

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Тухель Екатерина Андреевна

Москва, 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ДЕФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ЗЕМНОЙ КОРЫ СРЕДСТВАМИ ГНСС.....	12
1.1 Анализ и обобщение методов наблюдений за современными движениями земной коры.....	12
1.2 Аномальные деформации земной коры и нормативная база, регламентирующая их изучение.....	21
1.3 Деформационный мониторинг средствами ГНСС на геодинимических полигонах.....	25
1.4 Выводы, цель и задачи диссертационного исследования.....	29
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО АНАЛИЗА.....	32
2.1. Определение движений земной поверхности по результатам ГНСС- измерений.....	32
2.2. Определение параметров деформаций земной поверхности.....	35
2.3 Данные, используемые при деформационном анализе.....	43
2.4 Выводы по главе 2.....	48
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДА МОНИТОРИНГА СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ НИЖНЕ-КАНСКОГО МАССИВА.....	49
3.1 Метод полевого контроля точности ГНСС-аппаратуры.....	50
3.2 Исследование пространственных закономерностей СДЗК для различных дистанций (масштабный эффект) и типов напряженного состояния земной коры.....	64
3.3 Коррекция структуры сети ГНСС-наблюдений с использованием скальных геодезических центров.....	77
3.3.1 Опыт применения скальных геодезических центров на геодинимических полигонах.....	77
3.3.2. Исследования по выбору оптимальной конструкции и технологии установки скальных центров.....	81
3.4 Развитие сети деформационного мониторинга.....	85

3.4.1 Оптимизация сети ГНСС-мониторинга.....	85
3.4.2 Проектирование профилей высокоточного геометрического нивелирования.....	89
3.5 Определение и визуализация параметров движений и деформаций земной поверхности в среде Python 3 и QGIS 3.....	91
3.6 Выводы по главе 3.....	97
ГЛАВА 4. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В РАЙОНЕ РАЗМЕЩЕНИЯ ПИЛ ПО ДАННЫМ ГНСС-ИЗМЕРЕНИЙ	100
4.1 Анализ предпосылок развития геодеформационных процессов в районе строительства ПИЛ	100
4.2. Анализ смещений ГНСС-пунктов за период с 2012 по 2021 гг.	104
4.3 Расчет параметров деформаций земной поверхности (компоненты тензора деформаций, главные деформации и оси их ориентаций, дилатация, деформация сдвига) для дальней зоны ПИЛ	108
4.4 Пространственно-временной анализ динамики движений и деформаций в ближней зоне ПИЛ.....	118
4.5 Выводы по главе 4.....	127
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	130
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	133
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	150
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	151

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- АЭС – атомная электрическая станция
- ВЛС – воздушное лазерное сканирование
- ВОЗ – возможный очаг землетрясения
- ГДП – геодинамический полигон
- ГНСС – глобальные навигационные спутниковые системы
- ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли
- ЛИД – лазерные интерферометры- деформографы
- МЛС – мобильное лазерное сканирование
- НЛС – наземное лазерное сканирование
- НС РАН – научная станция РАН в г. Бишкеке
- ПГЗРО – пункт глубинного захоронения радиоактивных отходов
- ПИЛ – подземная исследовательская лаборатория
- РАО – радиоактивных отходов
- СДЗК – современные движения земной коры
- СКО – среднеквадратическая ошибка
- InSAR – радарная спутниковая интерферометрия
- LIDAR – лазерное сканирование с помощью оптических дальномеров

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. Дзедобову, 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 РНФ № 18-17-00241.

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ДЕФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ЗЕМНОЙ КОРЫ СРЕДСТВАМИ ГНСС

1.1 Анализ и обобщение методов наблюдений за современными движениями земной коры

Деформационный мониторинг — это система инструментальных маркшейдерско-геодезических наблюдений с целью получения достоверных оценок деформаций земной поверхности, своевременного выявления аномальных отклонений от нормативно установленных критериев, а также предупреждения и устранения негативного влияния природных и техногенных явлений и процессов на состояние инженерного сооружения и вмещающего его породного массива.

Изучение современных движений земной коры (СДЗК) и расчет на этой основе деформаций имеет большое научно-практическое значение для обеспечения геоэкологической безопасности особо ответственных промышленных объектов. В СССР существовало более 40 геодинамических полигонов (ГДП) [Яценко и Ямбаев, 2007], на которых проводились многолетние высокоточные планово-высотные измерения. Большое внимание этому вопросу уделялось при строительстве крупных инженерных сооружений, на горнорудных предприятиях и АЭС. В частности, были созданы геодинамические полигоны на Калининской, Нововоронежской и Ростовской АЭС [Татаринов и др. 2006; Передерин и др. 2022; Морозов и др., 2001]. К сожалению, в настоящее время объем подобных работ существенно сократился.

В конце 80-х годов XX в. для изучения СДЗК стали активно внедряться Глобальные Навигационные Спутниковые Системы (ГНСС). За более, чем 30-летний период они доказали свою эффективность. Был накоплен огромный опыт использования ГНСС при решении целого ряда научных задач, появились высокоэффективные измерительные средства, программные

пакеты анализа и интерпретации данных [Антонович, 2005]. Существенно расширились и области практического применения результатов исследований в различных областях [Мазуров и Кафтан, 2020; Галаганов и Гусев, 2015; Кочарян, 2010; Андерсон и др., 2011]. Имеются примеры успешного совместного использования систем ГЛОНАСС и GPS для получения оценок горизонтальных смещений пунктов земной поверхности с точностью до первых миллиметров [Кафтан и др., 2017].

Регистрируемые с помощью средств ГНСС горизонтальные и вертикальные смещения земной поверхности являются результатом проявления и взаимодействия комплекса экзогенных и эндогенных геодинамических процессов и явлений в земной коре на различных иерархических уровнях и временных интервалах. Основными типами современных движений являются:

1. Медленные движения (тектонический крип), имеющие в основном однонаправленный и колебательный (циклический) характер;
2. Быстрые движения (сейсмогенные и постсейсмические), связанные с реализацией сейсмических явлений.

Результатом движений является деформирование породных массивов и формированию высокоградиентных полей напряжений. Эти явления могут инициировать опасные геодинамические процессы, такие как нарушение изоляционных свойств породного массива, что, в свою очередь, может привести к возникновению техногенных аварий. Изучение скоростей СДЗК имеет огромное значение для оценки рисков экзогенных природных опасностей, таких как оползни, сели и др. [Мальнева и др., 2017].

Существенный теоретический вклад в исследования в области геодинамического мониторинга внесли известные ученые Гзовский М.В., Добрецов Н.Л., Есиков Н. П., Кузьмин Ю.О., Мазуров Б.Т., Мещеряков Ю.А., Николаев П.Н., Ризниченко Ю.В., Никонов А.А., Прилепин М.Т., 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., Татарина В.Н. и др.

Это направление активно развивается, однако остается целый ряд нерешенных задач, связанных как со сложным и неоднородным строением геологической среды, так и несовершенством нормативных и методических аспектов. Ю.О. Кузьмин справедливо подчеркивает в работе [Кузьмин и др., 2012], что: «уровень аномальных деформаций, выявленных в зонах разломов, оказался соизмерим с опасными смещениями, которые регламентированы в соответствующих нормативных документах, что привело к необходимости радикального пересмотра существующих представлений об уровне и масштабах геодинамического риска объектов, расположенных в платформенных, асейсмичных регионах».

Для изучения геодинамического режима и прогноза опасных геологических процессов в районах расположения особо ответственных объектов регламентировано строительство локальных геодинамических полигонов (ГДП) для деформационного мониторинга в формате режимных полевых компаний или непрерывных геодезических измерений [НП-064-17; Мазуров и Кафтан, 2020]. Выбор методов, инструментов и методик измерений определяется в первую очередь целями исследований и свойствами объекта, а также интенсивностью геодинамических процессов.

Методы изучения СДЗК можно разделить на три группы – геодезические, геофизические и дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В настоящее время геодезические методы являются основными при изучении современных движений и деформаций земной поверхности.

Высокоточное геометрическое нивелирование позволяет определять осадки и деформации зданий и сооружений, земной поверхности, подрабатываемой горными работами, а также наблюдать за вертикальными движениями тектонических структур [Кузьмин и др., 2014].

Линейно-угловые построения — это процесс измерений углов и сторон треугольников в геодезической сети. По сравнению с триангуляцией и трилатерацией здесь удачно сочетаются угловые и линейные измерения. При этом существенно уменьшается зависимость между продольным и поперечным сдвигами и обеспечивается жесткий контроль угловых и линейных измерений. Линейно-угловая сеть позволяет вычислить координаты пунктов точнее, чем в сетях триангуляции и трилатерации.

Принцип действия высокоточных дальномерных измерений заключается в определении времени, за которое посланный дальномером сигнал проходит расстояние до объекта и обратно. При этом скорость распространения сигнала (скорость звука или света) считается известной. В исследовании [Миронов и Магуськин, 2019] представлен обзор светодальномерных наблюдений на Камчатке за 1984 -1995 годы. Наблюдения проводились на специально организованных семи деформационных площадках, вместе с нивелированием I класса. В [Кузьмин и др., 2016] представлены результаты анализа многолетних светодальномерных наблюдений на одном из Камчатских и на Ашхабадском геодинамических полигонах. Была достигнута прецизионная точность на уровне деформаций $5 \cdot 10^{-8}$ при длинах линий до 30 км, что позволяет выявлять деформации на уровне приливных.

Современным средством определением параметров СДЗК является *лазерное сканирование* с помощью активных оптических дальномеров (LIDAR). Используя явление поглощения и рассеяния света в оптически прозрачных средах, позволяет получить двумерную или трёхмерную картину пространства [Telling et al., 2017]. В результате формируется изображение в виде облака точек. Далее из них создаются цифровые модели объекта — поверхности, интенсивности света и другие. По методу сканирования выделяют *воздушное лазерное сканирование* (ВЛС), *мобильное лазерное сканирование* (МЛС) и *наземное лазерное сканирование* (НЛС). Лазерное сканирование активно используется в строительстве, горнодобывающей,

нефтегазодобывающей промышленности, архитектуре и других областях. Определение смещений и деформаций объекта происходит в результате повторных съемок, посредством сравнения координат объекта с первой эпохой измерений. Для мониторинга смещений и деформаций используют НЛС и ВЛС. В [Harmening et al, 2020] приводится математическая модель пространственно-временной деформации, получаемой в результате наблюдений лазерным сканированием. Авторы предлагают деформационную модель, основанную на получаемом облаке точек. Более представительный обзор и описание технологии можно найти в диссертации Хиллера Бернда [Бернд, 2017].

В настоящее время средства ГНСС широко применяются для создания высокоточных государственных геодезических сетей, сетей специального назначения на геодинамических полигонах, базовых станций, а также решения различных задач в области наук о Земле. Имеются различные спутниковые системы навигации, основными из них являются: ГЛОНАСС (Россия), GPS (США), BDS (Китай). Также имеется ряд региональных систем ГНСС, например, Индийская навигационная спутниковая система (IRNSS) и (IRNSS/NavIC), Японская квазизенитная спутниковая система (QZSS), а также Южнокорейская система определения местоположения (KPS). Таким образом, современное состояние развития спутниковых навигационных систем позволяет пользователю получать доступ к шести различным системам, которые в совокупности обеспечивают доступ к более чем 140 спутникам, работающих на различных орбитах. Предполагая, что каждый спутник передает радиосигналы на нескольких частотах (в среднем трех), мы можем использовать несколько частот измерений одновременно и выбрать оптимальное решение. Очевидно, что в зависимости от целей измерений, требуется различный уровень их точности [Кафтан и др., 2017]. Главное преимущество ГНСС по сравнению с традиционными геодезическими методами – высокая точность определения горизонтальных смещений земной коры на длинных базах [Relinger et al, 1997], а также высокая оперативность.

Одна из первых работ использования средств ГНСС в задачах геодинамики принадлежит известному исследователю из Стенфордского Университета, где приведены временные ряды смещений для сильных землетрясений за период 1996-1997 гг. [Segall and Davis, 1997; Bock and Melgar, 2016]. Там также рассмотрены особенности мониторинга смещений на всех масштабных уровнях – тектонические движения в масштабе мировых литосферных плит, региональные современные движения земной коры в масштабе одной или нескольких литосферных плит, связанные с вулканической деятельностью, сейсмической активностью или активными движениями на крупных тектонических разломах и т.д. В работах [Кафтан и Докукин, 2017; Кафтан и др., 2019; Красноперов, 2012; Мельников, 2012] представлены основные концепции проведения мониторинга деформации ГНСС земной поверхности на основе спутниковых измерений.

Лазерные интерферометры-деформографы (ЛИД) – это уникальные, высокоточные обсерваторские установки, предназначенные для измерения деформации базовых линий (30 – 100 метров), в т. ч. приливные суточные деформации, слабые деформации около разломных зон, а также для изучения корреляции слабых деформаций с сейсмологическими данными, глобальных геодинамических процессов, связанных с вращением Земли и собственных колебаний Земли. Измерения средствами ЛИД основаны на физическом явлении интерференции, когда из блока лазерного излучателя пучок излучения с помощью специального устройства разделяется на несколько когерентных. Каждый из них проходит разные оптические пути и направляется в регистратор, который фиксирует интерференционную картину [Дубов и Алешин, 2000]. Обзор опыта использования ЛИД приведен в работе [Braitenberg, 2018]. Пример - лазерный интерферометр в подземной геофизической обсерватории ГАИШ МГУ, расположенной в Баксанском ущелье, в штольне г. Андырчи. Длина его базы составляет 75 метров [Милюков и Кравчук, 1996; Milyukov et al., 2005]. В результате работы Баксанского ЛИД были получены фундаментальные данные о СДЗК. К примеру, в результате

наблюдений приливных деформаций было выявлено существование в структуре вулкана Эльбрус магматической камеры [Милуков, 2006; Милуков и др., 2007].

В работе [Милуков и др., 2011] по рядом наблюдений деформационных станций Баксан и Протвино (Московская область) и данным о неравномерности вращения Земли был исследован характер взаимной связи деформационных процессов в литосфере и глобальной геодинамики Земли на коротких интервалах времени. ЛИД так же используется для анализа собственных деформаций Земли, возбужденных сильными землетрясениями [Милуков и др., 2011].

В геофизической обсерватории «Мокса» (Йенский Университет, Германия) также проводятся высокоточные деформационные измерения с использованием ЛИД [Jahr, 2018; Jahr et al., 2006]. Система высокоточных деформационных измерений на обсерватории включает в себя два перпендикулярных друг другу ЛИД с длинной базы 26 метров и дополнительный ЛИД, соединяющий их по диагонали (т.е. получается правильный треугольник, катеты которого ориентированы на север и восток). Результаты измерений так же используются для выявления приливных деформаций и слабых деформаций сильных землетрясений [Jahr, 2018].

Радарная спутниковая интерферометрия, радары синтезированной апертурой (РСА-интерферометрия) или (InSAR) является эффективным методом построения цифровых моделей рельефа и мониторинга состояния поверхности Земли с разрешением и точностью недостижимой в сравнении с наземными методами измерений. РСА-интерферометрия использует пару снимков одного участка земной поверхности, сделанных с двух близких, локально параллельных орбит одного и того же спутника. Получаемую после обработки интерферометрическую картину, можно проинтерпретировать как поле смещений земной поверхности в направлении на спутник за интервал времени между парой снимков. Более подробно методика обработки и анализ полученных данных приведен в работе [Акматов и др., 2020].

РСА-интерферометрия активно используется для мониторинга СДЗК, т.к. в случае этого метода нет необходимости производить натурные измерения на территории изучаемого геодинамического полигона. Существующие миссии спутников, к примеру, Sentinel-1A и Sentinel-1B, позволяют получать данные на бесплатной основе и без задержки информации по времени. Однако следует отметить, что для получения картины смещений методом РСА-интерферометрии в районе исследований должно быть достаточное количество, так называемых «устойчивых отражателей» [Михайлов и др., 2016; Boncori, 2019]. В этом отношении методы РСА-интерферометрии не слишком хорошо работают для территорий с большим количеством растительности.

В работе [Boncori, 2019] приводится обзор опыта использования РСА-интерферометрии для задач анализа смещений в районах землетрясений с магнитудой $M > 4$. Так же описаны основные методы поправок на ошибки в спутниковых данных (ионосферная и тропосферная корректировки). В работе [He et al., 2019] на примере землетрясения Кумамото (16 апреля 2016 года, Япония) изложена детальная методология обработки радарных данных для получения поля смещений для районов сильных землетрясений.

В таблице 1.1 приведена сводная характеристика инструментальных методов измерения параметров СДЗК. Можно видеть, что все методы очень требовательны к инфраструктуре геодинамического полигона и не все они применимы для некоторых масштабов. К примеру, лазерное сканирование невозможно применить для масштабов 30-100 км, в рамках которого полигон еще является локальным. А такие установки как лазерные интерферометры-деформографы устанавливаются в единственном количестве, на специальных геофизических обсерваториях.

Таблица 1.1 – Методы измерений современных движений земной коры

№	Метод	Результат измерения и обработки	Точность измерений	Метод получения данных
1	Высокоточное повторное нивелирование	Положение точки по высоте, изменение высоты (вертикальные смещения, оседания)	Не более 0.8 – 2 мм на километр нивелирного хода	Полевая съемка
2	Высокоточные линейно-угловые построения	Положение точки в плане, углы между базами измерений, приращение плановых координат (горизонтальные смещения) и приращение углов между базами наблюдений.	0.5'' – 2'' при измерении углов, до 1-3 мм при определении координат	Полевая съемка
3	Высокоточные дальномерные измерения	Длина базы наблюдения, изменение длины базы наблюдения	Не более 10^{-7} – 10^{-8} м/м	Полевая съемка, автоматический режим
4	Лазерное сканирование	Облако точек, цифровая модель поверхности, изменение поверхности объекта	ВЛС: 80 – 100 мм МЛС: 50 – 80 мм НЛС: 3 – 15 мм	Полевая съемка, автоматический режим
5	Глобальные навигационные спутниковые системы	Положение точки в плане и по высоте, приращение плановых и высотных координат	Плановые смещения точность до 1-3 мм, смещения по высоте до 3-5 мм	Полевая съемка, автоматический режим
6	Прецизионные лазерные интерферометры и деформографы	Длина базы наблюдения, изменение длины базы наблюдения	Измерение деформаций с точностью до 10^{-12} м/м	Обсерваторские наблюдения, автоматический режим
7	Радарная спутниковая интерферометрия	Цифровая модель поверхности, смещения пикселя (от 25 до 900 м ²) в направлении на спутник	Получение смещений с точностью до 1-3 мм	Без выезда в поле, автоматический режим

Светодальномерные и деформографические наблюдения выполняются в обсерваторском режиме, т.к. приборы чувствительны к окружающей среде. Для геофизических измерений (светодальномерные измерения, наклономерные, деформографические) необходимо организовать постоянную регистрацию измерений прибора и обеспечить долговременные непрерывные

ряды наблюдений. Это необходимо для того, чтобы выявить систематические ошибки измерений, связанные с различными метеорологическими факторами [Мясников, 2019] и выделить деформации, связанные с геодинамическими процессами. Методы РСА-интерферометрии требуют наличия достаточного количества устойчивых отражателей (природных или искусственных), при этом в результате измерений можно получить только компоненту смещения в направлении на спутник.

Таким образом, проведенный анализ показал, что наиболее эффективным и наименее трудоемким методом изучения современного геодинамического режима территорий является ГНСС-метод. Появление средств ГНСС существенно изменило сам принцип построения геодезических сетей на локальных геодинамических полигонах:

- теперь по измерениям на каждом пункте геодинамического полигона с прецизионной точностью одновременно определяются все три координаты;
- появляется возможность непрерывных наблюдений и передачи информации в единый центр данных в масштабе реального времени;
- результаты ГНСС-измерений являются индикаторами динамики деформационных процессов и быть основой для рекомендаций проведения измерений повторными высокоточными нивелировками в наиболее опасных местах;
- появляется свобода в выборе расположения пунктов геодинамической сети, а, следовательно, и ее конфигурации, в зависимости от геологической обстановки, а также и выполнения измерений в короткое время на больших расстояниях.

1.2 Аномальные деформации земной коры и нормативная база, регламентирующая их изучение

При ГНСС-наблюдениях напрямую измеряются смещения марок ГНСС-пунктов, однако необходимо обеспечение неизменности параметров

измерения при изменении условий его проведения в различных системах отсчета (инвариантность) [Мазуров и Дорогова, 2014], поэтому окончательный анализ данных мониторинга проводится по рассчитанным деформациям. Кроме того, в нормативных документах в качестве критериев оценки устойчивости среды рекомендовано использовать скорости деформаций [РБ-019—18, НП-064—17].

Аномальные деформации — это деформации, которые выходят за пределы нормативно установленных значений для данной геологической обстановки и заданного периода времени. Аномальные деформации могут привести к проблемам в геотехническом проектировании и строительстве - к нарушению и повреждению инженерных сооружений. Деформации также представляют большую опасность для подземных сооружений с длительным сроком эксплуатации, когда они накапливаются. В зонах неоднородностей природного и техногенного характера (контакты блоков с различными физико-механическими свойствами, тектонические разломы, зоны дробления, дайки, горные выработки и т.п.) происходит накопление деформаций и образование зон концентрации напряжений, которые могут в итоге инициировать разрушение элементов сооружения.

В Федеральных нормах и правилах, а также в Законе №190-ФЗ (*Статья 26, п.1*) указано, что современные дифференцированные движения земной коры подразделяются на [НП-064-05]:

«1 степень опасности - подвижка по разрыву более или равна 0,3 м, наличие геодинамических зон с градиентом скорости четвертичных движений 10^{-6} м/год и более»;

«2 степень опасности - подвижка по разрыву менее 0,3 м, наличие геодинамических зон с градиентом скорости четвертичных движений от 10^{-9} до 10^{-6} м/год».

В документе [РБ-019-01] дается определение активного разлома, также вводятся понятие геодинамической зоны и градиента тектонических движений. В этих же нормах и правилах продемонстрированы критерии

оценки скоростей деформаций по данным наблюдений за СДЗК на основе ГНСС (рисунок 1.1).

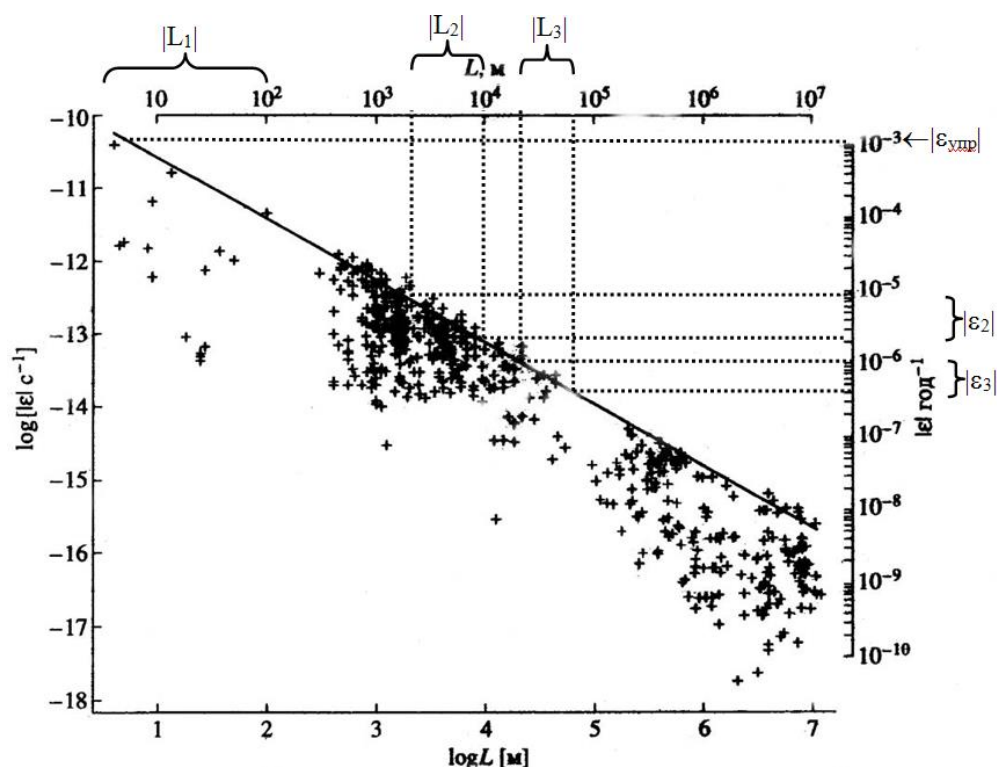


Рисунок 1.1 – Распределение модулей скоростей опасных горизонтальных деформаций в зависимости от расстояния между пунктами наблюдений [РБ-019-18]

В качестве критерия оценки деформаций при выделении геодинамических зон и зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ) для различных масштабных уровней на основе применения глобальных навигационных спутниковых систем можно использовать следующие величины скоростей деформаций земной коры (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Критерии оценки деформаций при выделении геодинамических зон и зон ВОЗ на различных масштабных уровнях [РБ-019-18]

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

Основным критерием оценки геодинамической опасности объектов, находящихся на земной поверхности, является сопоставление измеренных величин со значениями, прописанными в нормативной документации. Когда измеренные величины деформаций участка земной поверхности сопоставимы или превосходит нормативные значения, участок признается геодинамическим опасным [Кузьмин, 1999].

