главных деформаций по отдельным эпохам измерений. Результаты анализа распределения главных деформаций позволяют проследить динамику процесса на территории полигона. Динамика, в целом, характеризуется нелинейным развитием во времени по «псевдоциклическому» характеру деформирования, который был зафиксирован в эпохи 2012-2015 гг. (к эпохе 2012-2013 гг.), 2012-2016 гг. (к эпохе 2012-2014 гг.) и 2012-2021 гг. (к эпохе 2012-2020 гг.). Наиболее активно деформации проявляются в более узких зонах близ разломов и тектонических узлов.

Кроме того, был выполнен такой же анализ динамики развития деформационного процесса на территории Нижне-Канского геодинимического полигона по другим параметрам дилатации ( $\Delta$ ), которая характеризует уменьшение ( $\Delta_-$ ) или увеличение ( $\Delta_+$ ) площади земной поверхности и деформации чистого сдвига (при чистом сдвиге конечный

элемент, выделенный в окрестности некоторой точки, испытывает только деформации сдвига, а удлинения его сторон отсутствует). Эти параметры наглядно позволяют проследить изменение характера деформирования по площади.

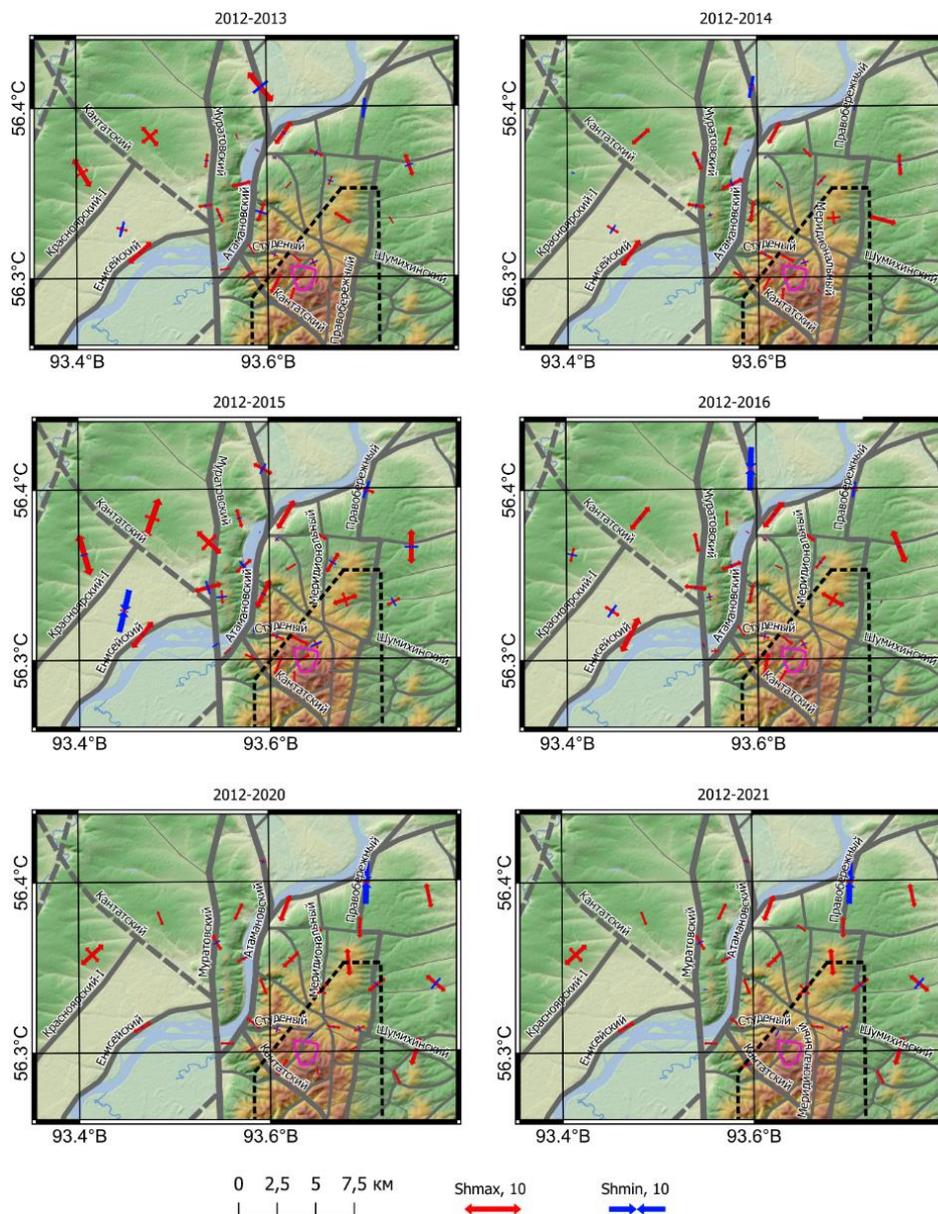


Рисунок 7 – Главные оси деформаций по результатам ГНСС-наблюдений по эпохам измерений с 2012-2021 гг.

На рис. 8 показана модель динамики пространственно-временного изменения дилатации конечных элементов по эпохам наблюдений 2012-13, 2012-14, 2012-15, 2012-16, 2012-20, 2012-21 гг. На рисунке также видна главная особенность этого процесса – постоянство расположения основных аномальных зон дилатации при некотором изменении размеров и эффекта цикличности для некоторых зон. На рис. 7 они обозначены римскими цифрами. Это, вероятно, связано с особенностями свойств и строения участков земной коры в этих зонах.