Скорости горизонтальных СДЗК в платформенных асейсмичных областях характеризуются относительно слабыми скоростями – до 5 мм/год, в отличие от орогенных, где они могут достигать до 30 мм/год и более. Поэтому для устойчивого выявления тренда скоростей СДЗК измерения необходимо выполнять в течение длительного интервала времени. Например, ГНСС-наблюдения в районе подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) «Forsmark» (Швеция) позволили установить тренд горизонтальных СДЗК 0,58 мм/год, а изменения длины базисных линий в пределах 1–3 мм/год [Lindborg and Berglund, 2018], в ПИЛ «Olkiluoto» (Финляндия) был выявлен тренд 0,1 мм/год при средней квадратической ошибке (СКО) на уровне 1,0 мм [Nyberg et al., 2013]. Это очень маленькие величины, ниже официальной заявленной паспортной точности метода.

Имеются также данные о суперинтенсивных локальных аномалиях вертикальных и горизонтальных СДЗК в зонах активных разломов. В работе [Kuzmin, 2014] указано, что амплитуда вертикальных движений может достигать в зонах разломов до 50–70 мм/год, пульсационная смена знаков – 0.1–1.0 год, пространственная локализация аномалий 0.1–1.0 км. Среднегодовые скорости деформаций в них также могут быть весьма высокими $\sim 2\text{--}7 \cdot 10^{-5}$ м/год (таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Основные типы аномальных измерений современных вертикальных движений земной поверхности в зонах разломов [Kuzmin, 2014]

Тип аномалии	Обозначение	Морфология аномалии	Соотношение признаков
Региональный однородный наклон	α		$\Delta h = mL$
Региональный изгиб	β		$\Delta h \leq mL$
Локальный изгиб	γ		$\Delta h > mL$
Ступенеобразный сдвиг	S		$\Delta h \sim mL$

Установленные типы аномальных движений находятся в определенном соответствии с региональными типами напряженного состояния земной коры [Kuzmin, 2014].

Таким образом, основным критерием, определяющим геодинамическую опасность особо ответственных подземных объектов на настоящий момент, является превышение наблюдаемых значений относительных деформаций земной поверхности предельных значений, которые регламентированы нормативными документами.

1.3 Деформационный мониторинг средствами ГНСС на геодинамических полигонах

Порядок проведения мониторинга определен нормативными документами. В соответствии со ст. 24 Закона РФ «О недрах» «недропользователь обязан проводит комплекс геологических, маркшейдерских и иных наблюдений, достаточных для обеспечения нормального технологического цикла работ и прогнозирования опасных ситуаций, своевременного определения и нанесения на планы горных работ

опасных зон». Также, согласно п. 262 [РД 07-603-03], маркшейдерские работы включают обоснование и технические решения по созданию системы наблюдений (геодинамических полигонов) за геомеханическими, геодинамическими и геокриологическими процессами»

«Существует два метода определения положения пункта при помощи средств ГНСС: абсолютный и относительный. В абсолютном определяется положения пункта определяется по наблюдениям спутников без опорных наземных станций. Данный метод считается менее точным, т. к. для учета задержек сигнала между спутником и приемником используется эфемеридная информация, передаваемая со спутников в навигационном сообщении» [Кафтан и Мельников, 2018]. Она недостаточно точная для геодинамических наблюдений. «В относительном методе участвует не один ГНСС-приемник, а несколько. При этом конечным результатом является определение не самих пространственных координат пунктов, а приращений координат пространственных векторов, соединяющих ГНСС-пункты» [Кафтан и др., 2019].

«Относительный метод более широко используется для решения задач высокой точности, к которым относится изучение геодинамических процессов. Его недостаток заключается в том, что с увеличением расстояния между приемниками, увеличивается среднеквадратическая ошибка (СКО) определения значений приращений координат» [Мельников, 2018]. Имеются определенные трудности и в учете региональных движений коры, когда все приемники находятся на территории, где движения имеют единое направление. «Эти недостатки можно скомпенсировать путем применения метода высокоточных координатных определений *Precise Point Positioning* (PPP), разработанного Лабораторией реактивного движения НАСА» [Zumberge, 1997; Мельников, 2018]. Метод PPP является более точным, так как в нем при обработке используется корректирующая информация [Witchayangkoon, 1997; Мельников, 2018].

Геодинамические сети по своему построению разделяются на два типа: опорные (абсолютные) и относительные сети [Chrzanowski et al. 1986]. В опорной сети предполагается, что опорные пункты расположены вне зоны смещения земной поверхности.

«При эксплуатации подземных хранилищ газа ГДП представляет собой совокупность реперов, закладываемых по профильным линиям, и обеспечивает изучение влияния эксплуатации подземных хранилищ газа на окружающую среду. В процессе геодинамического мониторинга проводится количественная оценка горизонтальной и вертикальной составляющих векторов сдвижения с помощью ГНСС-оборудования и цифрового нивелира» [Шевчук С.В. и др., 2021].

Для обеспечения безопасной добычи полезных ископаемых важна оценка геодинамической опасности на месторождении. В данном контексте можно привести пример создания геодинамического полигона на Ашальчинском месторождении сверхвязкой нефти в 2008 году [Каленицкий и др. 2014]. ГДП включает в себя 48 грунтовых реперов, 8 скважин и 5 пунктов непрерывного спутникового мониторинга. Наблюдения на месторождении проводятся дважды в год. Результаты мониторинга позволяют количественно оценить горизонтальную и вертикальную составляющие векторов сдвижения и прогнозировать возможные опасности.

В работе [Передерин и др., 2022] представлены результаты исследований, связанных с организацией деформационного мониторинга на промышленной площадке полигона захоронения радиоактивных отходов ФГУП НПО «Радон» (Московская область). В 2008 г. в соответствии с существующими нормативными требованиями был создан постоянно действующий геодинамический полигон, включающий 28 пунктов наблюдений (в т.ч. пункты на крышах зданий и сооружений для мониторинга их осадки). За 2008-2017 было проведено 5 циклов геодезических наблюдений и получены уравненные компоненты векторов базовых линий, а также оценки

точности их определения. Итогом работ стала схема геодинамического районирования и категории устойчивости исследуемого участка.

С точки зрения масштаба ГДП, выделяют три иерархических уровня [Пелилилен, 1978]:

- «глобальный - выполняется для изучения глобального сейсмореформационного режима, движения плит и т.д.»;
- «региональный - осуществляется в пределах конкретных сейсмоопасных зон, разломов, зон возможного возникновения техногенной индуцированной сейсмичности, деформаций»;
- «локальный - производится на локальных участках в радиусе 2-10 километров от объекта исследования».

Практически все исследования современных геодинамических процессов сводятся либо к дискретным, с большим интервалом повторения (годы) ГНСС-наблюдениям на больших расстояниях, которые позволяют оценивать только фоновые, региональные характеристики процессов, либо к «разовым» измерениям на месторождениях полезных ископаемых, когда там случались аварийные ситуации.

В этой связи возникает проблема объективной интерпретации данных становится, которые принципиально зависят от технологии их получения. Наиболее ярко это проявляется тогда, когда в качестве решающих аргументов выступают эмпирические материалы, полученные измерительными системами, обладающими различной пространственно-временной детальностью. В результате возникают представления о неоправданно завышенном (или заниженном) уровне современной геодинамической активности территорий [Кузьмин, 2002].

Это происходит потому, что получение данных о пространственно-временных характеристиках современных геодинамических процессов должно осуществляться на основе мониторинговых систем измерений. А это возможно только путем создания локальных геодинамических полигонов, на которых все наблюдения осуществляются по единому регламенту (точность

измерений, густота пунктов, частота опроса, аппаратурно-методическое обеспечение и т.д.).

Модификация методики наблюдений на геодинамическом полигоне должна быть направлена на повышение точности и надежности получаемых данных, что особенно важно при мониторинге объектов с высоким уровнем опасности и длительным сроком эксплуатации, например, пунктов глубинного захоронения РАО.

1.4 Выводы, цель и задачи диссертационного исследования

Проведенный анализ опыта геодинамических исследований для обеспечения безопасности строительства и эксплуатации подземных сооружений различного назначения, существующих нормативно-методических документов, а также примеров изучения дифференцированных движений на локальных геодинамических полигонах показал, что имеются следующие актуальные научно-методические задачи, решение которых позволит повысить надежность и достоверность оценки параметров деформаций породного массива и выявления зон возможного нарушения изоляционных свойств массива при строительстве подземного сооружения для захоронения РАО.

1. Режимные наблюдения за земной поверхностью в районах строительства подземных объектов является необходимым условием обеспечения их геодинамической и технологической безопасности. Особенности геологического строения для каждого объекта определяют определенные требования к системе деформационного мониторинга. На сегодняшний момент нет единых эффективных и надежных методик полевых наблюдений СДЗК и анализа деформаций, учитывающих специфику ПГЗРО.

2. Геологическая среда крайне неоднородна, тектонические движения имеют квазициклический характер, поэтому имеющихся данных о геодинамическом режиме района строительства ПИЛ и эксплуатации ПГЗРО

в районе Нижне-Канского массива явно недостаточно для принятия обоснованных решений о длительной устойчивости геологической среды.

3. Отсутствует методическая база оценки современных горизонтальных движений земной коры и дифференцирования земной поверхности по скоростям и градиентам деформаций с использованием средств ГНСС, включая методики наблюдений, обработки и интерпретации данных, критериев выделения участков высококонтрастных короткопериодных деформаций и т.д. Необходим также учет пространственно-временного масштабного фактора, который существенно влияет на величины деформаций в зависимости от длительности наблюдений и масштабов геодинамического полигона. Этого нет ни в одной методике, хотя и упомянуто в нормах Ростехнадзора.

4. В разработанных нормах и правилах методические рекомендации к выбору мест их размещения не доведены до инженерного уровня принятия решений. Отсутствуют критерии оценки активности тектонических нарушений, оценки опасных скоростей деформаций, требования к сетям наблюдений и т.д.

5. Работы на локальном полигоне в районе строительства ПИЛ должны обеспечить точность определения смещений в плане не ниже 5 мм. Для обеспечения такой точности имеется ряд проблем, в основном связанных с недостаточной разработкой методологических основ, необходимых для достижения единства проведения полевых наблюдений и контроля их качества.

На основании вышеизложенного была сформулирована цель диссертационной работы - выявление зон возможного нарушения изоляционных свойств массива горных пород для обеспечения безопасности захоронения высокоактивных радиоактивных отходов в геологических формациях Нижне-Канского массива.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

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 методику оперативного контроля работы ГНСС-приемников в физико-географических условиях района расположения объекта.

3. Исследовать и оптимизировать маркшейдерско-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.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО АНАЛИЗА

2.1. Определение движений земной поверхности по результатам ГНСС-измерений

Методика высокоточных повторных или непрерывных ГНСС-измерений подразумевает получение двух типов данных о современных движениях земной коры, по которым затем выполняется деформационный анализ: изменения координат по времени (смещения) и скорости смещений. С физической точки зрения это параметры, описывающие кинематику движений структурно-тектонических блоков земной коры. На выходе мы должны получить визуализацию (карты), которые характеризуют изменение во времени абсолютных величин смещений, их скорости и направления.

Смещение земной поверхности определяется как изменение координат за интервал времени t , который может составлять от нескольких дней до десятков лет. В случае использования постоянно действующих ГНСС-станций, интервал может быть выбран во время постобработки. Смещения земной поверхности являются важной информацией для анализа геодинамической обстановки в районе. Совокупность графиков и карт смещений в зависимости от времени позволяет оценивать местоположение и отслеживать развитие и затухание аномальных зон деформаций, связанных с опасными геологическими процессами.

Расчет смещений производится по формуле 2.1:

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

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

Погрешность смещения U_t , в случае независимых измерений определяется по формуле 2.2:

$$\sigma_U = \sqrt{\sigma_{P_1}^2 + \sigma_{P_2}^2}, \quad (2.2)$$

где σ_U - погрешность смещения U_t , мм; σ_{P_1} - СКО определения координат точки в момент времени t_1 , мм; σ_{P_2} - СКО определения координат точки в момент времени t_2 , мм.

Несмотря на то, что использование различных точек отсчета при эпохальном анализе движения земной поверхности дает большие массивы данных для анализа, средняя скорость смещений является не менее важной характеристикой. Это связано с тем, что СДЗК включает в себя интегрально смещения, которые возникают в результате интерференции смещений от различных глубинных источников. Поэтому для их изучения необходимо применять соответствующие методы. Традиционное описание современных движений векторными схемами не дает полного представления о важных особенностях этих движений, поскольку они, согласно принципу Коши, в общем случае могут представлять суммарный эффект параллельного переноса блоков земной коры, чистой деформации (дилатация плюс формоизменение) и их вращения как абсолютно твердых тел, а именно знание этих величин весьма важно при решении геологических и геофизических задач, связанных в том числе и с изучением СДЗК.

При мониторинге на ГДП традиционно рассчитывается среднегодовая скорость СДЗК, поскольку она является более устойчивой характеристикой по сравнению с другими параметрами. Однако, смещения земной поверхности могут иметь высокочастотную циклическую компоненту, а в среднем иметь близкую к нулю скорость СДЗК. В отличие от смещений, среднегодовые скорости можно оценить точно только имея, ряд наблюдений в течение длительного периода, который зависит от степени тектонической активности района.

Расчет скорости СДЗК производится по формуле 2.3:

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

где U_t – приращение координат точки за эпоху от t_1 до t_2 ; t_1 – начальный момент времени, точка отсчета смещения; t_2 – конечный момент времени.

Погрешность скорости V_t определяется по формуле 2.4:

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

Тектоническим разломам принадлежит определяющая роль в направленности современных движений. Различные аспекты формирования разломно-блоковых структур рассмотрены в работах М.А. Садовского, М.В. Раца, С.В. Гольдина, В.Г. Трифонова, Г.Г. Кочарана, Ю.Я. Ващилова, С.И. Шермана, К.Ж. Семинского, Р.М. Лобацкой и др. Первым предложил дискретно-блоковое строение литосферы акад. М. А. Садовский [Садовский, 1979]. В работе [Шерман и др., 1992] справедливо утверждается, что само понятие «блок», рассматриваемое вне связи с деформационными процессами фактически, теряет смысл. Структурно-тектонический блок может иметь два состояния – консолидированное и неконсолидированное. Консолидированная часть при приложении внешних сил деформируется как единое образование. В неконсолидированной (это обычно границы блоков) регистрируются деформации на один-два порядка превышающие значения внутри блоков. «Именно зоны активных разломов – узкие протяженные зоны, в которых локализуются наибольшие амплитуды и скорости деформаций, – являются границами современных структурно-тектонических блоков» [Кочарян, 2010].

Таким образом, именно динамика современных движений характеризует нелинейный во времени и в плане характер движений, связанный со степенью опасности потери изоляционных свойств породного массива. Это необходимо учитывать при анализе и прогнозе устойчивости объектов с длительным сроком эксплуатации.

2.2 Определение параметров деформаций земной поверхности

Наиболее известная методика расчета поля тензора деформаций приведена в [Shen et al., 1996] и реализована в пакете программ *grid_strain* и *grid_strain3* [Teza et al., 2008]. Оценка весов пунктов наблюдений производится в соответствии с задаваемой аналитической функцией при которой вес значения смещения обратно пропорционально зависит от математического ожидания меры неоднородности деформации земной коры между интерполируемой точкой и пунктом наблюдений [Shen et al., 1996]. При использовании такой весовой функции может возникнуть проблема некорректной оценки весов пунктов наблюдений, т.к. данные функции не учитывают неоднородности земной коры. Вопрос установления весов измерений в маркшейдерии всегда требует критического отношения к нему. Необоснованное назначение весов может приводить к существенным искажениям результатов.

Главный недостаток такого подхода заключается в отсутствии понимания деформируемого объекта и, соответственно, неопределенности последующей интерпретации его деформации. Метод расчета по треугольникам геодезической сети использует строго отнесенную к физической поверхности область в пределах конечного элемента, что позволяет однозначно интерпретировать его деформацию, полученную по точным значениям смещений его вершин.

Наиболее, простым решением для поиска более точной модели деформации является разбиение тела на геометрические фигуры (конечные элементы), в пределах которых распределение деформации принимается однородным [Dermanis & Grafarend, 1992]. При расчетах по отдельным точкам используются геометрические построения из конечных элементов (треугольники, четырехугольники). Если в качестве вершин конечных элементов используются пункты наблюдений, геометрические построения получаются не равновеликие. В этом случае для устранения эффекта

неравновеликости треугольников необходимо применять масштабные коэффициенты, обратно пропорциональные площадям треугольников [Кафтан и др., 2019]. Кроме того, можно применить и другой подход – интерполировать смещения произвольной сети на вершины регулярной сети конечных элементов. В этом случае проблема неравновеликости геометрических фигур становится не актуальной, но при этом интерполированные значения являются смоделированными, а не измеренными. Это несколько снижает достоверность и точность компонентов тензора деформаций, определенных для конечных элементов регулярной сети.

Процедура может быть выполнена с помощью триангуляции Делоне [Lee & Schachter, 1980], где тело разбивается на небольшие, непересекающиеся равносторонние треугольники с вершинами в известных точках. Преимущество этого подхода заключается в конфигурации сети ГНСС наблюдений для обеспечения высокой точности определения деформации земной поверхности. Это обусловлено формой и размерами конечных элементов (треугольников сети), для которых вычисляются деформации.

«В настоящее время наиболее эффективен отдельный анализ плановых и вертикальных деформаций по результатам повторных ГНСС наблюдений. Для этой цели используется методика». Она основана на подходах [Tsuboi, 1933; Frank, 1966] и заключается в следующем. Полученные из уравнивания разностей измерений векторы пространственных смещений пунктов сетей преобразуются в разности геодезических координат ΔB , ΔL и ΔH . Для этой цели используем следующие формулы» [Кафтан и др., 2019]:

$$\begin{aligned}\Delta B &= \frac{1}{M + H} (-\Delta X \sin B \cos L - \Delta Y \sin B \sin L + \Delta Z \cos B) \\ \Delta L &= \frac{1}{(N + H) \cos B} (-\Delta X \sin L + \Delta Y \cos L) \\ \Delta H &= \Delta X \cos B \cos L + \Delta Y \cos B \sin L + \Delta Z \sin B\end{aligned}, \quad (2.5)$$

$$\text{где } M = \frac{a(1 - e^2)}{W^3}, \quad N = \frac{a}{W}, \quad W = \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}$$

a – большая полуось и e^2 – квадрат эксцентриситета общеземного эллипсоида.

«Разности геодезических широт и долгот представляются в линейном виде плоских координат x и y . Тогда формулы примут вид» [Кафтан и др., 2019]

$$\begin{aligned}\Delta x &= -\Delta X \sin B \cos L - \Delta Y \sin B \sin L + \Delta Z \cos B \\ \Delta y &= -\Delta X \sin L + \Delta Y \cos L\end{aligned}, \quad (2.6)$$

«Для последующей оценки точности искомым деформационных характеристик получают ковариационную матрицу плоских векторов смещений пунктов

$$Q_{dx} = f_{dx} Q_{dX} f_{dx}^T, \quad (2.7)$$

где Q_{dx} - ковариационная матрица пространственных компонент смещений, полученная из уравнивания разностей спутниковых измерений (2.7), а f_{dx} - матрица частных производных функций плоских смещений от соответствующих пространственных трехмерных аргументов $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ » [Кафтан и др., 2019].

Матрица частных производных будет определена как

$$f_{dx} = \begin{pmatrix} -\sin B_1 \cos L_1 & -\sin B_1 \sin L_1 & \cos B_1 \\ -\sin L_1 & \cos L_1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -\sin B_n \cos L_n & -\sin B_n \sin L_n & \cos B_n \\ -\sin L_n & \cos L_n & 0 \end{pmatrix}, \quad (2.8)$$

где индекс коэффициентов является порядковым номером пункта геодинамической сети».

«Имея значения компонент двумерных плоских векторов смещений (2.8), получим формулы описания деформаций в пределах конечных элементов сети (треугольников)» [Кафтан и др., 2019].

«Для каждого конечного элемента в плоской прямоугольной системе координат имеем значения координат вершин x, y и разностей координат (горизонтальных смещений) $\Delta x, \Delta y$ полученных из уравнивания повторных спутниковых измерений. Тогда плановые деформации $\gamma_1, \gamma_2, \Delta$ и ω ;

$$\begin{aligned}\gamma_1 &= \frac{x_2(\Delta y_3 - \Delta y_1) + y_2(\Delta x_3 - \Delta x_1) - x_3(\Delta y_2 - \Delta y_1) - y_3(\Delta x_2 - \Delta x_1)}{x_2 y_3 - x_3 y_2} \\ \gamma_2 &= \frac{x_2(\Delta x_3 - \Delta x_1) + y_2(\Delta y_3 - \Delta y_1) - x_3(\Delta x_2 - \Delta x_1) - y_3(\Delta y_2 - \Delta y_1)}{x_2 y_3 - x_3 y_2}\end{aligned}\quad (2.9)$$

$$\begin{aligned}\Delta &= \frac{x_2(\Delta y_3 - \Delta y_1) - y_2(\Delta x_3 - \Delta x_1) - x_3(\Delta y_2 - \Delta y_1) + y_3(\Delta x_2 - \Delta x_1)}{x_2 y_3 - x_3 y_2} \\ \omega &= \frac{-x_2(\Delta x_3 - \Delta x_1) - y_2(\Delta y_3 - \Delta y_1) + x_3(\Delta x_2 - \Delta x_1) + y_3(\Delta y_2 - \Delta y_1)}{2(x_2 y_3 - x_3 y_2)}\end{aligned}$$

где γ_1, γ_2 - деформация сдвига, Δ - деформация дилатации, ω - деформация вращения» [Кафтан и др., 2019].

«Деформации максимального и минимального растяжения и азимут главной оси деформаций определяется выражением

$$E_1 = \frac{1}{2} \left(\Delta + \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2} \right), \quad E_2 = \frac{1}{2} \left(\Delta - \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2} \right), \quad (2.10)$$

$$\operatorname{tg} 2\theta_0 = -\frac{\gamma_2}{\gamma_1}, \quad (2.11)$$

Оценку точности компонент деформаций в пределах каждого треугольника выполняем путем получения их ковариационной матрицы

$$Q_{(\gamma_1, \gamma_2, \Delta, \omega)} = f_{(\gamma_1, \gamma_2, \Delta, \omega)} Q_{dx} f_{(\gamma_1, \gamma_2, \Delta, \omega)}^T, \quad (2.12)$$

Матрица частных производных искомых компонент деформаций по аргументам плановых смещений будет иметь вид

$$f_{(\gamma_1, \gamma_2, \Delta, \omega)} = \frac{1}{x_2 y_3 - x_3 y_2} \begin{pmatrix} -y_2 + y_3 & x_2 - x_3 & -y_3 & -x_3 & y_2 & x_2 \\ -x_2 + x_3 & y_2 - y_3 & -x_3 & -y_3 & x_2 & -y_2 \\ y_2 - y_3 & -x_2 + x_3 & y_3 & -x_3 & -y_2 & x_2 \\ x_2 - x_3 & y_2 - y_3 & x_3 & y_3 & -x_2 & -y_3 \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

Здесь индексы при коэффициентах являются номерами вершин конечного элемента, к которому относятся соответствующие компоненты деформаций. Далее определяем средние квадратические ошибки компонент деформаций по формуле» [Кафтан и др., 2019]

$$m_{(\gamma_1, \gamma_2, \Delta, \omega)} = \mu \sqrt{\text{diag} Q_{(\gamma_1, \gamma_2, \Delta, \omega)}}. \quad (2.14)$$

«Аналогичным образом производится оценка точности деформаций максимального и минимального растяжения и азимута их осей, как функций от четырех главных деформационных характеристик» [Кафтан и др., 2019]. Однако в рамках данной методики предполагается, что один из пунктов ГНСС-сети должен оставаться неподвижным (или условно неподвижным), чтобы обеспечить возможность проведения вычислений.

В связи с этим был создан алгоритм, а также разработана программа для расчета деформационных характеристик конечных элементов треугольной формы. В данном случае вершинами треугольников являются ближайшие друг-другу ГНСС-пункты сети Нижне-Канского массива [Маневич и др., 2023]. Полученные данные использованы для построения карты деформаций.

Алгоритм выполняется на основе методики триангуляции трех ГНСС-станций (рисунок 2.1, а). Сначала определяются восточная и северная составляющие скорости, затем вычисление векторов общей скорости. Затем проводятся три медианы, которые пересекаются в точке - центре тяжести треугольника. После этого центр тяжести рассматривается как начальная точка (0,0) новой системы координат, где оси двух систем координат (исходная и новая) параллельны друг другу. В исходный недеформированный треугольник вписывается внутренняя окружность и вычисляются векторы полной скорости каждого ГНСС-пункта.

Перемещение вершин треугольника определяет его деформацию. Тогда, вписанная окружность превращается в эллипс, а вектор центроида недеформированного треугольника сохраняет свою первоначальную форму после процесса преобразования [Lazos et al., 2020]. На рисунке 2.1, б, показаны недеформированный (пунктирный) и деформированный (сплошной) треугольники включают внутренний круг и эллипс, соответственно. Центроид треугольника расположен в начальной точке (0,0) системы координат, а также в центре окружности и эллипса. Большая и малая оси окружности (красная и синяя пунктирная линия) и эллипса (красная и синяя сплошная линии) перпендикулярны друг другу. Векторы скорости (черные векторы) показывают смещение каждого ГНСС-пункта. Угол между большой осью недеформированного треугольника и большой осью деформированного треугольника - угол поворота.

Учитывая факт, что на территории ГДП имеется более 30 ГНСС-пунктов, процедура построения приводит к формированию большого количества потенциальных треугольников.

Далее выполняется расчет следующих параметров:

- а) скорость горизонтальных смещений (V);
- б) максимальное горизонтальное удлинение (ϵ);
- в) максимальная деформация сдвига (γ);
- г) дилатация (Δ).

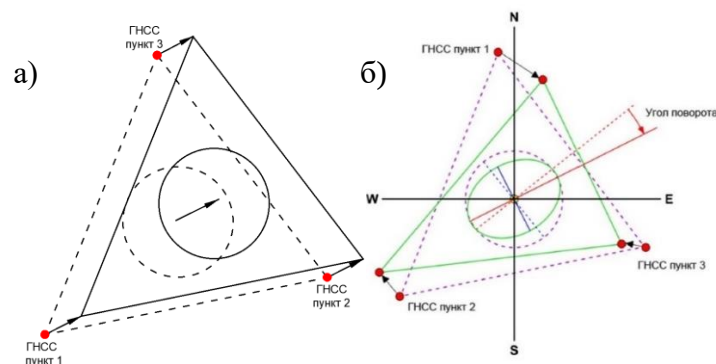


Рисунок 2.1 – Характер смещений конечного элемента, образованного тремя ГНСС-пунктами: а) последовательное смещение; б) поворот.

Азимут перемещения — это среднее направление, в котором движется ГНСС-пункт. Азимут измеряется в горизонтальной плоскости, берет свое начало с севера. Так, например, вектор перемещения, направленный строго на запад, имеет азимут 270 °.

Скорость вращения конечного элемента, дается как в градусах в год, так и в миллиардных долях радиана в год (нанорад в год).

Максимальное (расширение) (ε) - горизонтальное удлинение стороны треугольника измеряется по самой длинной оси эллипса деформации.

$$\varepsilon = \frac{(L_1 - L)}{L}, \quad (2.15)$$

где L_1 - конечная длина и L - исходная длина.

Корреляция ε с доминирующей тектонической обстановкой области показывает тип тектонической активности - растяжение или сжатие.

На рисунке 2.2 показаны пять возможных вариантов деформаций, внизу приведен типовой символ на карте. Пунктирные кривые показывают исходные круги, которые были искажены в эллипсы, показанные сплошными кривыми, с S_{1H} оси обозначены красными линиями и буквой S_{2H} линии синего цвета. На карте обычно показывают черными стрелками сжатие, и белыми - растяжение.

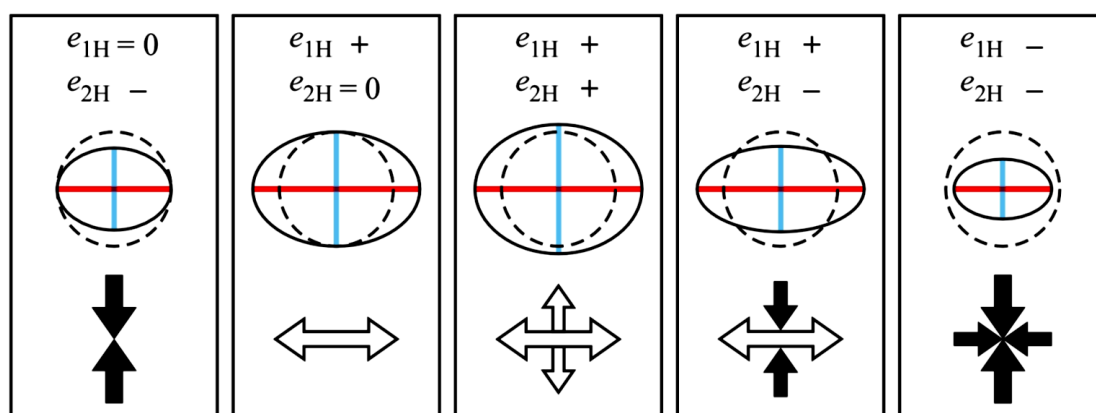


Рисунок 2.2 – Возможные варианты деформации эллипса (треугольного элемента)

Следующий показатель - максимальная деформация сдвига γ_{max} (рисунок 2.3) может использоваться в качестве индикатора активных зон разломов, поскольку деформация вдоль зон разломов часто связана со сдвигом. В частности, сдвиговые и, следовательно, высокие значения γ_{max} в основном связаны с активными сбросовыми разломами, а также с активными сдвиговыми разломами, поскольку эти типы разломов полностью или частично связаны с режимом растяжения. С другой стороны, низкие значения γ_{max} обычно регистрируются в областях с компрессионным режимом, где сдвиг ограничен, поскольку преобладают пластичные условия.

γ_{max} выражается следующим уравнением:

$$\gamma_{max} = e_{1H} - e_{2H}, \quad (2.16)$$

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

Максимальная деформация сдвига измеряется под углом 45° от оси максимальной горизонтальной деформации и равна разнице $e_1 - e_2$ (см. рисунок 2.4).

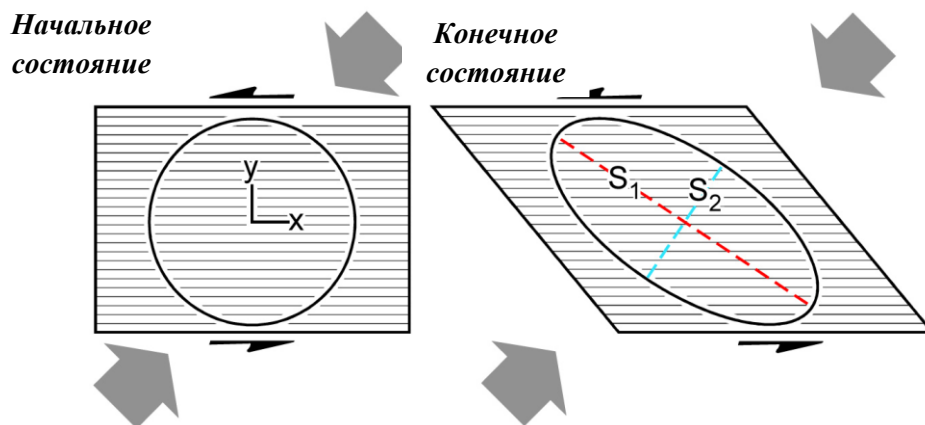


Рисунок 2.3 – Деформация сдвига

Оценка дилатации Δ (рисунок 2.4) выполняется по следующему уравнению:

$$\Delta = e_{1H} + e_{2H}, \quad (2.17)$$

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

Затем по рассчитанным значениям деформационных характеристик непосредственно по данным прямых геодезических измерений производится их экстраполяция и интерполяция на всю площадь исследования по существующим методикам.

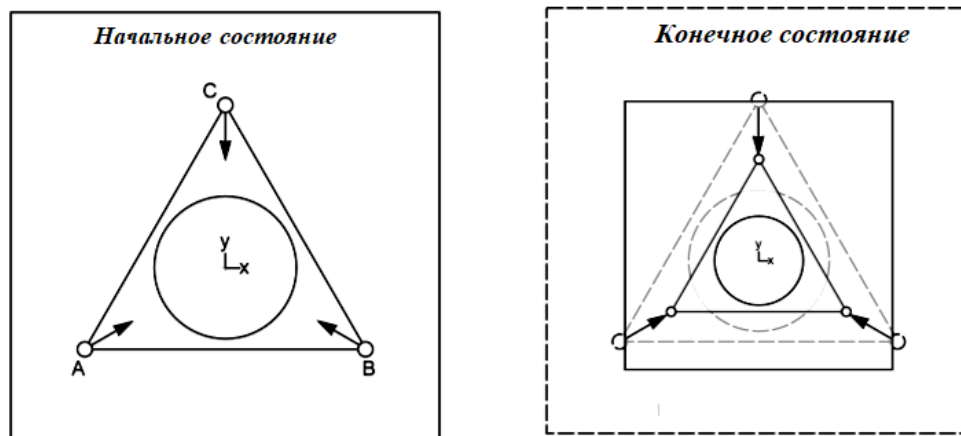


Рисунок 2.4 – К расчету площадных деформаций

2.3 Данные, используемые при деформационном анализе

В дальнейшем, в деформационном анализе используются данные, полученные для Нижне-Канского ГДП другими авторами в 2010-2018 гг. [Кафтан и др., 2019; Татаринов и др., 2019] и данные, полученные лично автором в 2019-2022 гг.

«В 1993 году в Красноярском крае были начаты исследования с целью выявления геологических формаций и площадок, пригодных для строительства подземного комплекса по изоляции высокоактивных РАО. В качестве наиболее соответствующей геологической концепции и геологическим критериям. Результаты исследований выявили перспективные участки, в том числе северную часть верхнепротерозойского Нижне-Канского гранитоидного массива, представляющего собой один из крупнейших в Средней Сибири» [Лобанов и др., 2015].

Тектонические нарушения образуют иерархическую блоковую структуру, пространственно-временная эволюция напряженно-

деформированного состояния которой определяет изоляционные свойства массива. Наиболее значимым разрывным нарушением является Приенисейский глубинный разлом длиной около 700 км, известный на данном участке как Муратовский. Разрывы представлены субмеридиональными структурами северо-западного и запад-северо-западного и субширотного простирания.

На рисунке 2.5 приведена разломно-блоковая схема района, разработанная геологами ИГЕМ РАН, которая была положена в основу геодинамической модели территории. Разрывные нарушения северо-западного, западо-северо-западного направлений образуют тектонопару с субмеридиональными взбросами, являясь сбросо-сдвигами, а северо-восточного простирания – в основном левосторонними сдвигами [Андерсон и др., 2011]. Средняя ширина зон динамического влияния разломов оценивается в 0.7–1.3 км.

В районе с 2012 г. функционирует геодинамический полигон в составе 30 ГНСС-пунктов (рисунок 2.6), на которых ежегодно проводились наблюдения за пространственным изменением их координат в режиме полевых кампаний [Кафтан и др., 2019]. Его недостатком является несовершенная структура, при которой южная часть района оказалась неохваченной измерениями.

Традиционно для закрепления пунктов спутниковых геодезических сетей на местности используются типы геодезических центров с устройствами принудительного центрирования в виде пилонной железобетонной конструкции, трубчатого центра с бетонным или анкерным якорем [Правила закладки..., 1993.; Правила закрепления..., 2001, Kaftan et al., 2024.]. На геодинамическом полигоне Нижне-Канского массива используется конструкция геодезического пункта, представляющая собой стальной знак (Ø150 мм) с устройством принудительного центрирования и обсадной трубой (Ø300–350 мм), которая заполнена теплоизоляционным материалом (рисунок 2.7). Данный знак

заглубляется на трехметровую глубину и выступает над поверхностью земли на 1–1.5 метра.

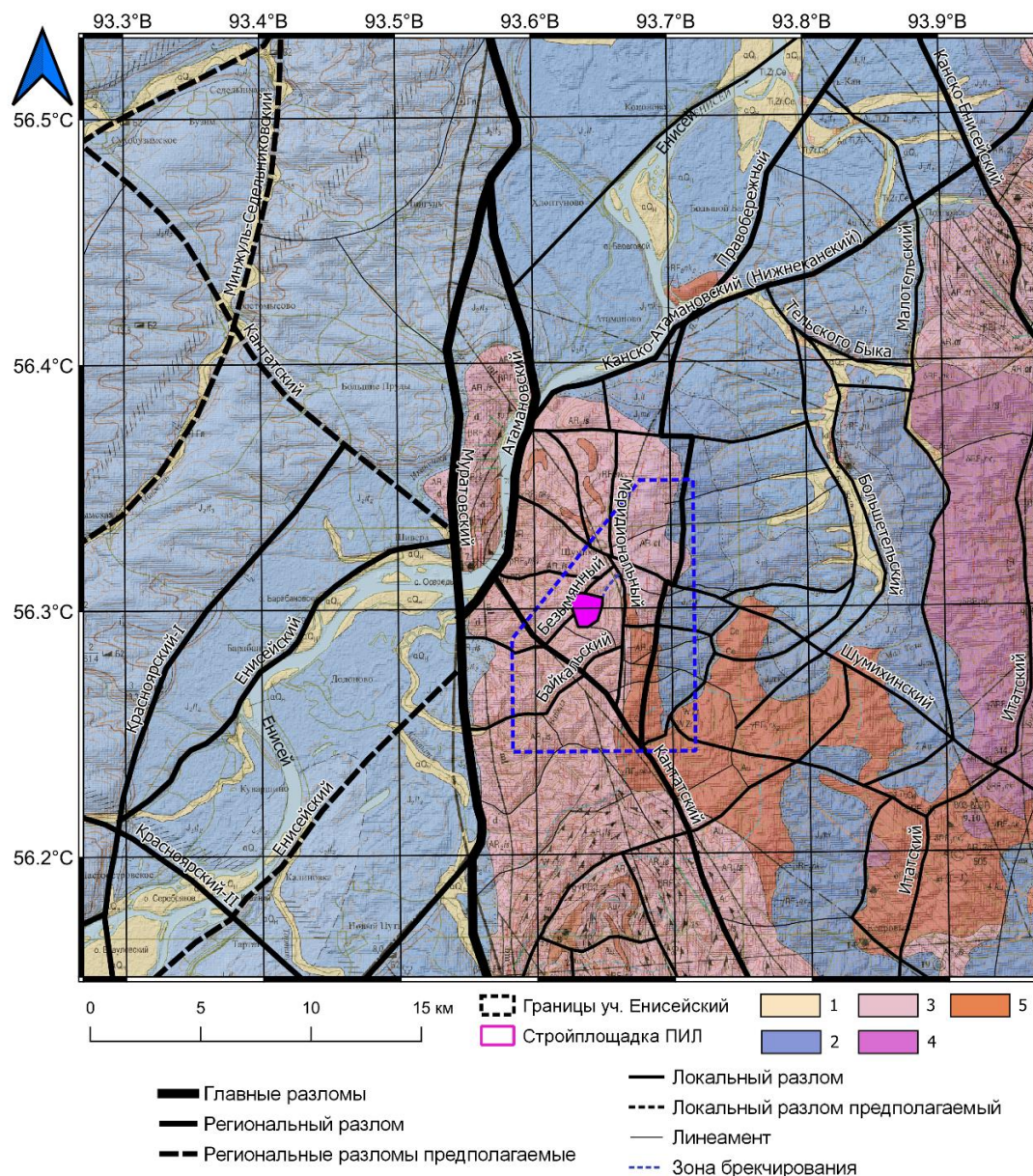


Рисунок 2.5 – Структурно-тектоническая района. Толстые черные линии – главные разломы, линии средней толщины – региональные разломы, тонкие линии – локальные разломы, пунктирные линии – предполагаемые разломы. 1 – аллювиальные отложения поймы (галечники, пески); 2 – юрские отложения (песчаники, алевролиты, аргиллиты); 3 – ранние архейские гнейсы, кристаллосланцы атамановской серии; 4 – позднеерифейские диориты и гранодиориты; 5 – позднеерифейские граниты [Акматов и др., 2023]

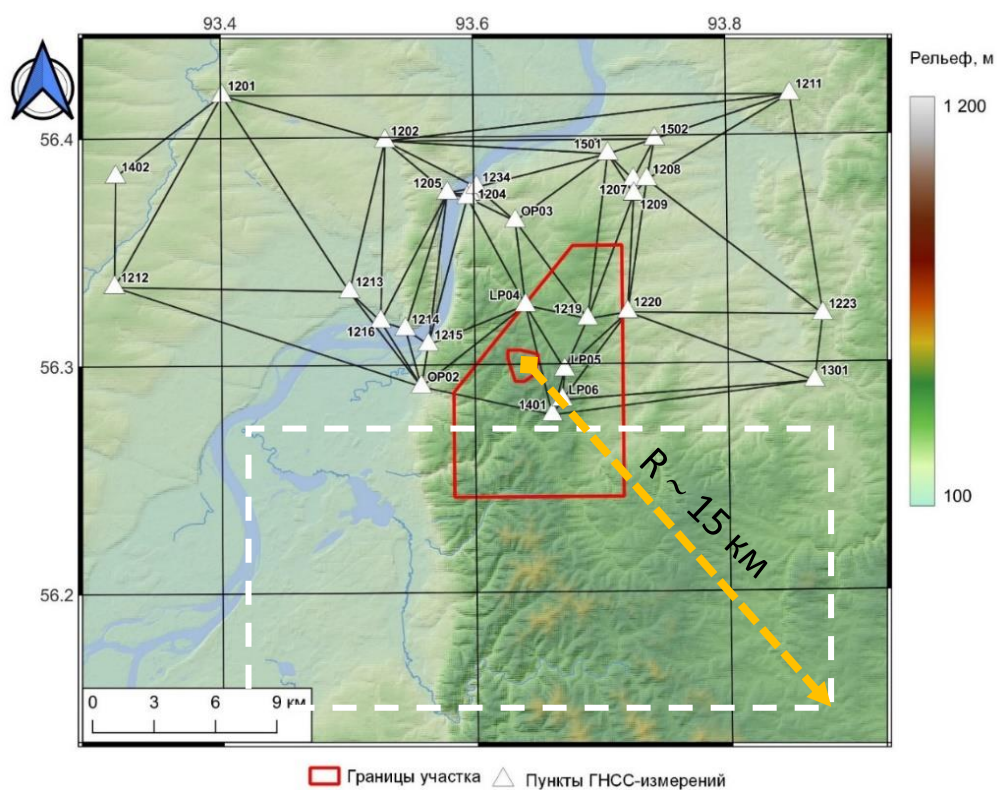


Рисунок 2.6 – Нижне-Канский геодинимический полигон, 2022 г.
Белым пунктиром выделена площадь, не охваченная наблюдениями, согласно требованиями нормативов. R – радиус, рекомендованный МАГАТЭ для геологического изучения ближней зоны захоронения РАО

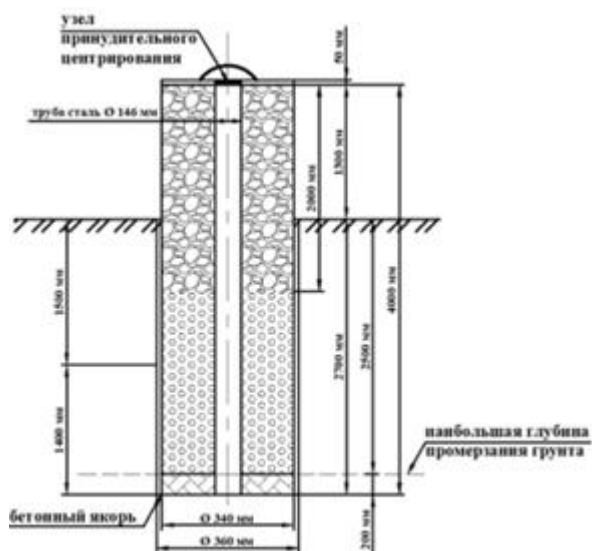


Рисунок 2.7 – Конструкция геодезического пункта ГНСС-наблюдений
[Маневич и др., 2022]

На настоящий момент накоплен длительный временной ряд данных (с 2010 по 2022 гг.) на ГНСС-пунктах геодезической сети, который позволяет произвести оценку абсолютных величин и динамики движений на исследуемой территории. Были построены графики определения координат всех пунктов ГДП с учетом СКО. На рисунках 2.8-2.9 показаны графики для пунктов ГДП 1201 и 1211. Как видно, смещения пунктов имеют волнообразный характер. Это связано с известным фундаментальным свойством земной коры - цикличностью геодинамических процессов [Гзовский, 1975; Татаринов, 2017].

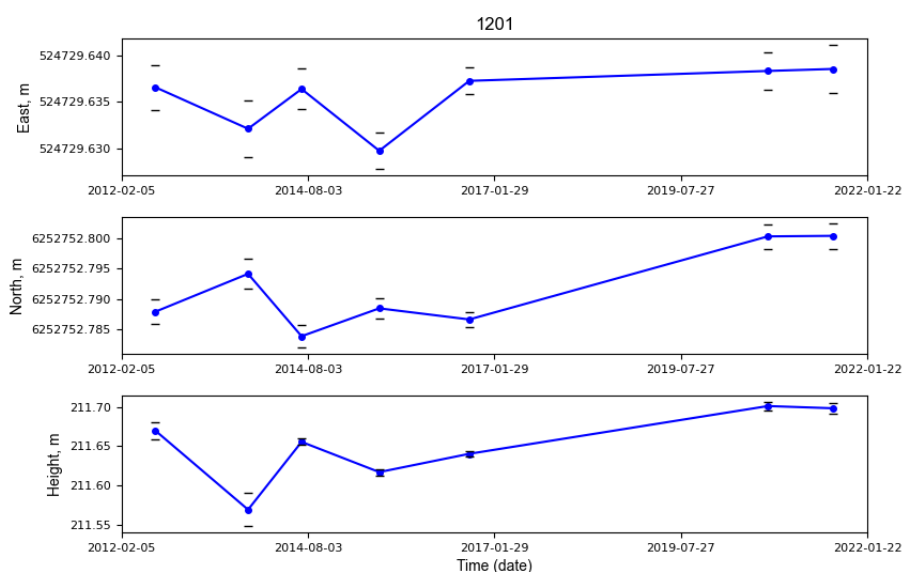


Рисунок 2.8 – Пространственные изменения координат ГНСС-пункта 1201

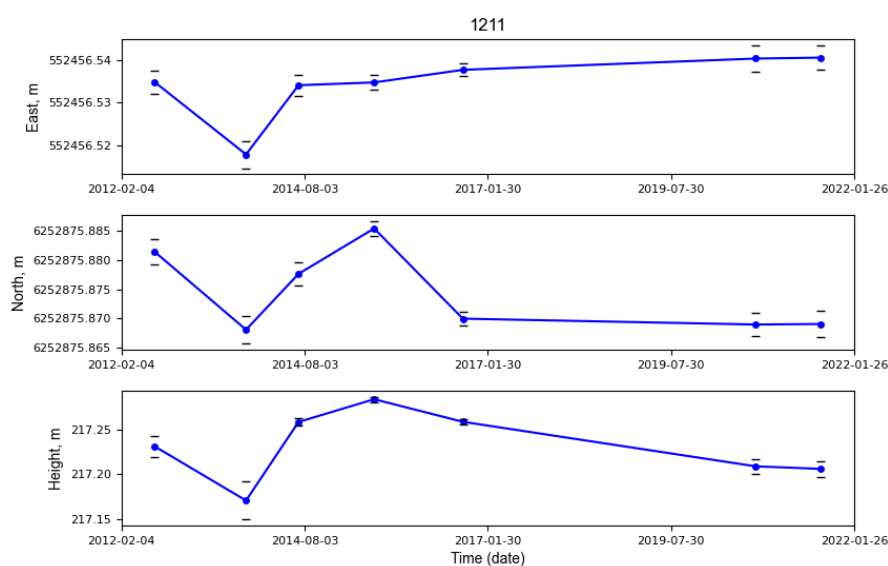


Рисунок 2.9 – Пространственные изменения координат ГНСС-пункта 1211 [Гвишиани и др., 2022]

2.4 Выводы по главе 2

1. Выполнение высокоточных ГНСС-наблюдений позволяет получить характеристики, описывающие кинематику современных движений структурно-тектонических блоков земной поверхности, связанные со степенью опасности нарушения изоляционных свойств пород. Изменение их абсолютных значений и направленности движения во времени и пространстве носит нелинейный, квазициклический характер, поэтому существует объективная необходимость учета динамики пространственно-временного развития деформационных процессов, особенно для подземных объектов, имеющих сверхдлинный срок эксплуатации.

2. Для построения кинематических и динамических моделей по результатам измерений параметров СДЗК средствами ГНСС разработаны теоретические основы, включая алгоритм и программу расчета деформационных характеристик для конечных элементов треугольной формы, центрами углов которых являются ГНСС-пункты геодинимической сети Нижне-Канского массива.