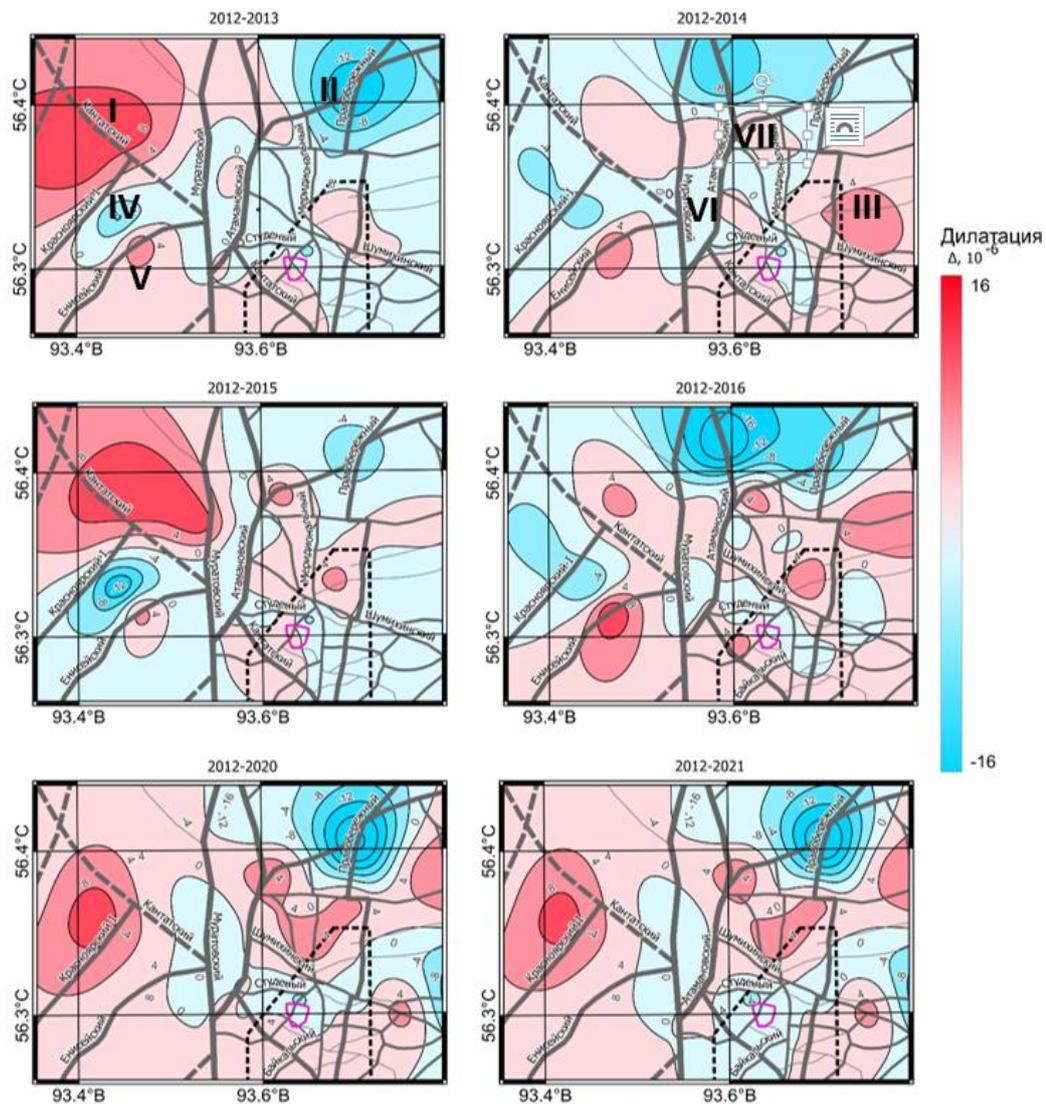


Рисунок 8 – Динамика изменения деформации дилатации на территории полигона в интервале 2012-2021 гг.

На основании этого можно сделать два вывода: развитие процесса сжатия-растяжения земной поверхности в пределах Нижне-Канского массива происходит по циклическому закону, с периодом в 2-3 года, территория является в тектоническом отношении активной.

На рис. 9 показана динамика изменения во времени деформации чистого сдвига по эпохам 2012-2013 гг., 2012-2014 гг., 2012-2015 гг., 2012-2016 гг., 2012-2020 гг., 2012-2021 гг. В отличие от дилатации этот параметр позволяет оценить тип кинематических смещений земной поверхности. Примечательно то, что обширные зоны дилатации сжатия со значениями  $\Delta_+ \approx -1,6 \cdot 10^{-6}$  в узле пересечения Правобережного и Канско-Атамановского разломов в северо-восточной части района, и зона растягивающих деформаций  $\Delta_- \approx 8 \cdot 10^{-6}$  на западе, оказались связанными с зонами наибольших значений деформаций сдвига из рис. 8. Это говорит о сдвиговом характере движений по Правобережному разлому (левосторонний сдвиг).



позволяет оценить полную длину (модуль) вектора смещения независимо от наличия и характера разломной тектоники на исследуемой территории. Данную характеристику (названную «дефицит смещений») впервые предложил использовать В.И. Кафтан. В настоящей работе этот параметр применен и для Нижне-Канского массива.

Эта характеристика определяется формулой

$$\delta s = \sqrt{u_{n_j}^2 + u_{e_j}^2} \quad (4)$$

где  $\delta s$  – полная длина (модуль) вектора смещения во внутренней системе отсчета;  $u_{n_j}, u_{e_j}$  – вектора смещений соответственно на север и восток во внутренней системе отсчета

Динамика изменения характеристики дефицита смещений за период с 2014 по 2021 годы представлена на рис. 10.