3. Собраны и систематизированы данные о смещениях, полученные на геодинимическом полигоне Нижне-Канского массива за период с 2012 по 2022 год. Установлено, что структура геодинимического полигона не позволяет контролировать деформационные процессы в соответствии с требованиями нормативов, так как южная часть ближней зоны ПИЛ оказалась неохваченной измерениями.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДА МОНИТОРИНГА СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ НИЖНЕ-КАНСКОГО МАССИВА

Анализ результатов ранее выполненных наблюдений на геодинимическом полигоне Нижне-Канского массива выявили ряд проблем, которые связаны с нерешенностью методологических задач, необходимых для достижения заданной точности измерений и достоверности последующего моделирования полей деформаций.

Требования к ГНСС-наблюдениям на геодинимическом полигоне определяются следующими условиями:

а) спецификой захоронения РАО, когда выбран слабоактивный участок со значениями скоростей СДЗК, соответствующих платформенному тектоническому режиму;

б) установленными в нормативных документах Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору критериями максимально возможных скоростей деформаций при одновременной необходимости экстраполяции рассчитанных деформаций на сверхдлинные периоды времени.

Первое условие может быть учтено путем:

- использования наиболее современных ГНСС-приемников и методических приемов проведения полевых наблюдений, повышающих их точность;
- совершенствования и оптимизации структуры сети;
- оперативного контроля полевых наблюдений для исключения ошибок и др.

Считается, что самым надёжным метрологическим способом контроля наблюдений является проверка аппаратуры на эталонах, например, как это было сделано на полигоне ЦНИИГАиК в Московской области [Кафтан и др., 2020]. В этой связи ниже описана разработанная технология проведения

полевого контроля точности ГНСС-аппаратуры в физико-географических условиях района.

Для учета второго условия была исследована зависимость скоростей деформаций от расстояний между пунктами наблюдений (так называемый масштабный эффект). Решалась задача экстраполяции результатов ГНСС-наблюдений за СДЗК, полученных за короткие промежутки времени 5–10 лет на интервал времени, в течение которого сохраняется экологическая опасность РАО (более 10 тыс. лет). В этом случае даже 1-2-х мм ошибка в определении ежегодной скорости деформаций накапливается и превращается в опасную для разрушения горных пород величину. На основе этих исследований был разработан метод прогноза скоростей деформации в зависимости от размеров базисных линий. Ниже описаны основные элементы разработанного метода.

3.1 Метод полевого контроля точности ГНСС-аппаратуры

В работах [*Chatziniko et al., 2010; Dilssner et al., 2010; Montenbruck et al., 2022*] утверждается, о том, что для любого типа антенны, одним из наиболее существенных факторов, ограничивающих точность определения местоположения, являются вариации фазовых центров антенн. Вариации фазового центра (PCV) отражают компонент калибровки антенны, который зависит от направления входящего сигнала. Величина PCV может быть представлена как функция угла возвышения в рамке антенны (1D) или угла возвышения и азимута в рамке антенны (2D).

Существует несколько организаций, занимающихся калибровками ГНСС-антенн со свободным доступом для всех желающих. Самый известный из них – Национальная геодезическая служба США (NGS) [<https://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL>]. На ее сайте представлены калибровки большинства ГНСС-антенн. На данный момент имеется три метода создания корректирующей модели вариаций фазовых центров: относительные

калибровки, абсолютные калибровки, измерения в безэховой камере [Dvulit et al., 2021; Schmid et al., 2015; Sutyagin and Tatarnikov, 2020].

В процессе относительной калибровки все смещения антенн (PCO) и отклонения фазового центра (PCV) вычисляются относительно эталонной антенны, которой, как правило, присваиваются нулевые значения PCV. В случае относительных калибровок NGS в качестве эталонной антенны используется кольцевая дроссельная антенна Дорна Марголина [Mader, 1999], тип T (AOAD/M_T). Таким образом, относительная калибровка корректируется из-за опережения/задержки фазы, которую испытывает эталонная антенна. При абсолютной калибровке все смещения антенны и изменения фазового центра не зависят от эталонной антенны. Для проведения абсолютной калибровки тестируемая антенна перемещается с помощью роботизированного кронштейна таким образом, чтобы конкретный спутниковый сигнал принимался под разными углами тестовой и эталонной антеннами [Gerald and Mader, 1999]. Это угловое разделение позволяет не брать в расчет эффекты эталонной антенны, оставляя только смещения антенны PCO и изменения фазового центра PCA тестовой антенны. Третий способ, как и предыдущий, выполняется тоже с помощью роботизированного кронштейна, но измерения происходят в безэховой камере. Основным различием заключается в том, что антенна принимает сгенерированный сигнал, а не реальный. В результате этого и в силу различий в условиях приема сигнала в процедурах калибровки, предложенных Geo++ и Uni-Bonn [Wubben et al., 2006], формируются различия в создаваемых ими моделях коррекции. Однако, даже калибровочные данные, полученные с этих центров, могут быть не достоверными, а значит, требуется создать методику для контроля антенн в полевых условиях.

Обычно при проверке сравниваются между собой измеренные и эталонные расстояния. Но так как в одновременном сеансе ГНСС-наблюдений измеряются пространственные приращения координат сразу между всеми m ГНСС-пунктами эталонного базиса, во всех их n комбинациях, то наличие

избыточных измерений позволяет оценить не только точность координатной компоненты, но и вклад в результат измерения каждого комплекта ГНСС-аппаратуры индивидуально. Не имея эталонных геодезических построений, в полевых условиях удалось реализовать новую методику контроля точности комплекта ГНСС-аппаратуры и единственной базовой линии [Кафтан и др., 2020, Кафтан и др., 2023].

В методике полевые измерения осуществляются определенным количеством комплектов измерительной аппаратуры n . При использовании разностного метода оно не может быть менее 2. При этом, чем больше комплектов используется в измерениях, тем надежнее полученные оценки.

Рассмотрим число сочетаний из n по k :

$$C_n^k = \frac{n!}{(n-k)! * k!}, \quad (3.1)$$

Тогда, например, имея пять ГНСС-приёмников, получим 10 измерений в их всевозможных сочетаниях. В этом случае образуется избыточность $r = n - k = 5$, которая обеспечивает возможность контроля и оценки точности многократных измерений.

Рассмотрим именно этот случай с пятью комплектами аппаратуры. Составляем уравнения связи для каждой из трех пространственных компонент вектора:

$$M_i = M_0 - \delta_j + \delta_k, \quad (3.2)$$

где M_i – измеренное значение, M_0 – предварительное приближенное значение, δ_j – ошибка аппаратуры на начальном пункте, δ_k – ошибка аппаратуры на конечном пункте, i – порядковый номер измерения, j – порядковый номер комплекта на начальном пункте, k – порядковый номер комплекта на конечном пункте.

Уравнение поправок измерений записывается как:

$$v = Ax - l; \quad (3.3)$$

где v – вектор искомых поправок размерностью $n \times 1$, A – матрица коэффициентов уравнений поправок размерностью $n \times n$, x – вектор неизвестных размерностью $(k+1) \times 1$, l – вектор свободных членов размерностью $n \times 1$.

Раскроем состав элементов вектора неизвестных:

$$x = \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ \vdots \\ x_k \end{bmatrix}, \quad (3.4)$$

где x_0 – поправка к предварительному значению измеренного элемента вектора базовой линии, $x_1 - x_k$ – оценки вклада ошибки каждого комплекта аппаратуры в результаты измерений.

Для уравнения связи (3.4) сформируем матрицу коэффициентов уравнений поправок

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Вектор свободных членов уравнения поправок запишем в виде

$$l_i = M_0 - M_i. \quad (3.6)$$

Получив из обработки стандартным коммерческим пакетом СКО определения вектора базовой линии, составляем диагональную весовую матрицу измеренных компонент

$$P = \begin{bmatrix} \frac{\mu^2}{m_1^2} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \frac{\mu^2}{m_n^2} \end{bmatrix}, \quad (3.7)$$

где μ – априорное значение средней квадратической ошибки единицы веса, m_i – средняя квадратическая ошибка измеренной компоненты вектора базовой линии.

Решением уравнения поправок (3.7) под условием суммы $[v^T P v] = \min$ будет выражение:

$$x = -(A^T P A)^+ A^T P l, \quad (3.8)$$

где произведение $(A^T P A)^+ = Q$ представляет собой матрицу обратных весов искомых неизвестных x .

Оценку точности искомых неизвестных осуществляют по формулам:

$$\mu = \sqrt{\frac{v^T P v}{n - k}}; \quad (3.9)$$

$$m_i = \mu \sqrt{\text{diag} Q_{ii}} \quad (3.10)$$

Апробация методики полевого контроля измерительной ГНСС-аппаратуры была проведена на геодинимическом полигоне Нижне-Канского массива в 2020-2021 гг. Пункты контрольной базовой линии в 2021 году располагались в условиях залесенной местности (рисунок 3.1). Длина базовой линии составляла 2079 метров.

Схемы типов геодезических пунктов детально описаны в работе [Маневич и др., 2022]. Измерения выполнялись двухчасовыми сеансами, с дискретностью регистрации ГНСС сигнала – 30 секунд, маска возвышения была установлена на 15° . В контрольных измерениях использовалось 5 комплектов ГНСС-аппаратуры. Это дало возможность образовать 10 пар

сочетаний комплектов при измерении одного и того же вектора. По вышеописанному алгоритму были получены следующие оценки (таблица 3.1).

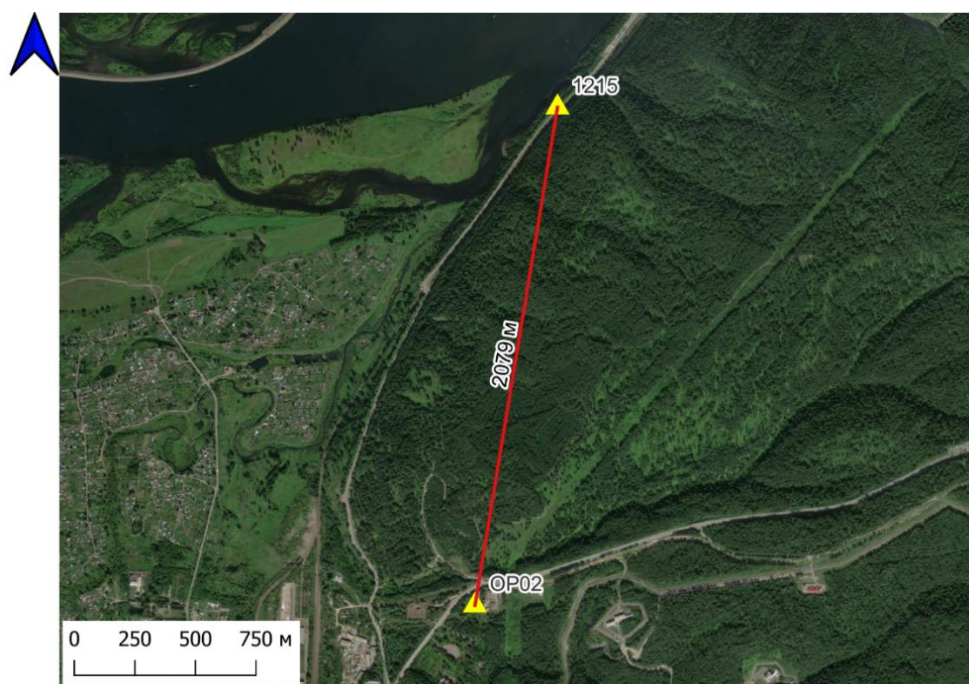


Рисунок 3.1 – Контрольный базисный вектор, использованный для опробования методики в 2020 г.

Таблица 3.1 – Результаты контроля точности ГНСС-аппаратуры в топоцентрической системе координат

Комплекты аппаратуры	Вероятнейшие значения (δ) и СКО (m) ошибки комплекта аппаратуры по координатным осям в мм					
	<i>E</i>		<i>N</i>		<i>U</i>	
	δ	<i>m</i>	δ	<i>m</i>	δ	<i>m</i>
x_1	3.5	4.0	0.6	3.3	-1.4	3.6
x_2	-3.0	4.2	1.4	3.5	0.4	3.9
x_3	2.0	4.0	-0.5	3.3	-2.6	3.6
x_4	-0.6	3.9	-2.7	3.2	1.0	3.4
x_5	-1.8	4.1	1.2	3.4	2.6	3.9

Представленные в таблице 3.1 значения демонстрируют детерминированную (столбцы 2, 4, 6) и стохастическую (столбцы 3, 5, 7) компоненты контрольных оценок. Видно, что детерминированные

компоненты имеют случайный характер, так как они не превышают значимых стохастических оценок - средние квадратические ошибки. Детерминированные оценки ни в одном случае не превышают их стохастическую компоненту.

«В ходе разработки методики для полевого контроля измерительной аппаратуры в 2021 году были проведены дополнительные экспериментальные исследования, направленные на оценку возможностей методики в различных физических условиях наблюдений. Была выбрана тестовая базовая линия, расположенная в зонах с хорошими условиями приема спутникового сигнала (см. рисунок 3.2). Длина линии составила приблизительно 1.3 км» [Соловьев, 2021]. Препятствия прохождению радиоволн от спутника к антенне приемника отсутствовали. Фотографии ГНСС-оборудования и пунктов геодинимической сети показаны на рисунке 3.3. Отметим, что предыдущий эксперимент не отличался столь хорошими условиями наблюдений.

На этот раз контролю были подвергнуты 6 ГНСС комплектов аппаратуры, применяемых в полевых кампаниях регулярных наблюдений. Измерения, как и в предыдущем году, выполнялись двухчасовыми сеансами, с дискретностью 30 секунд и маской возвышения 15° . Расстановка комплектов на контрольной базовой линии представлена в таблице 3.2.

Обработка по разработанному алгоритму позволила установить несоответствие номинальных параметров одной из ГНСС-антенн (MarAnt+), ее фактическим характеристикам. Было выявлено, что высота фазового центра антенны по отношению к ее нижней плоскости отличается от заявленной производителем примерно на 25 мм. Результаты контроля аппаратуры представлены в таблице 3.3.



Рисунок 3.2 – Схема измерений базовой линии в 2021 году



Рис. 3.3 – Вид геодезических центров во время эксперимента: а – ГНСС-пункт 1214, 1; б – ГНСС-пункт 1216

Таблица 3.2 – Расстановка комплектов ГНСС антенн и приемников для измерений

Серия измерений	Точка от – пункт 1214	Индексы обработки	Точка до – пункт 1216
1	Topcon SR Hiper, №1209-13775	1-2	Topcon SR Hiper, №1064-14855
2	Topcon SR Hiper, №1209-13775	1-3	Javad Delta 3N, №02757
3	Topcon SR Hiper, №1209-13775	1-4	Javad Maxor 0136, LegAnt 052
4	Topcon SR Hiper, №1209-13775	1-5	Javad Maxor 0127, MarAnt 2447
5	Topcon SR Hiper, №1209-13775	1-6	PrinCe i50, №3227946
6	Topcon SR Hiper, №1064-14855	2-3	Javad Delta 3N, №02757
7	Topcon SR Hiper, №1064-14855	2-4	Javad Maxor 0136, LegAnt 052
8	Javad Maxor 0127, MarAnt 2447	5-2	Topcon SR Hiper, №1064-14855
9	Topcon SR Hiper, №1064-14855	2-6	PrinCe i50, №3227946
10	Javad Delta 3N, №02757	3-4	Javad Maxor 0136, LegAnt 052
11	Javad Delta 3N, №02758	3-5	Javad Maxor 0127, MarAnt 2447
12	Javad Delta 3N, №02759	3-6	PrinCe i50, №3227946
13	Javad Maxor 0127, MarAnt 2447	5-4	Javad Maxor 0136, LegAnt 052
14	PrinCe i50, №3227946	6-4	Javad Maxor 0136, LegAnt 052
15	Javad Maxor 0127, MarAnt 2447	5-6	PrinCe i50, №3227946

Таблица 3.3 – Результаты контроля ГНСС аппаратуры в эксперименте 2021 г.

Комплекты аппаратуры	Вероятнейшие значения (δ) и СКО (m) ошибки комплекта аппаратуры по координатным осям в мм					
	E		N		U	
	δ	m	δ	m	δ	m
x_1	-0.8	1.6	-0.2	1.1	8.5	2.1
x_2	0.2	1.5	0.1	1.0	4.1	2.1
x_3	2.8	1.7	-1.1	1.1	2.9	2.2
x_4	0.9	1.4	-0.3	1.0	5.9	1.9
x_5	-0.7	1.7	-0.2	1.2	-24.5	2.2
x_6	-2.3	1.8	1.6	1.2	3.2	2.2

В данном случае метод продемонстрировал свою эффективность, показав некорректные паспортные характеристики одной из применяемых в измерениях антенн. Следует подчеркнуть, что без применения данного метода эта ошибка не могла быть выявлена в результатах полевых измерений на геодинамическом полигоне, так как точность определения высотной компоненты для базовых линий длиной от первых до десятков километров характеризуется величинами 1-2 см. Получив оценку ошибки вертикального

положения фазового центра антенны MarAnt+, были проанализировали характеристики других антенн данного производителя и установлено, что у антенны TPSG3_A1 NONE высота фазового центра очень близка к ее требуемому значению. Используя ее параметры для антенны MarAnt+, были получены оценки точности, соответствующие их реальным значениям (таблица 3.4).

Таблица 3.4 - Результаты контроля ГНСС аппаратуры с учетом некорректных паспортных характеристик антенны MarAnt+

Комплекты аппаратуры	Вероятнейшие значения (δ) и СКО (m) ошибки комплекта аппаратуры по координатным осям в мм					
	<i>E</i>		<i>N</i>		<i>U</i>	
	δ	m	δ	m	δ	m
x_1	-1.1	1.5	-0.1	1.3	1.7	1.8
x_2	0.6	1.4	-0.5	1.2	-1.1	1.8
x_3	3.0	1.6	-1.5	1.4	-2.1	2.1
x_4	-0.2	1.4	1.2	1.1	2.2	1.7
x_5	-0.4	1.7	0.3	1.4	0.4	2.1
x_6	-1.9	1.7	0.7	1.4	-1.1	1.9

Результат проведенного эксперимента показывает, что метод контроля точности характеристик используемой ГНСС-аппаратуры позволяет выявлять некорректные номинальные параметры измерительных средств. В данном случае параметры антенн ГНСС-приемников хорошо согласованы между собой. Точность контроля характеристик в плане находится на уровне 1- 1.5 мм, по высоте – 2 мм.

В полевой экспедиции 2022 года, был проведен третий эксперимент с участием более современных комплектов ГНСС-оборудования, но на той же базовой линии (см. рисунок 3.2).

Контролю были подвергнуты 6 комплектов аппаратуры, из которых 2 комплекта были добавлены впервые. Измерения парами комплектов выполнялись часовыми сеансами, с дискретностью регистрации сигнала – 30 секунд, маска возвышения была установлена на 15°. Расстановка комплектов на контрольной базовой линии представлена в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Расстановка комплектов ГНСС-аппаратуры для измерений

Серия измерений	Точка от – пункт 1214	Индексы обработки	Точка до – пункт 1216
1	Javad Delta 3N 04304 GrAnt-G3T 06733	2-1	Javad Delta 3N 04305 GrAnt-G3T 06458
2	Javad Delta 3N 02757 GA152GNSS	3-1	Javad Delta 3N 04305 GrAnt-G3T 06458
3	Javad Delta 3N 04305 GrAnt-G3T 06458	1-4	Topcon 14855
4	Javad Delta 3N 04305 GrAnt-G3T 06458	1-5	Topcon 13775
5	Javad Delta 3N 04305 GrAnt-G3T 06458	1-6	Prince i50 3395903
6	Javad Delta 3N 04304 GrAnt-G3T 06733	2-3	Javad Delta 3N 02757 GA152GNSS
7	Javad Delta 3N 04304 GrAnt-G3T 06733	2-4	Topcon 14855
8	Javad Delta 3N 04304 GrAnt-G3T 06733	2-5	Topcon 13775
9	Javad Delta 3N 04304 GrAnt-G3T 06733	2-6	Prince i50 3395903
10	Javad Delta 3N 02757 GA152GNSS	3-4	Topcon 14855
11	Javad Delta 3N 02757 GA152GNSS	3-5	Topcon 13775
12	Javad Delta 3N 02757 GA152GNSS	3-6	Prince i50 3395903
13	Topcon 14855	4-5	Topcon 13775
14	Topcon 14855	4-6	Prince i50 3395903
15	Prince i50 3395903	6-5	Topcon 13775

Обработка по разработанному алгоритму позволила установить несоответствие номинальных параметров двух ГНСС антенн (GrAnt-G3T), ее фактическим характеристикам. Было выявлено, что высота фазового центра антенны по отношению к ее нижней плоскости отличается от заявленной производителем для аналогичной антенны с отсекателем (GrAnt-G3T+G) на 10 мм. Результаты контроля аппаратуры представлены в таблице 3.6.

Рассмотрим официально заданные характеристики этих близких типов антенн. Параметры номинально использованной антенны показаны на ее корпусе на рисунок 3.4а. При этом близкая по конструкции ГНСС-антенна GrAnt-G3T+G имеет характеристики, существенно отличающиеся от использованной антенны. Схема ее конструкции показана на рисунке 3.4, б.

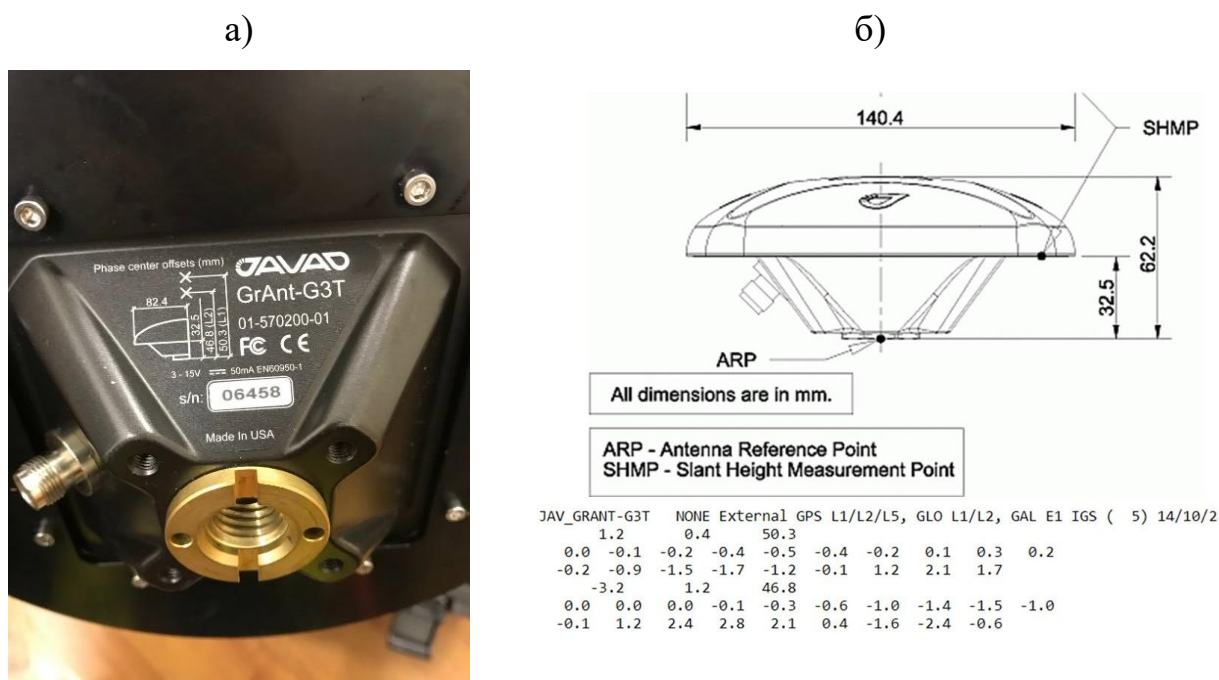
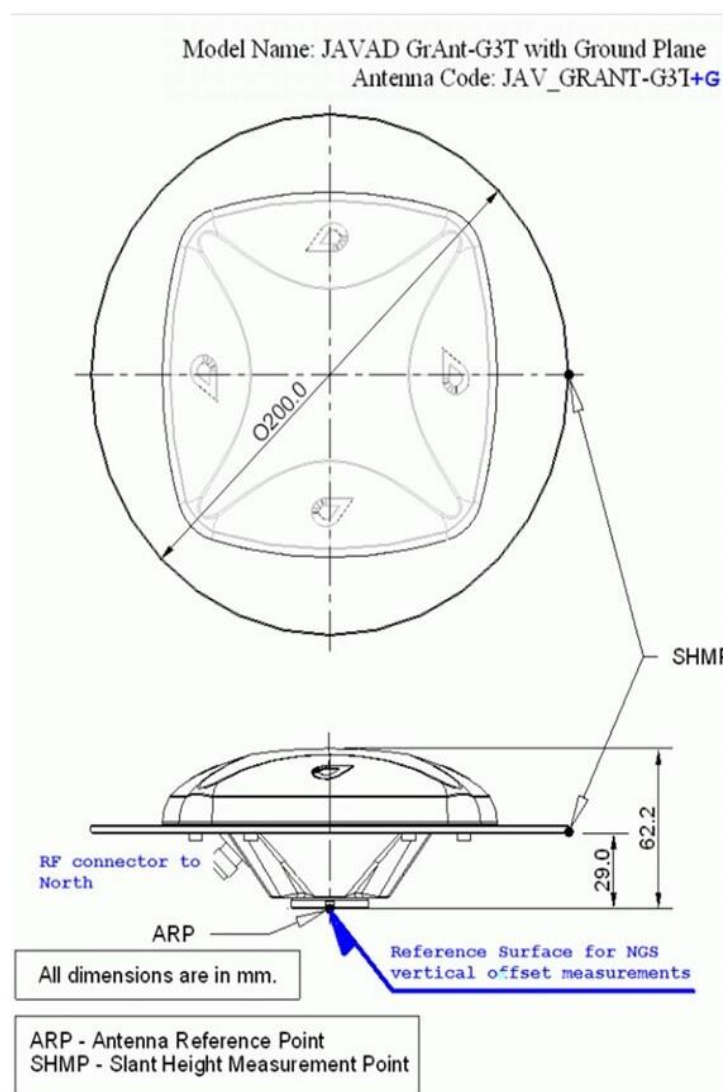


Рисунок 3.4 – Параметры использованной в измерениях антенны GrAnt-G3T компании JAVAD (а) и номинальные характеристики антенны (б)

Рассматривая рисунки 3.4, а и 3.4, б. и сопоставляя вертикальные положения фазовых центров, мы можем говорить, что это одна и та же антенна. На рисунках 3.4, б и 3.5 представлена информация с официального сайта Национальной геодезической службы США [https://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/LoadFile?file=JAV_GRANTG3T_NONE.003]. В то же время вызывает удивление несовпадение радиусов корпусов антенны, указанных на рисунках 3.4, а и 3.4, б. На корпусе антенны рис. 3.4, а указано значение 82.4 мм, а на схеме рисунке 3.4, б, это расстояние равно 70.2 мм. Это указывает на некоторую путаницу в официальных параметрах антенны. Или радиусы измерены до разных мест на краях корпуса антенны.

В то же время, идентичная антенна, к которой добавлен отсекаТЕЛЬ переотраженного сигнала (*ground plane*), представленная на рисунке 3.5, имеет высоту положения фазового центра по частоте $L1$ примерно на 1 см меньше, чем у той, что не имеет отсекаТеля. Для использованной антенны, согласно рисунке 3.4, а, это значение равно 50.3 мм, а для аналога с отсекаТЕлем – 39.9 мм. Разница составила 10.4 мм.



JAV_GRANT-G3T+G	NONE	External	GPS	L1/L2/L5,	GLO	L1/L2/L3,	GAL	NGS	(4)	12/12/26
3.3	0.6	39.9								
0.0	0.9	1.3	1.4	1.1	0.7	0.1	-0.4	-0.8	-1.0	
-1.2	-1.0	-0.9	-0.6	-0.3	0.3	0.9	0.0	0.0		
4.1	-5.4	44.7								
0.0	-0.5	-0.8	-1.0	-1.1	-1.3	-1.4	-1.6	-1.8	-2.0	
-2.3	-2.4	-2.4	-2.6	-2.8	-3.2	-3.6	0.0	0.0		

Рисунок 3.5 – Номинальные характеристики антенны JAV_GRANT_G3T+G

После того, как в высоту использованной антенны при обработке была введена эта разность в качестве поправки, оценка ошибок антенн по разработанной методике резко улучшилась (см. таблицу 3.3). Далее были проанализированы характеристики других антенн и получены оценки точности, соответствующие их реальным значениям см. таблицу 3.7.

Таблица 3.6 – Результаты контроля ГНСС аппаратуры

Комплекты аппаратуры	Вероятнейшие значения (δ) и СКО (m) ошибки комплекта аппаратуры по координатным осям в мм					
	E		N		U	
	δ	m	δ	m	δ	m
x_1	0.1	2.2	-1.9	1.3	-7.8	2.1
x_2	1.7	2.6	1.9	1.5	-4.1	2.6
x_3	-1.4	2.5	-0.4	1.4	10.2	2.3
x_4	-0.3	2.5	0.1	1.4	-0.8	2.5
x_5	-0.3	2.5	0.3	1.4	1.3	2.3
x_6	0.1	2.4	0.0	1.3	1.4	2.5

Таблица 3.7 – Результаты контроля ГНСС аппаратуры с учетом возможной ошибки в паспортных характеристиках антенны Grant_G3T

Комплекты аппаратуры	Вероятнейшие значения (δ) и СКО (m) ошибки комплекта аппаратуры по координатным осям в мм					
	E		N		U	
	δ	m	δ	m	δ	m
x_1	0.1	2.2	-1.9	1.3	-1.6	2.1
x_2	1.7	2.6	1.9	1.5	-2.0	2.6
x_3	-1.4	2.5	-0.4	1.4	5.4	2.3
x_4	-0.3	2.5	0.1	1.4	-2.8	2.4
x_5	-0.3	2.4	0.3	1.4	1.1	2.3
x_6	0.1	2.4	0.0	1.3	-0.1	2.4

В данном случае параметры антенн ГНСС-приемников хорошо согласованы между собой. Точность контроля характеристик в плане находится на уровне 1.3 – 2.5 мм, по высоте на уровне 2.5 мм.

Таким образом, результаты экспериментов показывают, что предлагаемый метод полевого контроля характеристик точности используемой ГНСС-аппаратуры позволяет выявлять некорректные номинальные параметры измерительных средств. Применение методики позволяет обеспечить регистрацию субсантиметровых движений земной поверхности в условиях тектонически умеренно-активных районах, и как следствие, адекватную оценку геодинамической обстановки района.

Были также сделаны исследования по определению оптимального временного интервала необходимого для достижения требуемой точности, так как в литературе у различных авторов он меняется от 1 до 24 часов. На рисунке

3.6 показана зависимость СКО от времени синхронной записи ГНСС-приемников для условий ГДП Нижне-Канского массива. Согласно этим графикам оптимальное время записи сигнала на каждом ГНСС-пункте должно быть 4-6 часов.

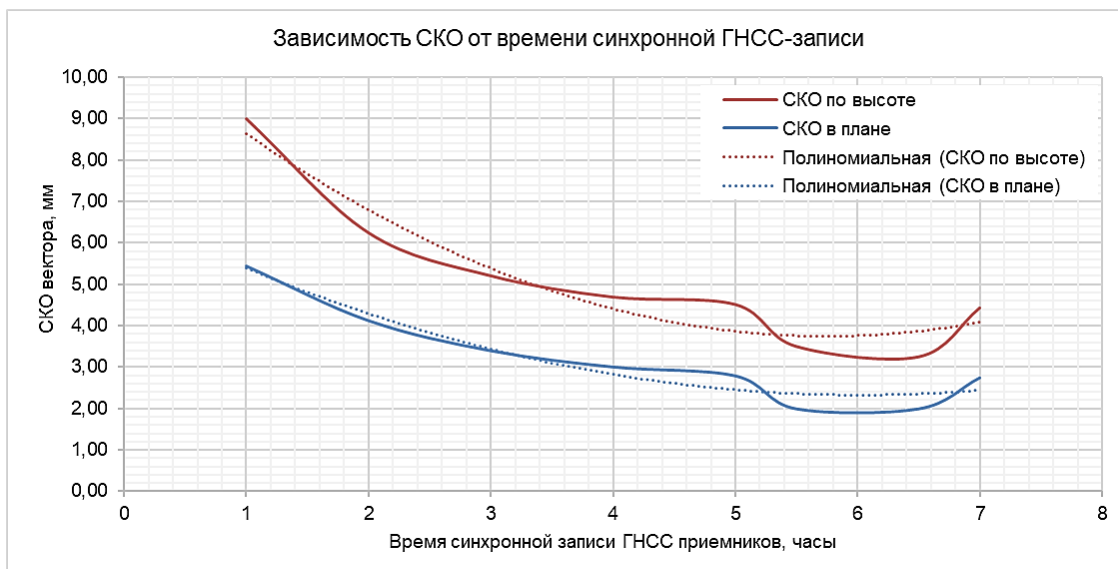


Рисунок 3.6 – Зависимость СКО от времени синхронной записи ГНСС-приемников

3.2 Исследование пространственных закономерностей СДЗК для различных дистанций (масштабный эффект) и типов напряженного состояния земной коры

При геодинамической интерпретации результаты ГНСС-наблюдений, исследователи придерживаются двух гипотез: одни используют блоковую модель строения земной коры (дискретная среда) [McCaffrey, 2005; Flesch et al., 2001], другие - континуальную модель (непрерывная среда) [Кафтан и Мельников, 2018]. Однако, независимо от модели выявить локальные, быстропротекающие и циклические процессы и обеспечить соответствие между результатами ГНСС-измерений и динамическими свойствами структурного тектонического блока на основе редких пространственно-временных сетей практически невозможно [Кузьмин, 2014]. Под термином «редкие» в данном утверждении понимается не только структура сети ГДП, но и периодичность наблюдений. Эта неопределенность, называемая

«пространственно-временной масштабный эффект», приводит к противоречивым выводам при переносе результатов глобальных ГНСС-наблюдений на локальный уровень. Подчеркнем, что в нормативах [РБ-19-2018]: «используются значения деформаций без учета их пространственной масштабируемости» (таблица 3.8). Это означает, что нормативная деформация может быть недостаточно высокой или слишком завышенной.

На рисунке 3.7. в качестве иллюстрации приведены результаты высокоточного нивелирования I класса в зависимости от пространственной характеристики наблюдательной сети [Кузьмин, 2014].

На необходимость учета масштабного эффекта для вертикальных движений в своих работах отмечал М.В. Гзовский [Гзовский, 1975] (рисунок 3.8) - «средняя величина градиента скорости движений сильно зависит от продолжительности времени осреднения, чем короче рассматриваемый промежуток времени, тем большие средние скорости для него могут быть отмечены».

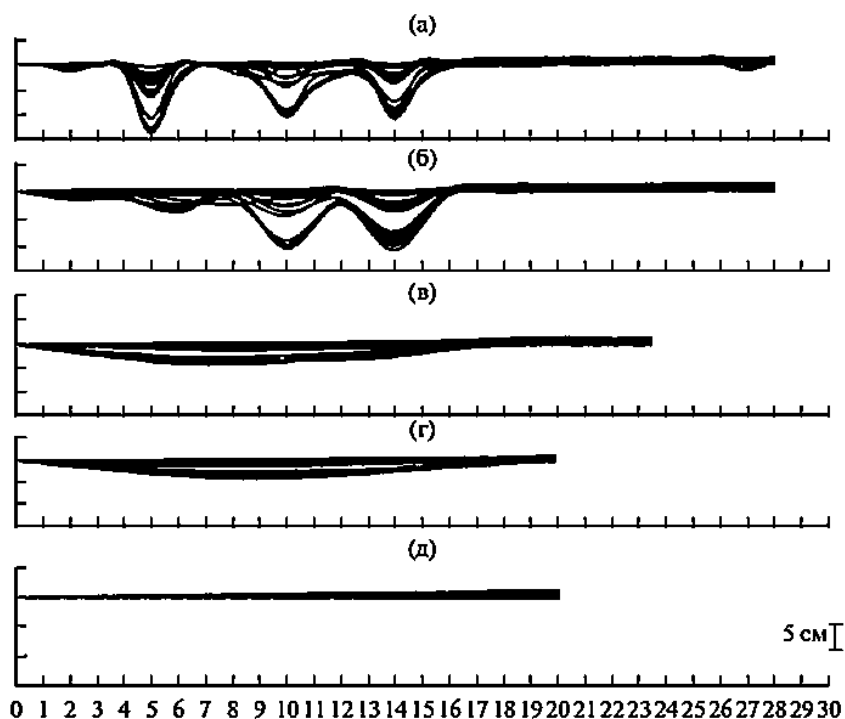


Рисунок 3.7 – Зависимость вертикальных смещений от частоты и густоты ГНСС-пунктов, частота опроса 1 раз/мес, расстояние между пунктами -50, 100, 300, 1000 м [Кузьмин, 2014]

Таблица 3.8 – Деформации земной поверхности, изменение напряжённого состояния грунтов основания [НП-064—17]

№	Значения параметров, согласно которым осуществляется классификация степеней опасности ¹	Степень опасности по последствиям воздействия на ОИАЭ
1	Геодинамические зоны с градиентом скорости современных дифференцированных движений земной поверхности 10^{-5} 1/год и выше	I
2	Геодинамические зоны с градиентом скорости современных дифференцированных движений земной поверхности от 10^{-8} до 10^{-5} 1/год и выше	II
3	Геодинамические зоны с градиентом скорости современных дифференцированных движений земной поверхности менее 10^{-8} 1/год	III

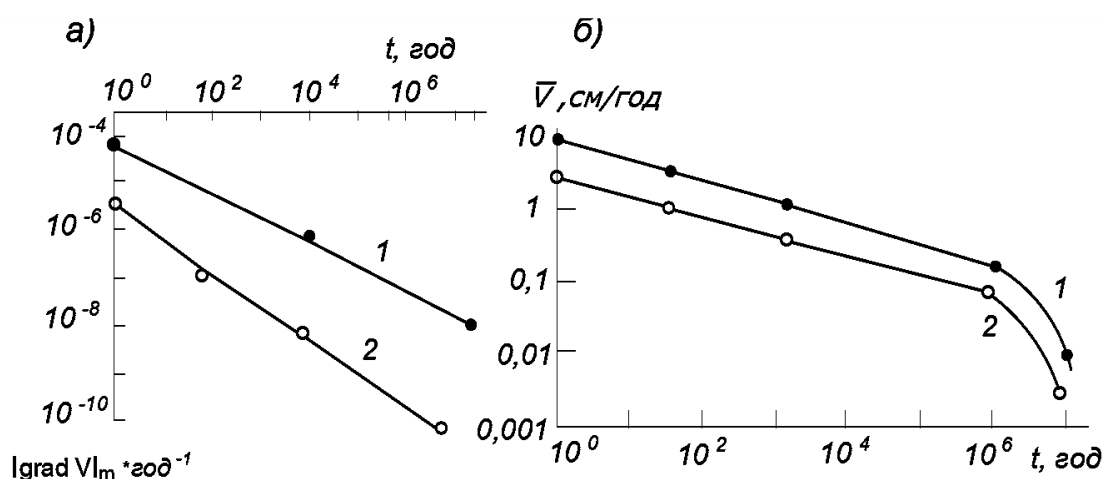


Рисунок 3.8 – Зависимость средней величины градиента скорости $|grad V|_m$ вертикальных тектонических движений (а) и средней скорости $\bar{V}$ вертикальных тектонических движений (б) от времени осреднения t [Гзовский, 1975].

М.В. Гзовский подчеркивал, что «графики требуют проверки и уточнения, но в принципе они являются эскизами, по которым можно будет, располагая средними значениями скорости и градиента скорости для одного

¹ Значения параметров соответствуют вероятности 10^{-4} и выше для факторов природного происхождения и вероятности 10^{-6} и выше для факторов техногенного происхождения

времени осреднения, переходить к наиболее вероятным скорости и градиенту скорости для другого времени осреднения» [Гзовский, 1975].

Помимо временного масштабного эффекта отдельно выделяется пространственный масштабный эффект: «Выяснилась необходимость раздельно оценивать движения крупных структурных элементов коры и движения более мелких, локальных элементов, имеющих ширину менее 100 км» [Гзовский, 1975].

«Градиент скорости современных локальных движений и в малоподвижных, и в высокоподвижных областях на 1—2 порядка выше, чем градиент скорости движений региональных. При сравнении *малоподвижных* и *высокоподвижных* областей оказывается, что *градиенты скорости современных региональных движений сопоставимы* между собой, а *градиенты скорости локальных движений в высокоподвижных областях на 1—2 и более порядков выше*. Эта закономерность распространяется и на распределение градиентов скорости молодых движений» [Гзовский, 1975].

С появлением средств ГНСС была опубликована известная статья Гусева Т.В. с соавт. [Гусева и др., 1996], посвященная анализу связи деформаций и масштабов измеряемых дистанций, где экспериментально доказан эффект уменьшения максимальных значений скоростей горизонтальных деформаций при увеличении базисов от метров до тысяч километров, связанный с блоковым строением литосферы.

Отсюда следуют два важных следствия:

а) Трендовая составляющая деформаций является результатом глобальных или длительных геодинамических процессов, а локальная (вариационная) - результат локальных или кратковременных, часто циклических процессов.

б) При создании локальных геодинамических полигонов для контроля горизонтальных деформаций проведении необходимо учитывать максимально возможные скорости для проектируемых дистанций, а также вклад циклической вариационной составляющей. Она, во-первых, может

существенно превышать трендовую, и, во-вторых, фактически и является тем прогнозным параметром, определяющим устойчивость и сейсмическую безопасность производственных объектов, находящихся в зоне локального воздействия [Татаринов, 2012].

Подчеркнем, что последующие годы при огромном объеме накопленных данных, практически не было публикаций по развитию этих исследований. В тоже время они очень актуальны и полезны при прогнозе сильных землетрясений [Морозов и др. 2018] и оценке сейсмической безопасности особо ответственных промышленных объектов по данным ГНСС наблюдений [Кафтан и др., 2022].

В этой связи были выполнено исследование, направленное на изучение пространственных закономерностей современных движений литосферы для:

- а) различных масштабных уровней геодинамических полигонов;
- б) различных по типу напряженного состояния участков.

Согласно известной карте (рисунок 3.9), земная кора делится на 6 основных типов напряженного-деформированного состояния [Шерман, 2001]. Из карты видно, что имеются 2 главных типа состояния земной коры (растяжение-сжатие, сдвиг) и 2 промежуточных (растяжение со сдвигом и сжатие со сдвигом), а также нейтрального напряженного состояния².

² Из теории прочности – критерии прочности определяются соотношением главных напряжений. Следовательно, можно предположит, что и деформации породного массива - как следствие разрушения также связаны с типами напряженного состояния земной коры.

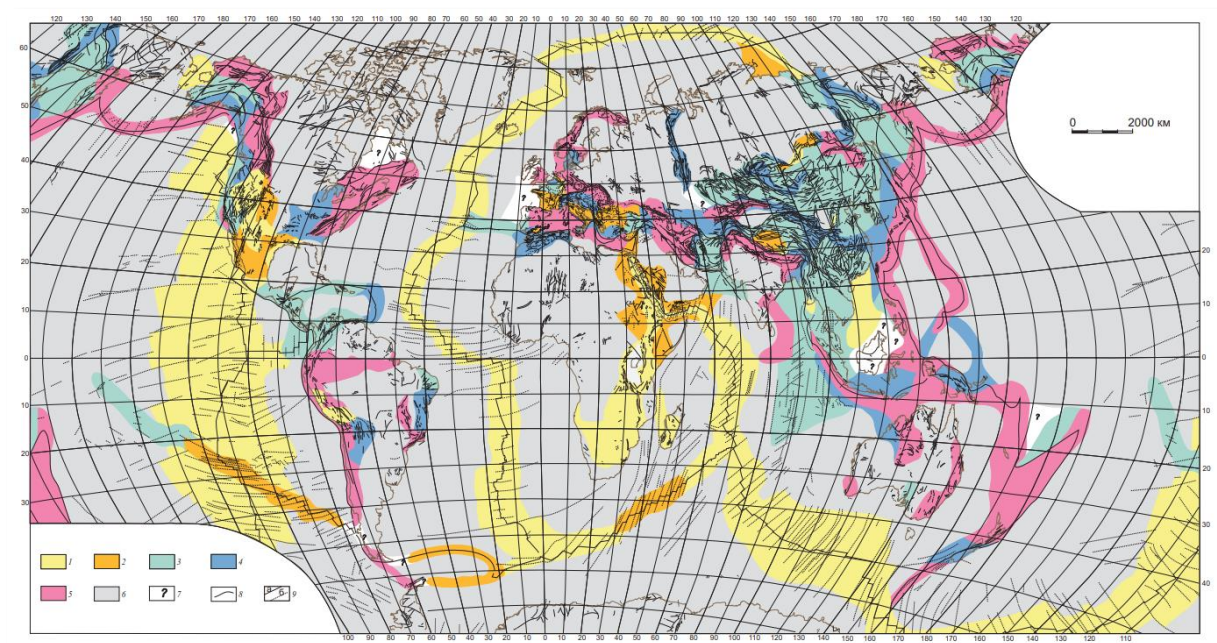


Рисунок 3.9 – Карта напряженного состояния упругой части литосферы.

Типы напряженного состояния и соотношения вертикального σ_z , максимального σ_x и минимального σ_y горизонтальных напряжений сжатия: 1 – области растяжения $\sigma_z > \sigma_y > \sigma_x$; 2 – области растяжения со сдвигом $\sigma_z = \sigma_y > \sigma_x$; 3 – области сдвига $\sigma_x > \sigma_z > \sigma_y$; 4 – области сжатия со сдвигом $\sigma_x > \sigma_y = \sigma_z$; 5 – области сжатия $\sigma_x > \sigma_y > \sigma_z$; 6 – области нейтрального напряженного состояния $\sigma_z > \sigma_x = \sigma_y$; 7 – области с неустановленным типом. Главные структурные границы: 8 – границы плит; 9 – разломы континентов (а) и океанов (б)

[Шерман и Лунина, 2001]

Таким образом, «для задач мониторинга СДЗК в зонах с размещением радиационно опасных объектов необходимо включать в арсенал не только инструментальные измерения, но и анализ деформаций» [Маневич, 2020]. В этом контексте приводятся результаты исследований, проведенных в рамках разработки единых инженерных критериев для интерпретации скоростей деформаций земной коры на различных масштабных уровнях. Поэтому был разработан и составлен каталог деформаций на ГДП (см. рисунок 3.10 и таблицу 3.9).

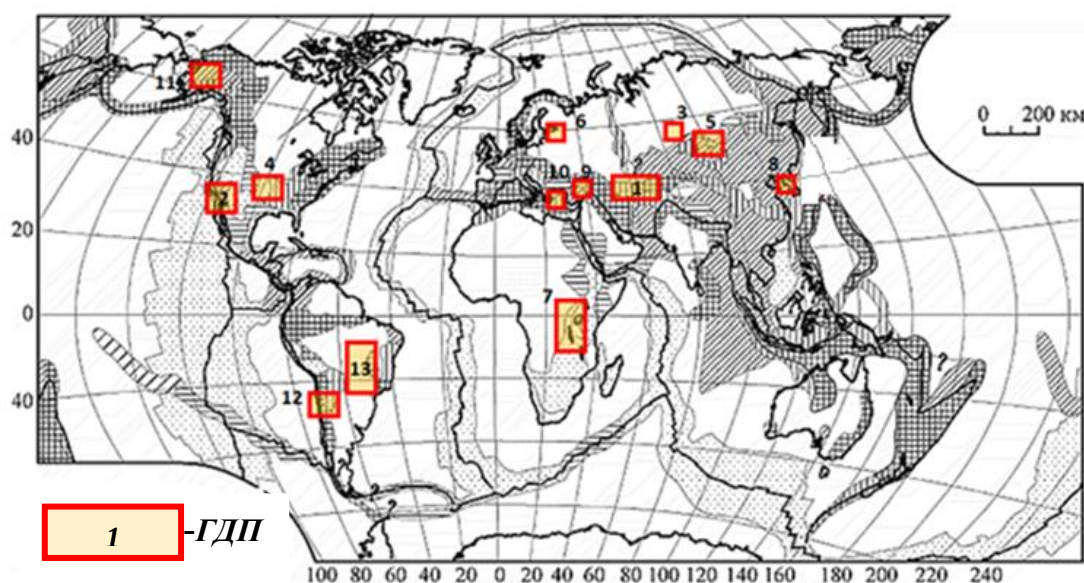


Рисунок 3.10 – Дислокация ГДП

Таблица 3.9 – ГДП по степени активности

ГДП	Тектоническая активность ³
Центральная Азия (Кыргызстан, Монголия, Казахстан, Узбекистан, Таджикистан)	2
Северная Америка, разломная зона Сан-Андреас	1
Россия, Енисейский кряж	3
Северная Америка, горная система Юкка-Маунтин	3
Россия, Байкальская рифтовая зона	2
Россия, Фенноскандия и Балтийский щит	3
Африка, Восточно-Африканская рифтовая система	2
Корейский полуостров	2
Россия, Центральный Кавказ	2
Турция, Восточно-Анатолийское плато и зона Анатолийских разломов	2
Северная Америка, штат Аляска	1
Южная Америка, Чилийская зона	1
Южная Америка, Платформа Серра-Буэнос-Айрес	1

При создании каталога старались учитывать два условия [Маневич, 2020]:

-
- 1 – активные (зоны границ литосферных плит);
 - 2 – умеренно-активные (активные внутриплитные процессы);
 - 3 – слабоактивные (платформенные геоструктуры)

- сбор данных по ГДП, имеющих различные масштабные уровни;
- расположение ГДП в различных по степени тектонической активности районах Земного шара, от внутриплатформенных территорий до сейсмически опасных зон на берегу Тихого океана.