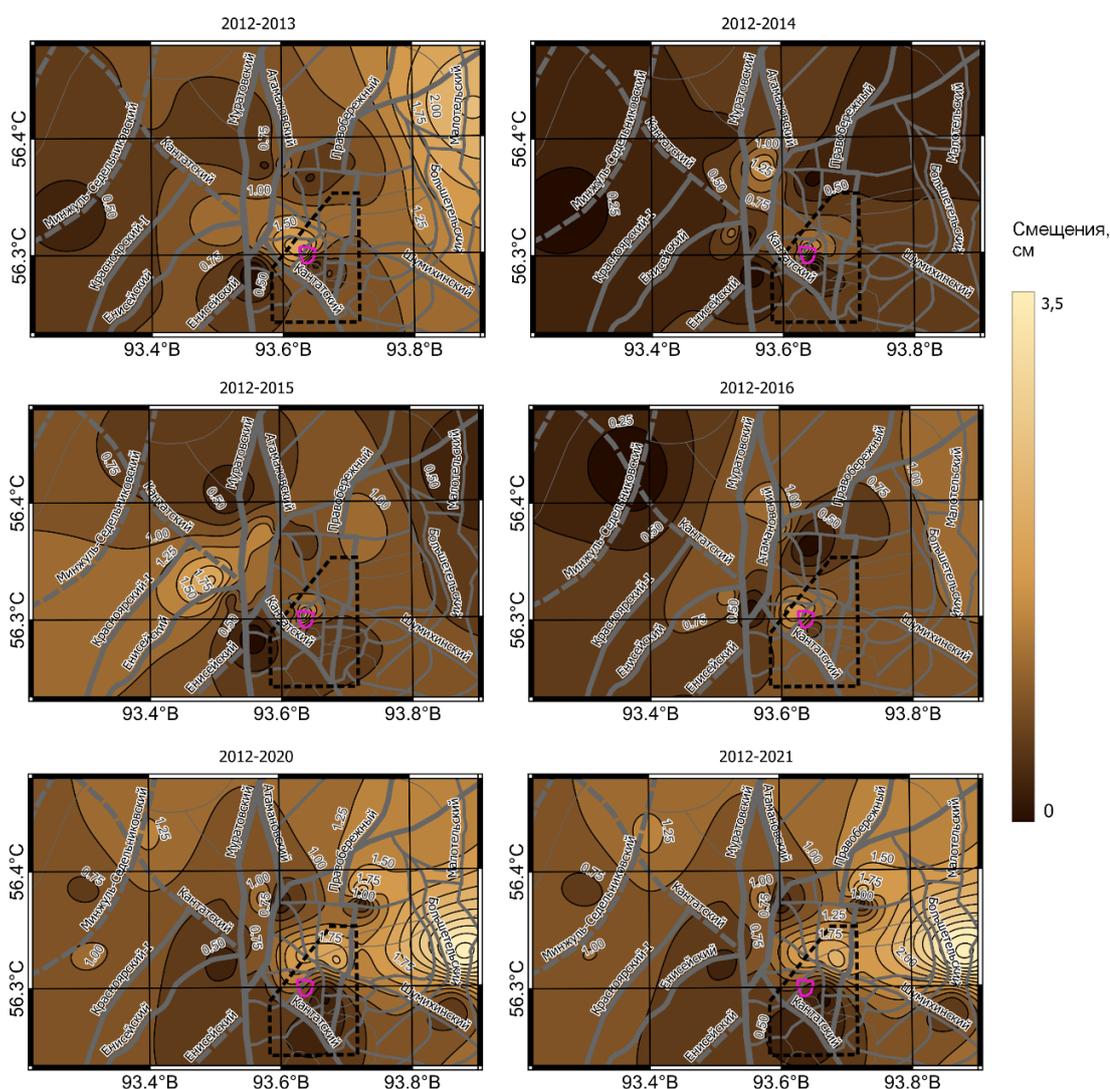


Рисунок 10– Изменение во времени распределения параметра «Дефицит смещений» с 2014 по 2021 гг.

С использованием данного подхода определена новая характеристика, которая позволяет косвенно оценить изоляционные свойства горных пород для миграции радионуклидов. Оценка основана на дефиците накопленных горизонтальных смещений

пунктов ГНСС-сети. Чем больше значение накопленных смещений, тем больше степень структурной нарушенности или раскрытия пористости (разуплотнения) горных пород.

Темным цветом обозначены менее подвижные участки земной поверхности в то время, как светлый цвет указывает более подвижные участки. Большинство более подвижных участков связаны с активными тектоническими разломами, на которых происходит разгрузка накопленных напряжений в виде тектонического крипа. Дефицит смещений отражает проекции сцеплений внутри тектонических блоков на поверхность. В таких местах можно ожидать наименьшую степень раздробленности пород в результате развития современных геодинамических процессов. Однако, в этих местах ожидается более высокое напряжение. Аналогично динамике дилатации, также наблюдается пространственная миграция зон дефицита смещений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная научная задача - разработан метод выявления зон возможного нарушения изоляционных свойств массива горных пород, имеющая важное значение для обеспечения безопасности захоронения высокоактивных радиоактивных отходов.