В таблице 3.10 приведены некоторые наиболее известные электронные базы данных ГНСС-наблюдений, которые были использованы при формировании каталога.

Таблица 3.10 – Базы данных ГНСС-наблюдений за СДЗК

№	База данных	Источник
1	United States Geological Survey, GPS data	URL: https://earthquake.usgs.gov/monitoring/gps/
2	The MAGNET GPS Network	URL: http://geodaf.mt.asi.it/gps_data_solutions.html
3	Rete Integrata Nazionale GPS	URL: http://gsac.gm.ingv.it:8080/ prototypegsac/
4	GeoDAF: Geodetic Data Archiving Facility	URL: http://geodaf.mt.asi.it/gps_data_solutions.html]
5	Friuli Regional Deformation Network Data Center	Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale. Dataset. 2016. DOI: 10.6092/frednet
6	EUREF Permanent GNSS Network	URL: http://www.epncb.oma.be
7	GNSS Time Series	URL: https://sideshow.jpl.nasa.gov/post/series.html]
8	GNSS database UNAVCO	URL: https://www.unavco.org/
9	SOPAC	URL: http://sopac-csrc.ucsd.edu/index.php/sopac/

Числовые ряды скоростей деформаций делятся на две группы: первая – это деформации, соответствующие фоновому (спокойному) геодинамическому режиму литосферы; вторая – это деформации, которые являются аномальными. Сложность разделения выборки на две такие группы заключается в отсутствии эталонов разделения.

Зависимость расстояния от деформации земной поверхности может быть описана различными математическими моделями, в соответствии с

целями исследования. Одной из наиболее распространенных моделей является линейная зависимость между расстоянием и деформацией.

Однако, линейная деформация является менее информативной, чем площадная (горизонтальная дилатация), из-за того, что она не учитывает распределение деформации внутри площади. Представляя деформацию только в виде линейной скорости, упускается возможность увидеть неоднородность деформационного поля и выделить отдельные зоны с более высокими скоростями деформации. С другой стороны, площадная деформация учитывает деформацию всей площади, а не только ее границы, что позволяет получить более полную картину. Она также позволяет выделить зоны с более высокой деформацией и более точно оценить скорости деформации в разных частях площади [Шевчук Р.В., 2024].

Поэтому в качестве исследуемого параметра пространственных особенностей, была выбрана зависимость величины деформации растяжения/сжатия (горизонтальная дилатация, см. формулу 2.17) от площади треугольников (конечных элементов).

Очевидно, что с увеличением площади при равномерных распределениях абсолютных значений СДЗК, деформация будет уменьшаться. Эта зависимость будет повторяться для любых полигонов, изменяя свое абсолютное положение на координатных осях или угол наклона.

В результате исследования была разработана процедура расчетов, получены распределения (рисунки 3.11-3.13) и регрессионные зависимости (таблица 3.11) скоростей деформаций. Обобщенные зависимости позволяют оценить деформационный режим на геодинамическом полигоне, уточнить степень тектонической активности и прогнозировать возможные аномалии деформаций.

Полученные уравнения могут быть полезны для априорной оценки типичных значений скоростей деформаций в определенном районе на основе геологических условий этого района. Это может помочь определить, являются ли измеренные деформации в этом районе аномальными или типичными, и

выявить возможные причины таких аномалий, такие как усиленная тектоническая активность или другие геодинамические процессы. Важно отметить, что анализ измеренных деформаций должен проводиться с учетом всех доступных данных о геологических и геодинамических условиях, таких как геологическая структура, типичные геометрические формы литосферных блоков, тектонические структуры и прочее.

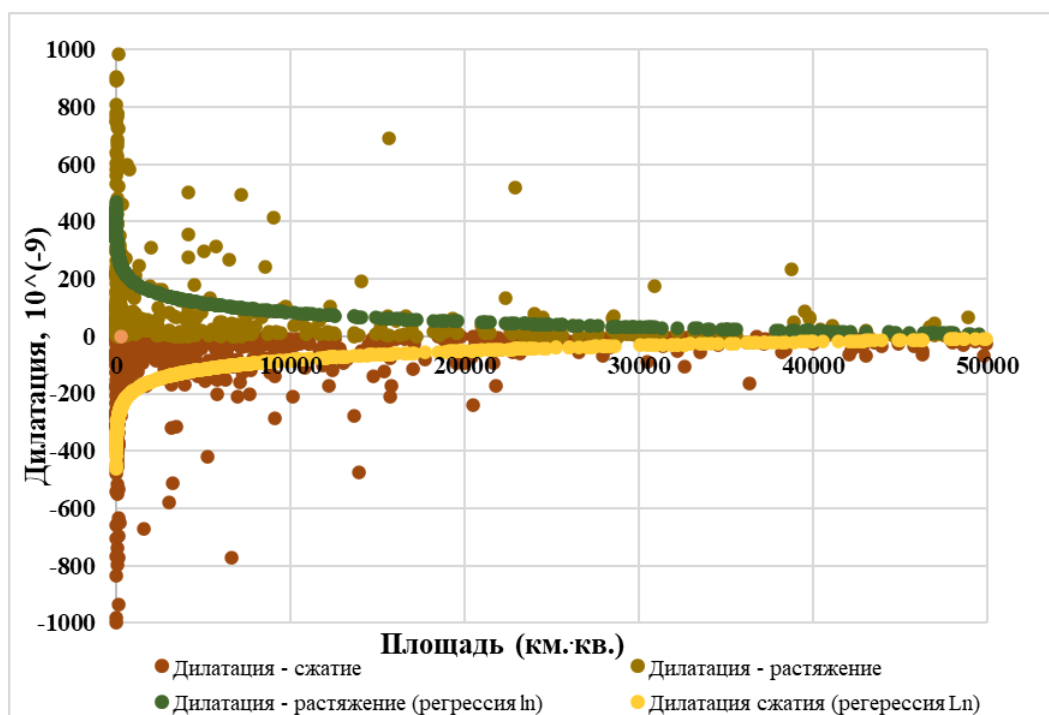


Рисунок 3.11 – Активные районы

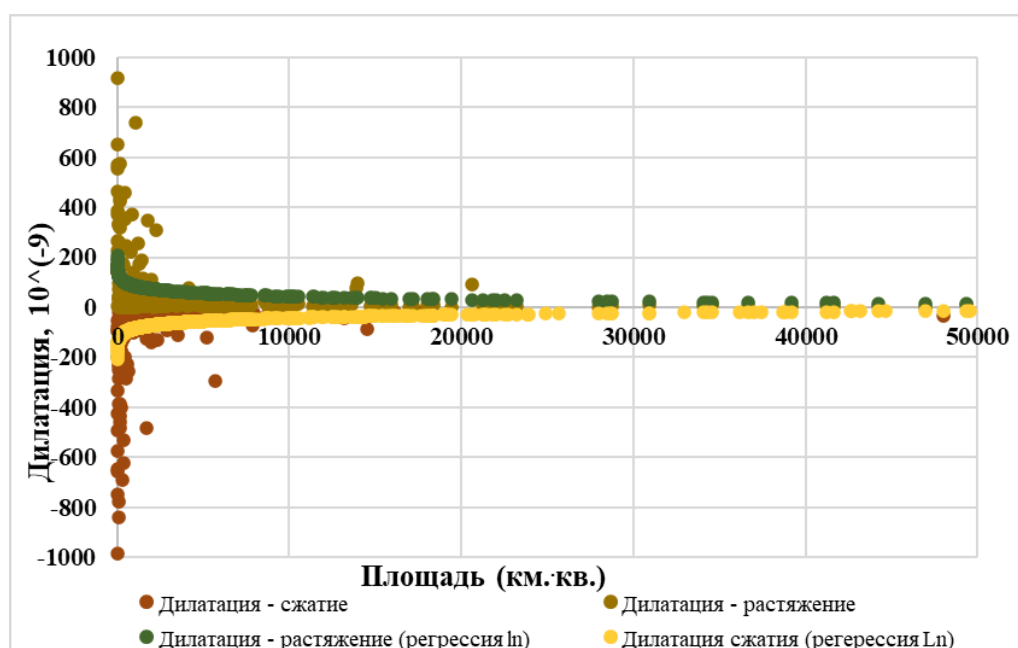


Рисунок 3.12 – Умеренно-активные районы

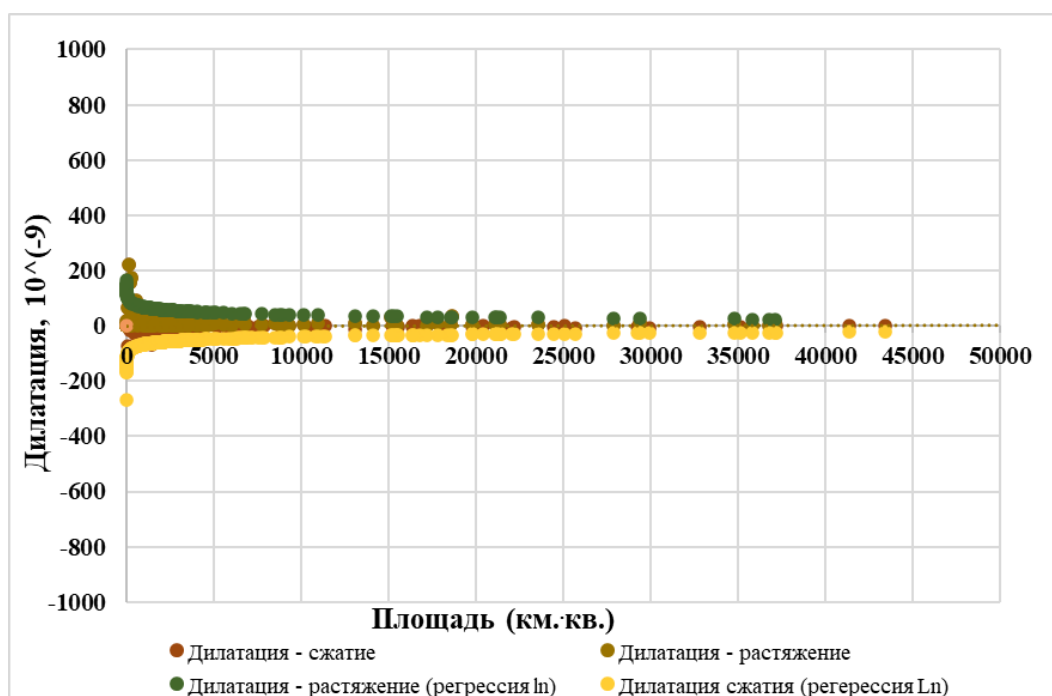


Рисунок 3.13 – Слабоактивные районы

Таблица 3.11 – Сводная регрессионная зависимость 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	$12.15 * LN(\Delta) - 150$

«Территория ГДП (Красноярский край) по своей геологической позиции относится к умеренно-активным районам» [Маневич, 2020; Шевчук Р.В., 2024]. Для оценки аномальности измеренных деформаций на полигоне выполнено сопоставление измеренных значений дилатации деформации с регрессионными зависимостями, представленными в таблице 3.11. Данные представлены в виде графика рассеяния значений (рисунок 3.14) и карт, где

представлены соотношения измеренных значений дилатации к регрессионным зависимостям (рисунок 3.15).

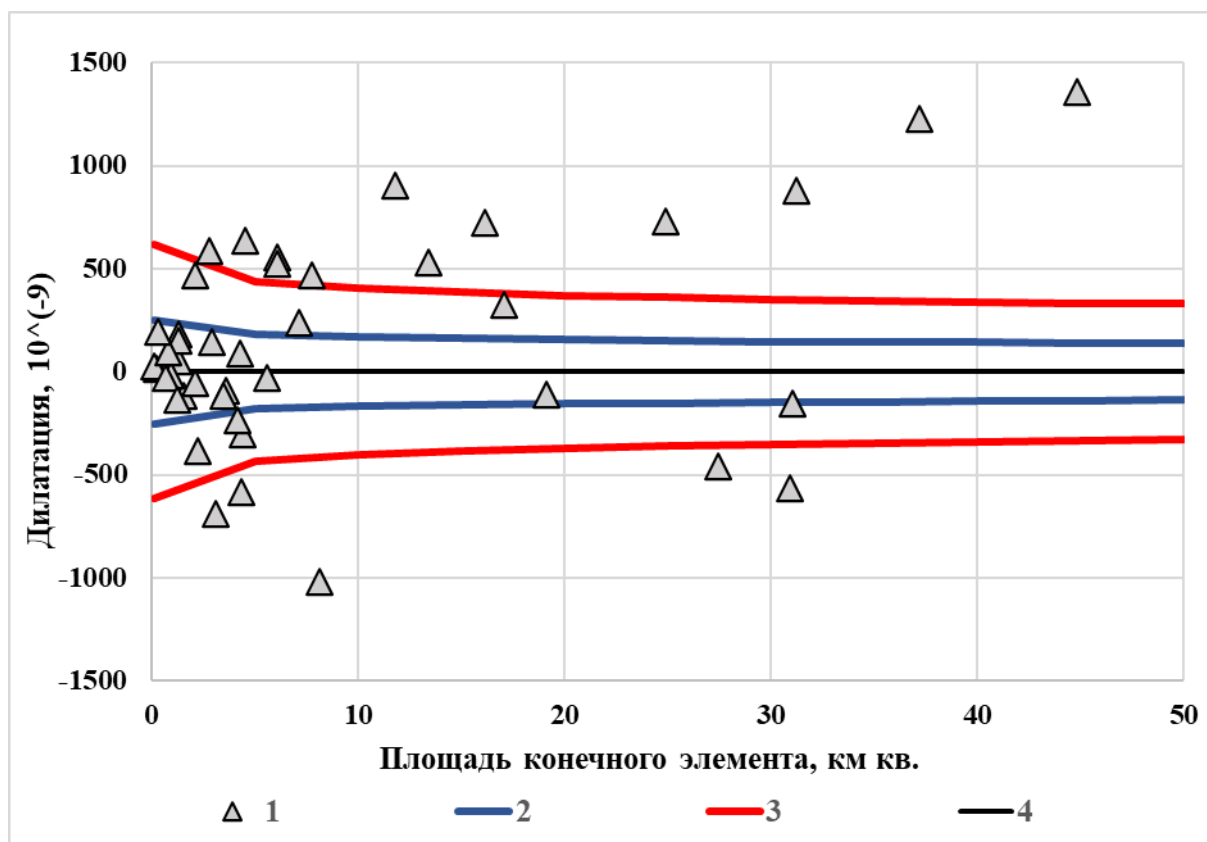


Рисунок 3.14. Оценка аномальности скоростей деформаций в пределах Нижне-Канского геодинамического полигона. треугольники (1) – вычисленные значения скорости дилатации по данным [Гвишиани и др., 2022]: синие линии (2) – положение кривой аномальных деформаций для умеренно-активных районов красные линии (3) – положение кривой аномальных деформаций для геодинамически активных участков земной коры; черная линия (4) – граница

Как видно из приведенных данных, априорное наличие умеренной тектонической активности района не тождественно слабой активности в пределах геодинамического полигона. Около половины конечных элементов полигона соответствуют среднемировым значениям деформации дилатации в умеренно-активных районах, а 7 значений выше регрессионной зависимости в более чем 5 раз. Необходимо проводить более подробное исследование

геологических и геодинамических условий конкретного района, а также повышать точность измерений на геодинамическом полигоне.

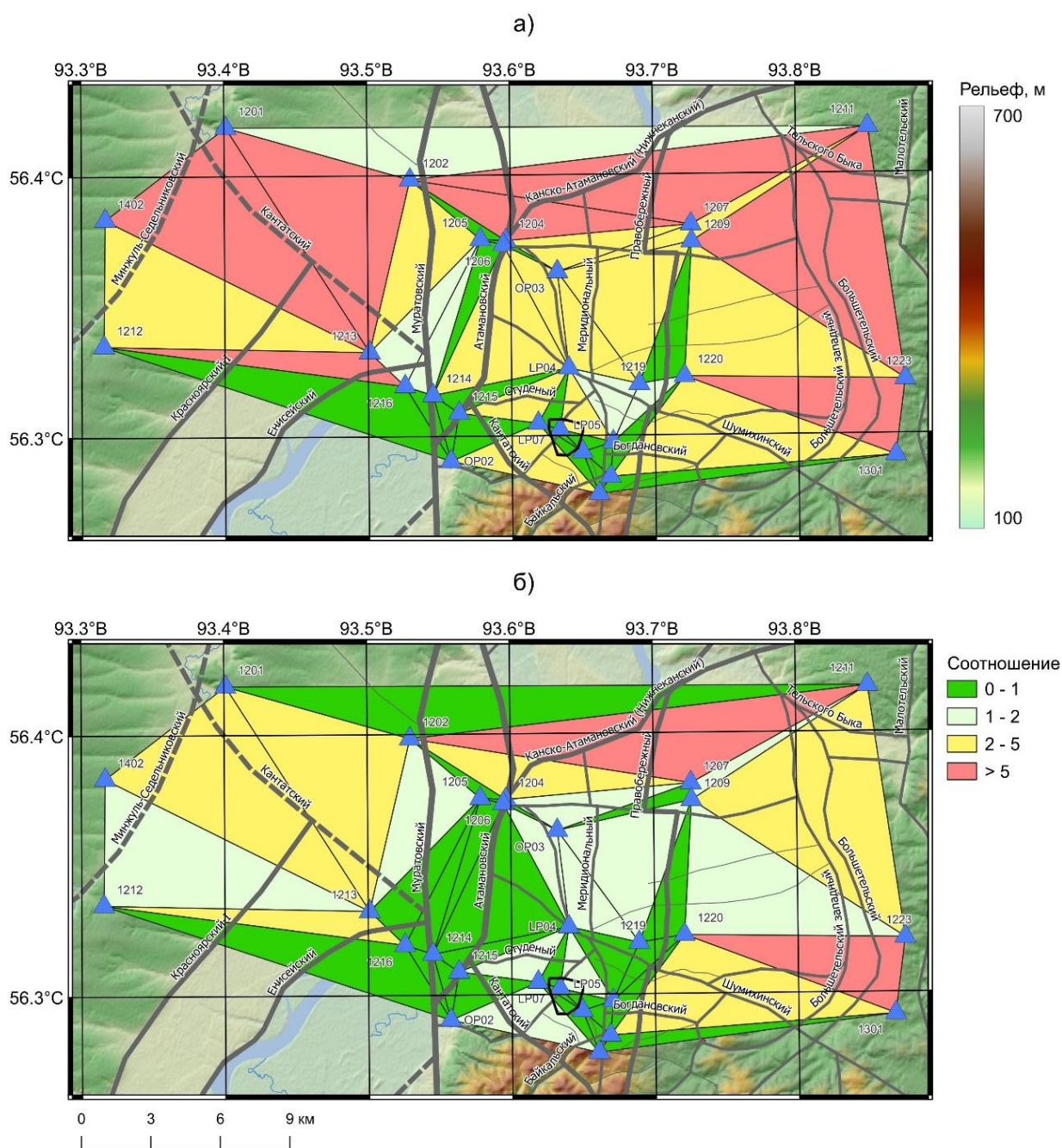


Рис. 3.15. Оценка аномальности скоростей деформаций в пределах Нижне-Канского геодинамического полигона. а – аномальность деформаций по критерию для умеренно-активных районов; б – аномальность деформаций по критерию для активных районов. Соотношение в легенде рисунка - отношение измеренных значений дилатации к значениям сводной регрессионной зависимости деформации от площади треугольников, представленной в таблице 3.11

3.3 Коррекция структуры сети ГНСС-наблюдений с использованием скальных геодезических центров

Известно, что «при построении геодезических сетей оптимальная форма треугольника сети должна быть близка к равносторонней. Для сетей ГНСС, когда речь идет об определении координат пункта, это требование уже не критично. В этой ситуации появляется возможность при обработке использовать максимальное число измеренных связей (векторов базовых линий) между пунктами ГНСС сети» [Мельников, 2018]. В этой связи были выполнены исследования по оптимизации структуры геодинамического полигона, так как изначально она была явно неоптимальной (см. рис. 2.6). Однако рекогносцировка показала, что к тем местам, где необходима установка ГНСС-пунктов доставка бурового оборудования невозможна. Поэтому было принято решения об установке скальных реперов на обнажениях кристаллических пород.

3.3.1 Опыт применения скальных геодезических центров на геодинамических полигонах

Из перечня конструкций геодезических центров и соответствующих им инженерно-геодезических работ для закладки [Normandeau et al., 2010; GNSS Station Monumentation..., 2022] следует, что центры, предназначенные для установки в выходы скальных горных пород, обладают наиболее простой и дешевой конструкцией. В этой связи, использование скальных геодезических центров при развитии сетей наблюдений на ГДП является распространенной мировой практикой. Скальные центры активно используются при развитии спутниковых геодезических сетей в США, Непале, Италии, Исландии, Австралии, Центральной Азии, Российской Федерации и других странах, и регионах мира [Manning and Johnstone, 2002; Зубович и др., 2004; Милюков и др., 2014; Galetzka et al., 2015; Garthwaite et al., 2015]. В частности, они

применяются и в районах строительства подземных исследовательских лабораторий: «Юкка-Маунтин» (США), «Аспо» и «Форсмарк» (Швеция), «Олкилуото» (Финляндия) [Tatrinov et al. 2019]. В том числе, подобная конструкция геодезических центров уже применялась в исследованиях современных движений Нижне-Канского массива в 2005-2006 годы, при изучении участков юго-восточнее от действующего ГДП [Морозов и др., 2006].

На геодинамических полигонах Аспо и Форсмарк скальные центры представляют собой металлические стержни с анкерным креплением в нижней части стержня ($\varnothing 16$ мм, длина 200–300 мм). Высота стержня над поверхностью земли составляет 3–7 см (рисунок 3.16 а, б, в, г) [Sjöberg et al., 2002; Gustafson and Ljungberg, 2010.]. Установка данной конструкции предполагает бурение технологической скважины, заполнение её цементной смесью и расклиниванием анкерной части скального центра. На ГДП Нижне-Канского массива в 2005-2006 годах скальные центры представляли собой латунные шестигранные стержни длиной 120 мм и диаметром 20 мм со специальными насечками, но без анкерного крепления [Морозов и др., 2006] (рисунок 3.16 д, е).

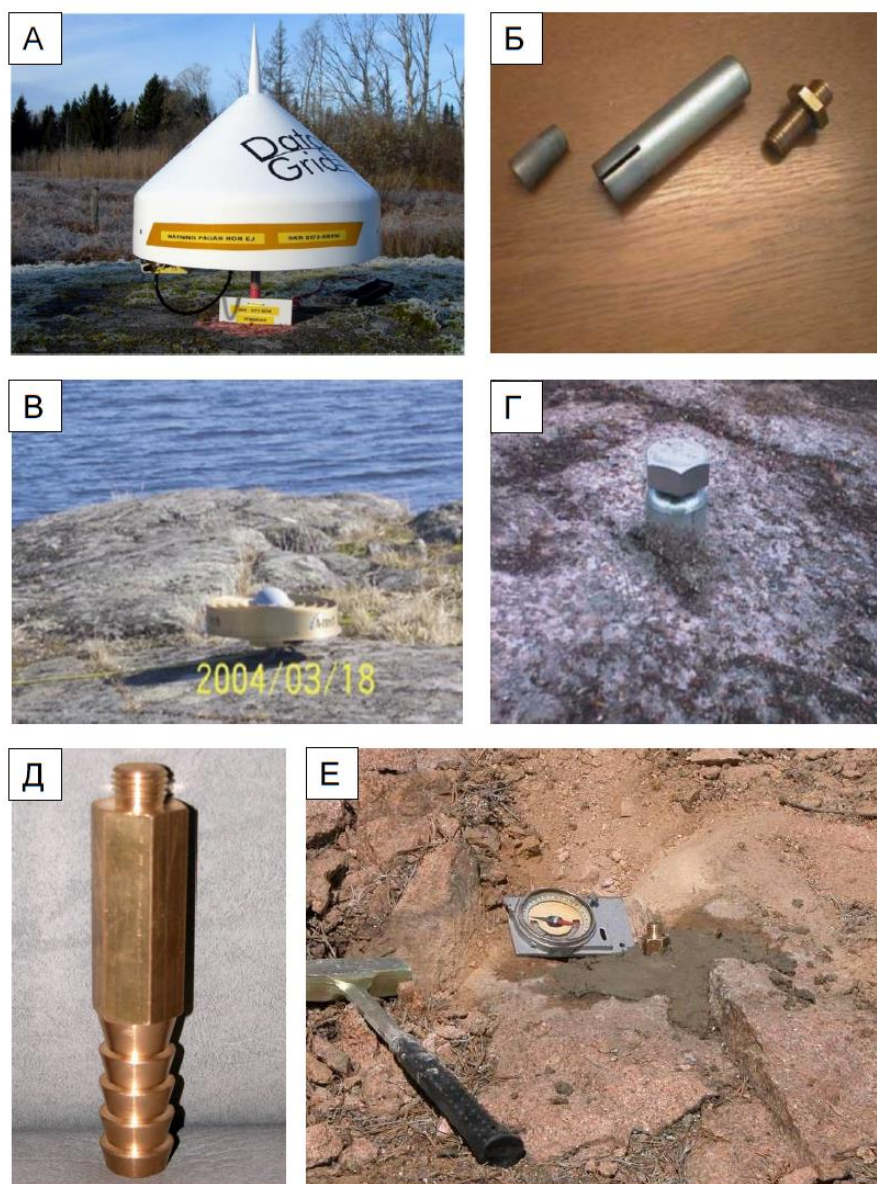


Рисунок 3.16 – Скальные геодезические центры стержневого и анкерного типа: А – пункт геодинимического полигона ПИЛ «Форсмарк» [Gustafson and Ljungberg, 2010.], Б – конструкция центра анкерного типа; В – пункт геодинимического полигона ПИЛ «Аспо» [Sjöberg et al., 2002], Г – установленный центр анкерного типа, Д – конструкция центра стержневого типа без анкерного крепления, Е – установленный центр на геодинимическом полигоне Нижне-Канского массива во время исследований 2005-2006 гг. [Морозов и др., 2006]

Распространена также еще более компактная конструкция в виде стального или латунного штифта/болта с маркой в верхней части и резьбовым креплением в нижней части для лучшего сцепления с горными породами и адгезией с цементным раствором. [GNSS Station Monumentation..., 2022]

(рисунок 3.17). Данная конструкция устанавливается в пробуренную скважину, с заполнением ее цементной смесью.