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

1. Анализ опыта геодинимических исследований на локальных геодинимических полигонах и нормативно-методических документов, регламентирующих обращение с РАО, показал, что для обеспечения требуемой точности оценки скоростей деформаций верхней части земной коры, необходим новый метод проведения высокоточных маркшейдерско-геодезических наблюдений и выполнения деформационного анализа, учитывающая уникальные особенности объекта.

2. Разработанные положения теоретических расчетов и моделирования полей деформаций по ГНСС-данным, полученных на Нижне-Канском геодинимическом полигоне, характеризующие деформации дилатации и чистого сдвига, а также динамику их изменения во времени. Для получения однородного набора деформационных характеристик предложены два варианта: интерполяция значений смещений в узлы регулярной сетки, сформированной равновеликими треугольниками и масштабирование неоднородных деформаций соответствующими коэффициентами.

3. Разработана методика полевого контроля ГНСС-аппаратуры, позволяющая оперативно выявлять некорректные номинальные параметры измерительных средств. Тестирование методики показало, что для данного района точность определения характеристик в плане находится на уровне 1- 1.5 мм, а по высоте – 2 мм. Результаты опробования методики в полевых условиях позволяют обнаружить участки с повышенными значениями скоростей деформаций растяжений-сжатий, достигающими  $1 \times 10^{-5}$  в год.

4. Разработаны конструкции и технологии закладки скального геодезического центра для физико-географических условий площадки ПИЛ, которые позволяют свести к минимуму погрешность центрирования, обеспечить неподвижность и долговечность ГНСС-антенн. При модернизации геодинимического полигона спутниковая геодезическая сеть была расширена, путем закладки новых геодезических центров скального типа. Модернизированная сеть ГНСС-наблюдений стала более оптимальной в отношении формы конечных элементов.

5. Исследовано влияние масштабного пространственного эффекта на величину скоростей деформаций для различных иерархических уровней и типов напряженного состояния земной коры. Получена номограмма пересчета деформаций для полигонов регионального и локального уровней, которая может быть использована при разработке инженерных критериев безопасности особо ответственных объектов с длительным сроком эксплуатации.

6. Создана библиотека PyGeoStrain, позволяющая проводить анализ геопространственных данных и визуализировать результаты, включая векторы движений, ориентацию главных деформаций и угловую скорость вращения, гибкость и простота использования, которой делают ее полезным инструментом для исследователей и профессионалов в области маркшейдерии (геодезии).

7. Установлено, что современные сдвиги в районе зоны контакта Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформой характеризуются циклическим развитием во времени, связанного с кинематическим взаимодействием тектонических блоков. Для выявления возможных зон потери изоляционных свойств пород использовать параметр "дефицит смещений", позволяющий объяснять глубинные механизмы наблюдаемых геодинамических явлений в регионе.

8. Полученные результаты показывают наличие взаимосвязи между скоростями деформаций земной коры и крупными тектоническими структурами, включая Приенисейский (Муратовский) разлом, Атамановский разлом, Большетельский разлом и Правобережный разлом. Исследована динамика развития дилатации и сдвиговых деформаций в ближней зоне ПИЛ за период с 2012 по 2021 гг.

9. Результаты исследования позволили получить новые фундаментальные знания об СДЗК на геодинамическом полигоне Нижне-Канского массива. Разработанный комплексный метод, включающий полевые ГНСС-наблюдения и анализ деформаций, успешно прошел апробацию в системе научно-исследовательских, производственных и полевых работ Геофизического центра РАН (Приложение 2), выполняемых совместно с ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами». Данный метод применяется при эксплуатации геодинамического полигона ПИЛ и при реализации научной программы геодинамических и геомеханических исследований в ПИЛ.