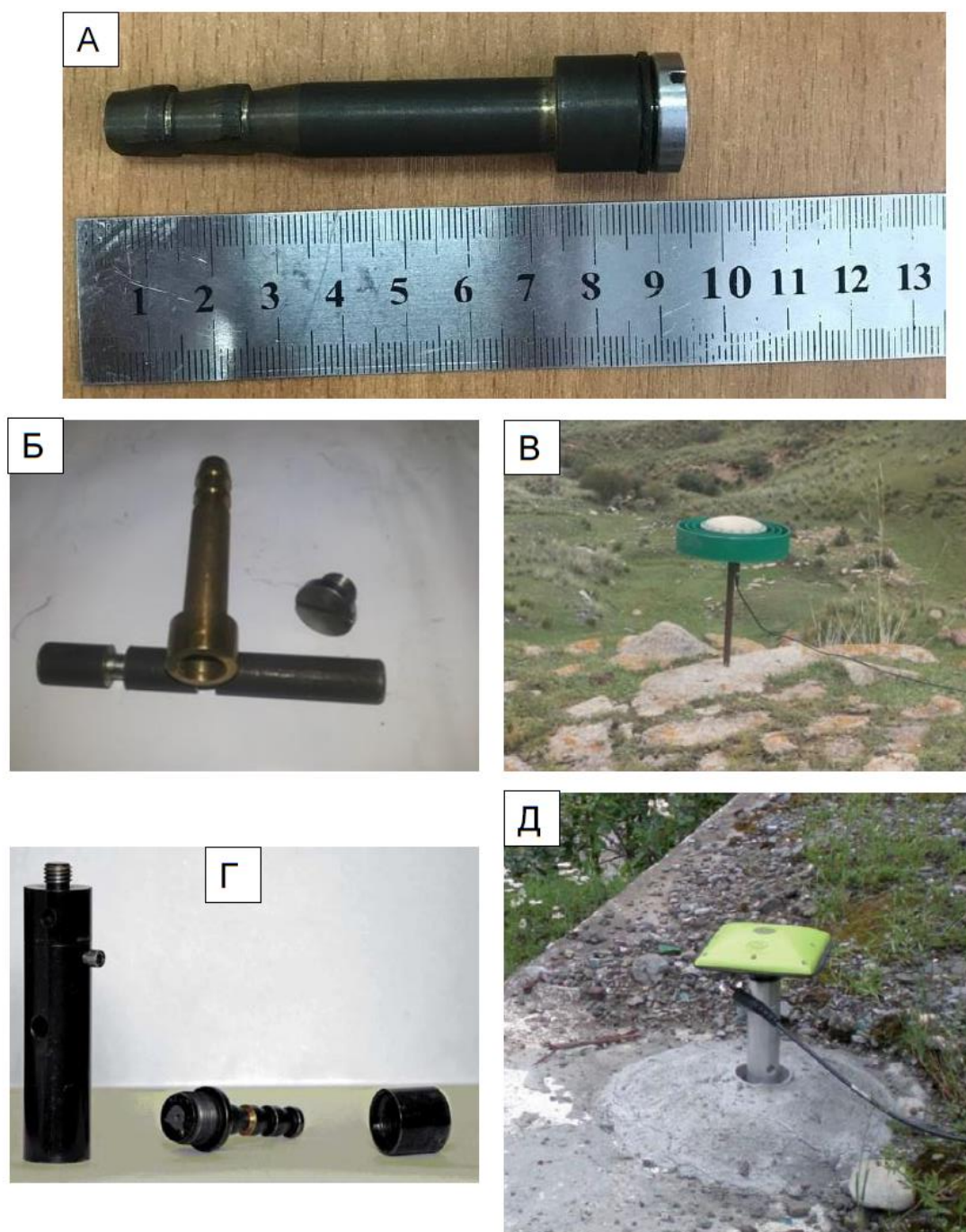


Рисунок 3.17 – Скальные геодезические центры с крепежом в виде штифта: А, Б – конструкция центра НС РАН, В – пункт геодинимического полигона на территории Центральной Азии [Зубович и др., 2004], Г – конструкция центра ВНЦ РАН, Д – пункт на Осетинском геодинимическом полигоне [Милуков и др., 2011; Милуков и др., 2014]

3.3.2. Исследования по выбору оптимальной конструкции и технологии установки скальных центров

Рассмотренный выше опыт послужил основой для выполнения поставленной задачи закладки скальных геодезических центров. Для этого была разработана оригинальная конструкция скального центра для условий территории Нижне-Канского ГДП. Для повышения надежности закрепления скального центра в массиве пород было принято решение использовать стержневой тип центра с анкерным креплением. Было создано несколько экспериментальных вариантов конструкции скального центра, с целью 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.

Всего было протестировано 5 образцов центров (рисунок 3.18). Скальный центр изготовлен в виде латунного стержня, диаметром 30 мм. В конструкции А длиной 150 мм имеется один поперечный пропил в нижней части шириной 10 мм и глубиной 40 мм. Конструкция Б отличается тем, что в нижней части имеет крестообразный пропил шириной 10 мм. Конструкция В имеет увеличенную ширину пропила в нижней части до 15 мм и два витка кольцевых зазоров. Конструкция Г имеет длину стержня 200 мм и увеличенную глубину пропила в нижней части до 60 мм. Конструкция Д имеет максимальную ширину пропила в нижней части в 20 мм и два витка кольцевых зазоров. Кроме этого, было протестировано несколько типов клиньев. Клинья создавались с высотой от 30 до 50 мм, шириной верхней кромки клина от 5 до 10 мм. Были созданы два типа формы клина – клиновидной и конусовидной (рисунок 3.18 Е, Ж).

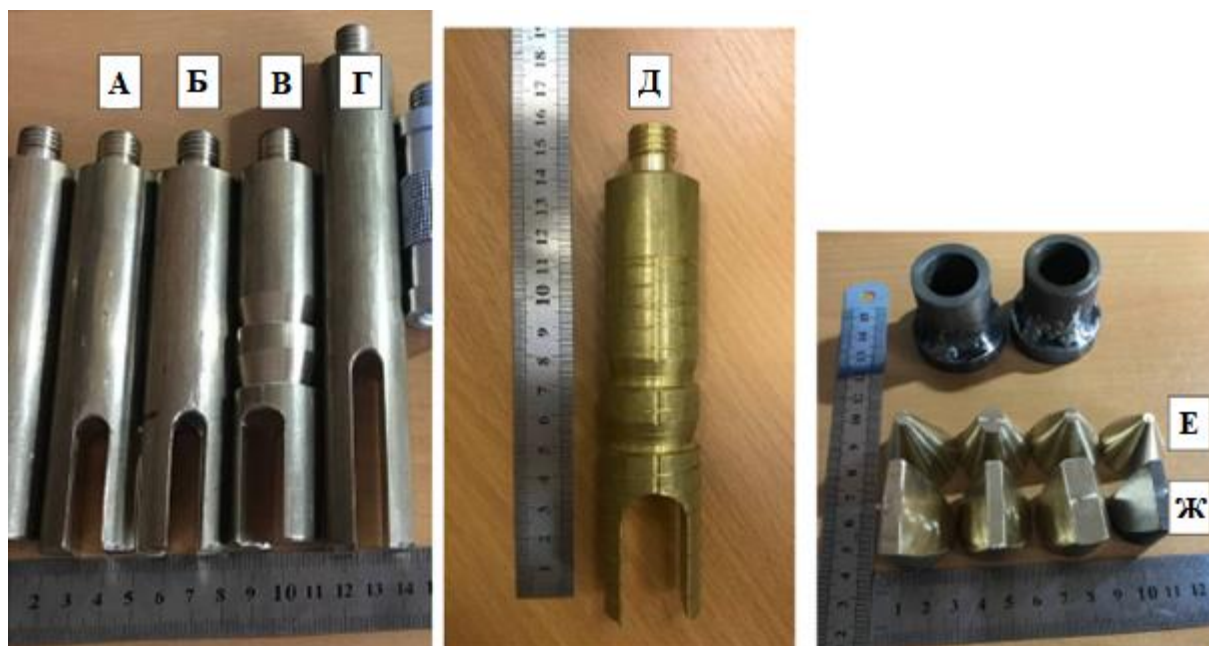


Рисунок 3.18 – Внешний вид скальных геодезических центров с анкерным типом закрепления А, Б, В, Г, Д – опытные образцы скальных геодезических центров, Е – конусовидная форма клина, Ж – клиновидная форма клина

Для совершенствования технологии закладки скальных центров были проведены лабораторные работы по установке центров в гранитный блок, который близок к свойствам горных пород Нижне-Канского массива (рисунок 3.19-1). Изучалась надежность закрепления скального центра в зависимости от диаметра скважины и различных видов строительных смесей. Использовались растворы трех видов: цементно-бетонная смесь с различным количеством содержания воды (от вязкого состояния до жидкого), химический анкер, гидроизоляционный цемент.

Результаты опытных исследований позволили сделать окончательные выводы об используемой конструкции скального центра, технологии бурения и закладке. Конструкции центров с одиночным пропилом в нижней части стержня в 10 и 15 мм (рисунок. 3.18 А, В) плохо поддавались ручному расклиниванию из-за малой ширины пропила. Конструкция с двойным пропилом в нижней части стержня (рисунок 3.18 Б) также имела проблемы с расклиниванием. При использовании конусовидного клина, нижняя часть стержня равномерно скручивалась вокруг клина, не расширяясь к стенкам

скважины (рисунок 3.19-2), и не обеспечивая надежного закрепления центра. Растворы вязкоупругой консистенции (химический анкер, цементно-бетонные смеси с малым количеством воды) проявляли эффект выталкивания центра из скважины за счет упругой отдачи раствора при расклинивании центра. Так же они существенно хуже смачивали остатки каменной пыли внутри скважины (рисунок 3.19-3), тем самым ухудшая сцепление раствора со стенками скважины. В связи с чем был сделан вывод о нецелесообразности их применения.



Рисунок 3.19 – Установка экспериментальных образцов скальных центров в гранитный блок. 1 – опытные образцы центров А, Б, В, Г, Д в скважинах, 2 – эффект скручивания нижней части центра в результате использования клина конусовидной формы, 3 – остатки каменной пыли в скважине

Оптимальной оказалась конструкция центра Д (рисунок 3.18), представляющая собой латунный стержень длиной 150 мм, с одночным пропилом в нижней части стержня шириной 20 мм и глубиной 40 мм. Для лучшей адгезии с раствором на стержне нанесены два витка кольцевых зазоров и дополнительно было принято решение добавить опоясывающие витки

глубиной в 1 мм. Клин имеет клинообразную форму, высоту 40 мм, ширину верхней кромки в 10 мм. Диаметр скважины для установки центра – 32 мм. Фотография и схема оптимальной конструкции представлена на рисунке 3.20. В качестве строительной смеси было принято решение использовать цементно-бетонную смесь в жидком состоянии (примерные соотношения: 1 часть цемента, 2 части мелкозернистого песка, 2 части воды).

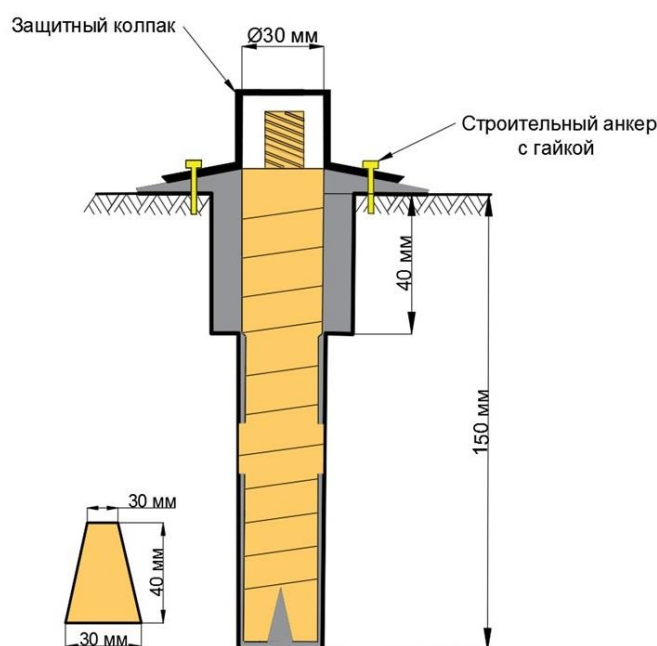


Рисунок 3.20 – Схема и вид оптимальной конструкции скального центра

Бурение скважин в полевых условиях осуществлялось с помощью ручного аккумуляторного перфоратора MAKITA DHR 400. Технология бурения была принята в следующей последовательности:

1. Бурение осуществлялось комбинированным способом (сверление с долблением). Бурение начинают с низких оборотов насадки, чтобы избежать излишнего разрушения массива в приповерхностной части скважины. После первых 2-3 сантиметров (в зависимости от прочности пород), обороты бурения увеличиваются.
2. При бурении используется жидкость внутри скважины для охлаждения бура, но при проходке последних 3-4 сантиметров необходимо

исключить ее добавление, чтобы избежать наличия излишков воды при установке скального центра.

3. При бурении контролируется вертикальное положение рабочего органа перфоратора.
4. Регулярно, каждые 0.5–1 сантиметр интервала скважины бур изымается из скважины для очистки скважины от гранитной пыли и более крупных частиц породы. Стенки скважины очищаются железной щеткой.

3.4 Развитие сети деформационного мониторинга

В рамках разработки методики полевых ГНСС-наблюдений решались две задачи по развитию сетей наблюдений ГДП. Первая – оптимизация сети наблюдений средствами ГНСС и вторая – проектирование профиля высокоточного нивелирования для высокоточных (1-класса точности) наблюдений за вертикальной компонентой СДЗК.

3.4.1 Оптимизация сети ГНСС-мониторинга

Для выполнения инженерно-геодезических работ по созданию новых пунктов ГНСС сначала были выбраны места на местности для закладки новых центров, которые по возможности удовлетворяли бы следующим условиям [Правила закладки..., 1993; Правила закрепления..., 2001]:

- долговременная сохранность и стабильность положения геодезического центра с точки зрения физико-географических условий (исключить расположение пунктов на участках, подверженных необратимым деформациям грунтов (оползневые склоны), сезонному подтоплению, заболачиванию и перспективной хозяйственной деятельности);
- наличие условий для качественного приема спутниковых сигналов (место должно находиться на возвышении, отсутствие препятствий и помех для радиосигнала);

- расположение новых мест должно быть в южной части исследуемого района, чтобы площадь строительной площадки ПИЛ и участка «Енисейский» оказывалась внутри контура геодезической сети;
- создание оптимальной геометрии геодезической сети, а именно, увеличение числа треугольников близких к равносторонним (для снижения погрешности определения компонент деформаций);
- транспортная доступность геодезического пункта.

Скальный массив должен удовлетворять следующим условиям:

- быть коренным выходом скальных горных пород, исключается установка центров в отдельные валуны, обломочный материал или коллювиальные отложения;
- обладать массивной или однородной текстурой горных пород, иметь выдержанную слоистость массива;
- иметь малую структурную нарушенность – до 2 главных систем трещин, показатели блочности со средним расстоянием между трещинами от 15 см и более. трещины массива должны быть плотно залеченными, иметь минимальное раскрытие (<1 мм), или иметь минеральный заполнитель (песчаный, глинистый, илистый, и подобные заполнители не допускаются);
- не допускается установка центра в сильно выветренные горные породы или в породы с признаками активных метаморфизированных процессов (связанных с воздействием воды, ветра или физико-химическими воздействиями).

Детальные рекогносцировочные работы были выполнены в летний период 2021 года. Для поиска скальных обнажений на местности в маршруте использовалось беспилотное воздушное судно Квадрокоптер DJI Mavic Mini. В качестве полезной нагрузки на квадрокоптер был установлен двухосевой подвес и экшн-камера в версии сборки квадрокоптера. Топографическая привязка участков и запись треков дорожной сети осуществлялось с помощью ГЛОНАСС/GPS-навигатора GARMIN eTrex 10. Инженерно-геодезические

работы по закладке геодезических пунктов были проведены в летний период 2021 и весенний период 2022 года.

В результате работ была выполнена установка 11 новых геодезических пунктов, из которых 6 штук – выполнены с использованием конструкции скального геодезического центра, а оставшиеся 5 штук – с использованием конструкции трубчатого знака. Общий вид некоторых геодезических пунктов приведен на рисунках 3.21-3.22.

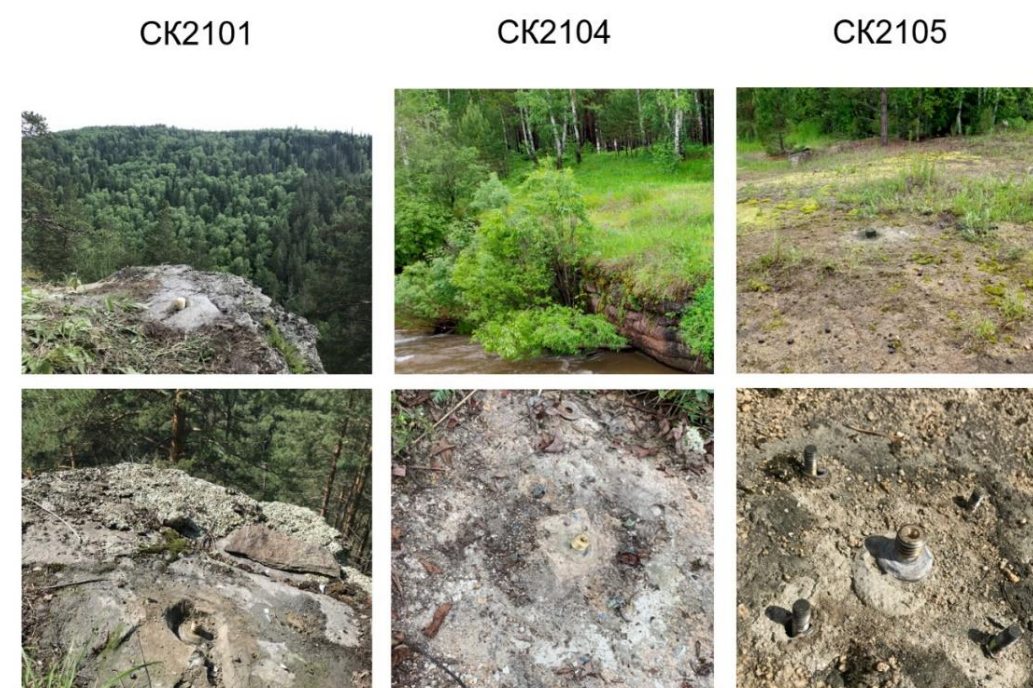


Рисунок 3.21 – Общий вид установленных скальных геодезических центров



Рис. 3.22 – Общий вид установленных скальных геодезических центров во время выполнения ГНСС-измерений

3.4.2 Проектирование профилей высокоточного геометрического нивелирования

Известно, что метод повторного высокоточного нивелирования позволяет получить более точные значения вертикальных движений по сравнению с ГНСС-методом. В районе имеется профиль нивелирования №1 первого класса точности, который был оборудован для решения других задач. Как видно из схемы на рисунке 3.24, профиль №1 не охватывает южную часть территории. Поэтому в 2022 году были выполнены работы по проектированию дополнительных профилей высокоточного геометрического нивелирования. При проектировании учитывались нормативы [*РБ-019-17; ГКИНП (ГНТА)-03-010-03; СП 22.13330.2016*]:

1. Наличие уже существующего профиля нивелирования №1, по которому получены длительные ряды наблюдений;
2. Схема расположения основных тектонических разломов и геолого-геоморфологическое строение района;
3. Физико-географические условия, существующие объекты и площадку строительства ПИЛ, определяющие геометрию проектируемой сети;
4. Совмещение пунктов для проведения нивелирных и ГНСС-измерений.

Конфигурация нивелирной сети разрабатывалась с учетом геолого-геофизических особенностей территории, включая расположение локальных поднятий и особенности рельефа. Общее количество пунктов на ГДП составило 41, из них 32 грунтовых и 7 глубинных реперов. Схема расположения нивелирных пунктов представлена на рисунке 3.24.

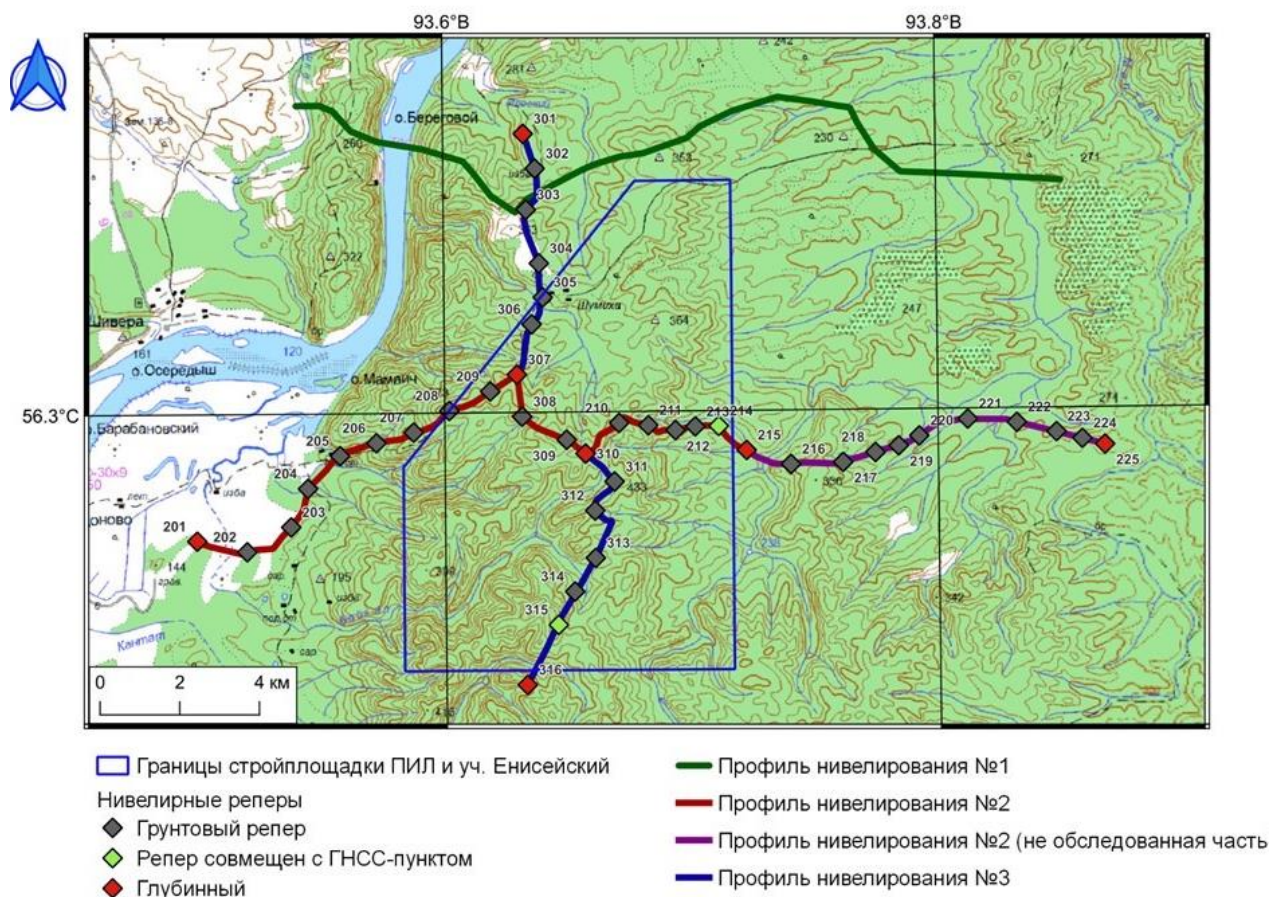


Рисунок 3.24 – Схема расположения нивелирных реперов профилей № 1, 2, 3

Фундаментальные репера закладываются на концах профильных линий, а также на узловых пунктах пересечения профилей. Наблюдательная сеть, запроектированная на площадки размещения ПИЛ, в т.ч. ее ближней и дальней зон, состоит из 3 профильных линий. Грунтовые реперы заложены через 3-4 км, глубинные через 30-40 км. Вблизи глубинных разломов грунтовые знаки закладывались чаще - через 0,5-1,5 км.