### **Основные результаты диссертационного исследования опубликованы:**

1. Manevich A.I., Kaftan V.I., Losev I.V., **Shevchuk R.V.** Improvement of the Deformation GNSS Monitoring Network of the Nizhne-Kansk Massif Underground Research Laboratory Site. 2021. Seism. Instr. № 57. pp. 587–599. DOI: 10.3103/S0747923921050042 (WoS).
2. Шевчук С.В., Квятковская С.С., **Шевчук Р.В.**, Шерматова С.С., Головки И.В. К вопросу геодинамического мониторинга территории Калининградской области // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2021. -№ 2-1. С. 298–309. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-298-309 (БАК, Scopus).
3. Kaftan V.I., Tatarinov V.N., **Shevchuk R.V.** Long-term changes in crustal movements and deformations before and during the 2016 Kumamoto earthquake sequence // Geodynamics & tectonophysics. 2022. Vol. 13. №1. DOI: 10.5800/GT-2022-13-1-0570 (Scopus).
4. **Shevchuk R.V.**, Manevich A.I., Akmatov D. Zh., Urmanov D.I., Shakirov A.I. Modern methods, techniques and technical means of monitoring movements of the Earth crust // Gornaya Promyshlennost. 2022. №5: pp. 99–104. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-5-99-104 (Scopus).
5. Perederin F.V., Holodkov K.I., Tatarinov V.N., **Shevchyk R.V.**, Manevich A.I. Observations of earth surface deformations at the FSUE «RADON» test site // Seismic Instruments. 2022. Vol. 58. No. 4. pp. 160–174. DOI: 10.3103/S0747923922070167 (WoS).
6. Manevich A.I., **Shevchyk R.V.**, Kaftan V.I., Tatarinov V.N., Zabrodin S.M. Improvement of the network of GNSS monitoring of the Nizhne-Kansky massif using bedrock pin geodetic center // Seismic Instruments. 2022. Vol. 58. No. 4. pp. 111–129. DOI: 10.3103/S0747923922080084. (WoS).
7. Gvichiani A.D., Tatrinov V.N., Kaftan V.I., Manevich A.I., Minaev V.A., Ustinov S.A., **Shevchuk R.V.** Geodynamic model of the northern part of the Nizhnekansk massif: fault tectonics, deformations, insulation properties of rock displacements // Doklady Earth Sciences. 2022. Vol. 507. №1. pp. 67-74. DOI: 10.1134/S1028334X22600608 (WoS, Scopus).
8. Акматов Д.Ж., Маневич А.И., Татаринов В.Н., **Шевчук Р.В.** Трёхмерная структурно-тектоническая модель Енисейского участка (Нижнеканский массив) // Горный журнал. 2023. №1. с.69–74. DOI: 10.17580/gzh.2023.01.11 (БАК, Scopus).
9. Kaftan V.I., Tatarinov V.N., **Shevchuk R.V.**, Manevich A.I., Kaftan A.V. Experimental study of the field methodology for assessing the accuracy of GNSS measurements

// Geodezia i Kartografia. 2023. №84(10). pp. 12–21. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-1000-10-12-21 (Scopus).

10. Manevich A.I., **Shevchuk R.V.**, Losev I.V., Kaftan V.I., Urmanov D.I., Shakirov A.I. Deformation analysis and visualization from GNSS observations in Python 3 and QGIS 3 // Geodezia I kartografia. Vol. 84 (12). pp. 17–26. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-1002-12-17-26 (Scopus).

11. Kaftan V.I., Tatarinov V.N., Pobedinsky M.G., Shayakhmetov R.F., Manevich A.I., **Shevchuk R.V.**, Losev I.V. GNSS observations at the Klimovskaya integrated geomagnetic observatory // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2024. Vol. 59. No. 8. p. 990–1000. DOI: 10.1134/S0001433823080066 (WoS, Scopus).

12. **Шевчук Р. В.** Обоснование и разработка метода выявления зон возможного нарушения изоляционных свойств массива горных пород на основе деформационного анализа // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2024. № 1 (специальный выпуск 2). С. 29–42. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_1\_2\_29 (ВАК).

*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 (SOFT). Авт. св. № 2021665069 от 17.09.2021.