Высокоточное нивелирование на ГДП выполняют несколькими последовательными циклами. Интервал времени между повторным нивелированием устанавливают, исходя из ожидаемых скоростей вертикальных СДЗК.

3.5 Определение и визуализация параметров движений и деформаций земной поверхности в среде Python 3 и QGIS 3

Несмотря на доступность различных бесплатных и коммерческих программных продуктов для анализа деформаций, проблема остается в недостатке удобных инструментов для визуализации результатов исследований в этой области. Это объясняется тем, что для корректной визуализации требуется создание сложных геометрических моделей в геоинформационных системах (ГИС) или обладание профессиональными навыками в объектно-ориентированных ГИС и специализированных картографических библиотеках. Существует немалое количество специализированного программного обеспечения для расчета и визуализации полей деформаций земной коры, среди них стоит отметить следующие:

- *Grid_strain and grid_strain3* – свободно распространяемое скомпилированное ПО, написанное на языке MATLAB, выпущенное итальянскими исследователями в 2008 году [Teza et al., 2008]. Реализует метод расчета поля тензора деформаций по методу [Shen et al., 1996];
- SSPX – свободно распространяемое скомпилированное ПО, написанное на языке C, разработанное в 2009 году для операционной системы MacOS [Cardozo and Allmendinger, 2009]. Реализует метод расчета поля тензора деформаций по методу [Shen et al., 1996];
- Geostrain - свободно распространяемое ПО с открытым исходным кодом, написанное на языке MATLAB, выпущенное исследователями в 2015 году [Goudarzi et al., 2015]. Реализует метод расчета поля тензора деформаций по методу [Shen et al., 1996];
- Pystrain – библиотека с открытым исходным кодом интегрированная в ГИС-пакет GMT, написанная на языке Python [Dimitrios et al., 2019]. Реализует метод расчета поля тензора деформаций по методу [Shen et al., 1996];

– PyGMT – свободно распространяемая Python-библиотека для объектно-ориентированной ГИС Generic mapping tools (GMT) [Wessel *et al.*, 2019]. Главная данной ГИС особенность – отсутствие графического редактора и сложная библиотека функций. Требуется высокого уровня владения GMT, для возможности решения задач деформационного анализа.

– PyTAGS – свободно распространяемый программный код, написанный на языке Python [Crowell, 2019]. Реализует расчеты параметров деформаций для исходного набора точек и смоделированных сеточных данных.

– Web-приложение Deformation Analysis, созданное Чешским институтом Геодезии, топографии и картографии [Deformation, 2023]. Реализует расчеты параметров деформаций для исходного набора точек и смоделированных сеточных данных.

– DEFO – программное обеспечение, написанное на языке MATLAB [Кафтан и др., 2010]. «Осуществляет уравнение повторных определений векторов базовых линий и расчет параметров деформаций для исходного набора точек измерений. Программа DEFO обеспечивает также создание кинематической визуализации характера изменений векторов смещений пунктов ГНСС» [Мельников, 2018].

В работе [Кафтан и Докукин, 2017] были приведены основы метода деформационного описания результатов геодезических наблюдений. Они получили свое развитие и применение в приложениях к геодинамическим исследованиям в работах Цубои [Tsuboi, 1933], Фрэнка [Frank, 1966.], В.К. Кучая [Кучай и Захаров, 1984], Н.П. Есикова [Есиков, 1991]. Аналогичные подходы были описаны в работах многих современных исследователей в области геодезии и геодинамики [Шароглазова, 2002.; Мазуров, 2016.; Кафтан и Докукин, 2017.; Герасименко и др., 2017]. Представленная библиотека PyGeoStrain предназначена для реализации классического деформационного анализа.

На данный момент библиотека включает в себя:

- анализ временных рядов приращений координат;
- расчет компонент тензора плановых деформаций;
- библиотеку условных обозначений для QGIS 3.

Далее рассмотрим алгоритм вычисления деформаций, используемый в PyGeoStrain. Этот алгоритм используется для вычисления плановых деформаций земной коры между тремя пунктами ГНСС Python [Маневич и др., 2023]. Этот анализ включает в себя несколько допущений: вертикальные скорости деформаций не используются, предполагается, что деформация в пределах конечного элемента (треугольника) является однородной. Исходные данные, подаваемые в алгоритм приведены в таблице 3.12. Для определения параметров деформаций используются данные трех пунктов ГНСС – их координаты в метрической проекции (к примеру, универсальной поперечной проекции Меркатора или проекции Гаусса-Крюгера), оценки смещений или скоростей смещений пунктов и СКО их определений.

Таблица 3.12 – Исходные данные для определения параметров деформаций

Пункт	East, м	North, м	v_e , м/год	СКО _e , м	v_n , м/год	СКО _n , м
Point1	X_1	Y_1	v_{e1}	σ_{e1}	v_{n1}	σ_{n1}
Point2	X_2	Y_2	v_{e2}	σ_{e2}	v_{n2}	σ_{n2}
Point3	X_3	Y_3	v_{e3}	σ_{e3}	v_{n3}	σ_{n3}

На следующем шаге составляются матрицы координат пунктов M1, M2 и матрица скоростей или смещений пунктов:

$$M1 = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 \\ X_2 & Y_2 \\ X_3 & Y_3 \end{bmatrix}, \quad (3.11)$$

$$M2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -m1_{12} & m1_{11} & m1_{12} & 0 \\ 0 & 1 & m1_{11} & 0 & m1_{11} & m1_{12} \\ 1 & 0 & -m1_{22} & m1_{21} & m1_{22} & 0 \\ 0 & 1 & m1_{21} & 0 & m1_{21} & m1_{22} \\ 1 & 0 & -m1_{32} & m1_{31} & m1_{32} & 0 \\ 0 & 1 & m1_{31} & 0 & m1_{31} & m1_{32} \end{bmatrix}, \quad (3.12)$$

$$M3 = \begin{bmatrix} P^1 v_{e1} \\ P^1 v_{n1} \\ P^2 v_{e2} \\ P^2 v_{n2} \\ P^3 v_{e3} \\ P^3 v_{n3} \end{bmatrix}, \quad (3.13)$$

Значения параметров деформаций конечного элемента вычисляются умножением обратной матрицы M2 на матрицу M3:

$$M4 = M2^{-1}, \quad (3.14)$$

$$M5 = M4 \times M3 = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ \Omega \\ \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yy} \end{bmatrix}, \quad (3.15)$$

где t_x , t_y – компоненты скорости смещения центраида конечного элемента, м/год; Ω – скорость вращения конечного элемента, радиан/год; ε_{xx} , ε_{yy} , ε_{xy} – компоненты тензора деформации.

Главные деформации e_1 , e_2 ; деформация дилатации Δ , деформация чистого сдвига $\gamma_{\max}$ вычисляются по формулам 3.20–3.23:

$$e_1 = \frac{(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) + \sqrt{4\varepsilon_{xy}\varepsilon_{yx} + (\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2}}{2}, \quad (3.16)$$

$$e_2 = \frac{(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) - \sqrt{4\varepsilon_{xy}\varepsilon_{yx} + (\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2}}{2}, \quad (3.17)$$

$$\Delta = e_1 + e_2, \quad (3.18)$$

$$\gamma_{\max} = 2 \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}}{2}\right)^2 + (\varepsilon_{xy})^2} \quad (3.19)$$

Для вычисления СКО определения плановых деформаций составляется матрица, диагональные члены которой являются обратными квадратами СКО скоростей пунктов ГНСС:

$$M6 = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_{e1}^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_{n1}^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_{e2}^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_{n2}^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_{e3}^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_{n3}^2} \end{bmatrix}, \quad (3.20)$$

Значения СКО определения плановых деформаций являются диагональными членами матрицы M7:

$$M7 = M2^T \times M6 \times M2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_{tx}^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_{ty}^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_{\Omega}^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_{\varepsilon xx}^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_{\varepsilon yy}^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_{\varepsilon xy}^2} \end{bmatrix}, \quad (3.21)$$

В результате расчетов выводится конечный файл точек – центроидов треугольников построения Делоне. Каждому треугольнику соответствуют координаты в той проекции, в которой были заданы исходные данные. Выходной файл включает в себя так же результаты расчетов деформации земной поверхности приведенных выше.

Библиотека файлов PyGeoStrain (рисунок 3.25) разрабатывается сотрудниками лаборатории геодинамики Геофизического центра РАН (Приложение 1).

```

86
87 # Вычисляем средний размер K3
88 fe_sum = 0
89 fe_area_sum = 0
90 fe_area_mean = 0
91 for i in range(0, len(ta)): #Проходим циклом по всем треугольникам
92     half_p = 0
93     fe_area = 0
94     data1 = np.zeros((3, 6)) #Создаем пустой массив данных для расчета
95     data1 = np.array([[input[ta[i,0],1], input[ta[i,0],2], input[ta[i,0],3], input[ta[i,0],4], input[ta[i,0],5], input[ta[i,0],6]],
96                       [input[ta[i,1],1], input[ta[i,1],2], input[ta[i,1],3], input[ta[i,1],4], input[ta[i,1],5], input[ta[i,1],6]],
97                       [input[ta[i,2],1], input[ta[i,2],2], input[ta[i,2],3], input[ta[i,2],4], input[ta[i,2],5], input[ta[i,2],6]]])
98
99     edge1 = math.sqrt((data1[0, 0] - data1[1, 0]) ** 2 + (data1[0, 1] - data1[1, 1]) ** 2)
100    edge2 = math.sqrt((data1[1, 0] - data1[2, 0]) ** 2 + (data1[1, 1] - data1[2, 1]) ** 2)
101    edge3 = math.sqrt((data1[2, 0] - data1[0, 0]) ** 2 + (data1[2, 1] - data1[0, 1]) ** 2)
102    half_p = (edge1+edge2+edge3)/2
103    fe_area = math.sqrt(half_p*(half_p-edge1)*(half_p-edge2)*(half_p-edge3))
104    fe_area_sum = fe_area_sum + fe_area
105    fe_sum=fe_sum+(edge1+edge2+edge3)/coef1
106
107
108 fe_area_mean = fe_area_sum/len(ta) #Средняя площадь треугольника
109 mean_fe= fe_sum/len(ta) #Характеристический размер конечного элемента (для умножения длин)
110
111 for i in range(0, len(ta)): #Проходим циклом по всем треугольникам
112     data = np.zeros((3, 6)) #Создаем пустой массив данных для расчета
113     triName = np.array([[input[ta[i,0],0],input[ta[i,1],0], input[ta[i,2],0]]])
114     data = np.array([[input[ta[i,0],1], input[ta[i,0],2], input[ta[i,0],3], input[ta[i,0],4], input[ta[i,0],5], input[ta[i,0],6]],
115                     [input[ta[i,1],1], input[ta[i,1],2], input[ta[i,1],3], input[ta[i,1],4], input[ta[i,1],5], input[ta[i,1],6]],
116                     [input[ta[i,2],1], input[ta[i,2],2], input[ta[i,2],3], input[ta[i,2],4], input[ta[i,2],5], input[ta[i,2],6]]])
117

```

Рисунок 3.25 – Пример кода на языке Python

Состав файлов библиотеки: DefoProj – директория с тестовым ГИС-проектом визуализации параметров деформаций в QGIS 3 (версия 3.30):

- DefoSymbols – директория со стилями параметров деформаций в QGIS 3, ориентированная под результаты вычислений скриптов PyGeoStrain;
- Scripts – директория со скриптами для деформационного анализа. Содержит примеры исходных данных и сценарии исполнения кода для вычислений.
- DefoData – директория с подготовленными исходными данными для тестового расчета.

Для визуализации и пространственного анализа полученных данных точки загружаются в QGIS 3 (рисунок 3.26). Далее на основе пространственных данных были созданы пользовательские геометрии, для визуализации векторов движений, осей ориентации главных деформаций,

угловой скорости вращения. Карты-распределения деформации сдвига и дилатации могут быть созданы двумя методами в ГИС: интерполяцией данных точек в растр, либо присвоением соответствующих атрибутов деформации треугольникам триангуляции Делоне.

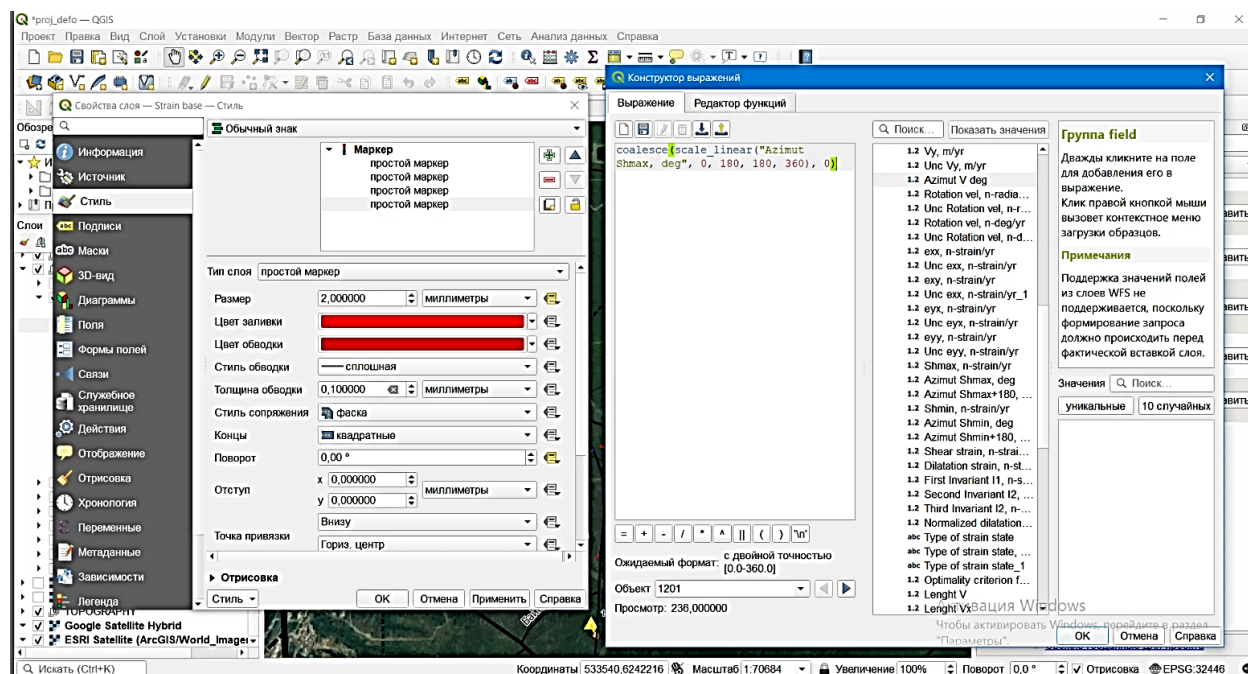


Рисунок 3.26 – Условные обозначений на основе пользовательских геометрий, вычисленных в PyGeoStrain

Примеры визуализации параметров деформаций в ГИС приведены в главе 4, для геодинамического полигона Нижне-Канскогого массива. Предложенная геометрия условных обозначений представлена в библиотеке PyGeoStrain в виде отдельных стилей и пробного проекта в QGIS 3.

3.6 Выводы по главе 3

1. Разработанный метод полевого контроля точности ГНСС-аппаратуры демонстрирует способность выявления неточных номинальных параметров используемых измерительных средств. Он обеспечивает регистрацию субсантиметровых движений земной поверхности, особенно в условиях тектонически умеренно-активных районов. Это, в свою очередь, позволяет более точно и адекватно оценить геодинамическую обстановку исследуемой

территории. Точность ГНСС-приемников повысилась до уровней 1.5 – 2.5 мм в плане и 2.5 мм по высоте.

2. Исследование пространственных закономерностей различных по типу тектонических напряжений участков земной коры для дистанций от 10 до 1000 км позволили выделить в облаке скоростей деформаций два класса, характерных для геодинамического режима исследуемого района: «относительно неопасные», и превышающие их, которые считаем «опасными».

Опасные деформации определены для каждой дистанции, на которое нормировалось смещение земной поверхности, зарегистрированное по ГНСС-данным. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых (в том числе нормативных) инженерных критериев безопасности эксплуатации объектов с длительным сроком эксплуатации, включая объекты подземной изоляции РАО, с учетом масштабного эффекта.

3. Для оптимизации структуры сети ГНСС-наблюдений в районе строительства ПИЛ был выполнен следующий комплекс исследований:

- 1) разработана конструкции скального центра;
 - 2) проведены рекогносцировочные мероприятия с целью выявления мест установки ГНСС-пунктов;
 - 3) произведена закладка ГНСС-пунктов в скальных породах.
4. Проведена модернизация геодинамического полигона Нижне-Канского массива:

- спутниковая геодезическая сеть была расширена до 39 ГНСС-пунктов, в том числе путем закладки 6 скальных геодезических центров. В результате структура сети была оптимизирована за счет закладки дополнительных центров в южном направлении от площадки ПИЛ, неохваченной ранее наблюдениями. Строительство новых ГНСС-пунктов существенно улучшило внутреннюю геометрию сети: в структуре сети увеличилось количество треугольников близких к равносторонним, что повысило точность определения деформаций земной поверхности;

- спроектированные профили высокоточного нивелирования позволят измерить вертикальную составляющую СДЗК с высокой точностью и выявить при наличии аномальную активность разломов, представляющих зоны повышенного геодинамического риска для объекта. В дополнение к данным, ГНСС-наблюдений периодическое высокоточное нивелирование обеспечит контроль за вертикальными изменениями, которые могут оказать влияние на безопасность и устойчивость подземных сооружений.

5. Использование библиотеки PyGeoStrain является адекватной альтернативой аналогичным программам благодаря открытому доступу к исходному коду, легкой реализации алгоритмов для расчета деформаций и возможности интеграции с QGIS 3. Это позволит пользователям выполнять анализ пространственных данных и визуализации векторов движений, ориентации главных деформаций и угловой скорости вращения одновременно сочетая в себе простоту использования и гибкость анализа геодинамических данных.

ГЛАВА 4. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В РАЙОНЕ РАЗМЕЩЕНИЯ ПИЛ ПО ДАННЫМ ГНСС-ИЗМЕРЕНИЙ

Главная цель геодезического мониторинга с использованием средств ГНСС заключается в определении скоростей деформаций как инвариантной характеристики, не зависящей геометрического фактора [Кузьмин, 2014; Татаринов, 2012]. При этом важно знать деформационные характеристики не только на площадке ПИЛ, имеющей небольшие размеры, но и в дальней зоне ПИЛ, т.к. соседние тектонические блоки оказывают деструктивное влияние на тектонический блок, вмещающий ПИЛ. В этой связи, необходимо перед началом самого процесса деформационного анализа определиться с гипотезой (моделью) возможного геодинамического режима района на основе всей имеющейся информации (геология, тектоника, инструментальные данные, геоморфология, геофизика и др.).

4.1 Анализ предпосылок развития геодеформационных процессов в районе строительства ПИЛ

Рассмотрим основные предпосылки, дающие основание предварительно построить предварительную кинематическую модель района.

а) Геолого-тектонические особенности.

«Южно-Енисейский кряж (рисунок 4.1), находящийся в зоне сочленения с Западно-Сибирской плитой отделен от нее системой параллельных субмеридианальных разломов, главным из которых Муратовский. Северная часть Нижне-Канского массива, в пределах водораздела рек Енисей-Кан сечется глубинными разломами, подвижки по которым продолжаются в настоящее время. Ориентация разломов субмеридианальная, хорошо коррелируется с руслами рек. К востоку от Муратовского разлома последовательно расположены: Правобережный, разлом долины Черского,

Большетельский, Малотельский, Большой и Малый Итатские, Канско-Енисейский разломы» [Андерсон и др., 2011].

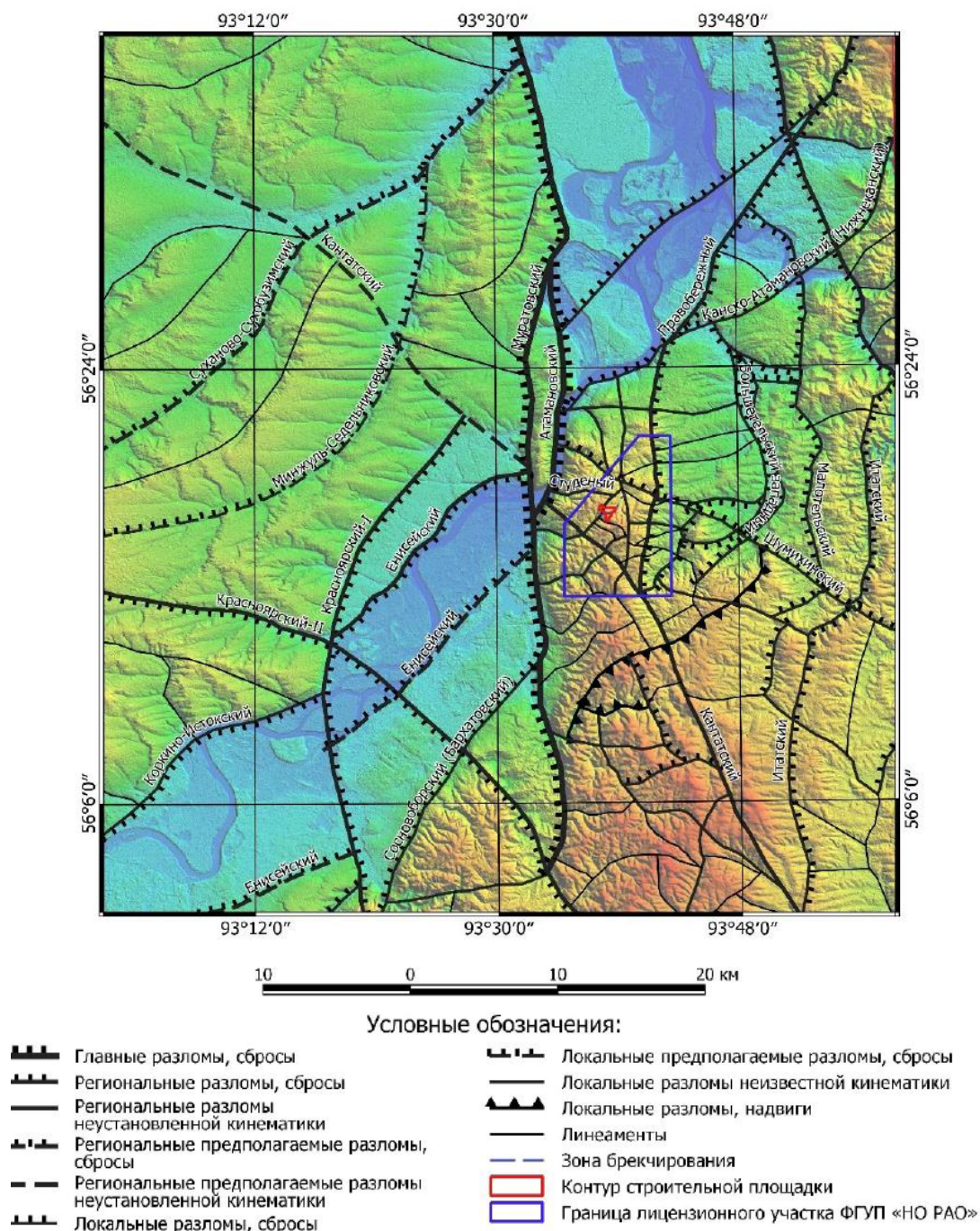


Рисунок 4.1 – Тектоническая схема дальней зоны ПИЛ с учётом кинематических типов разрывных нарушений по данным ИГЕМ РАН, 2021 г.

«Разломно-блоковая структура северной части массива представляет собой систему тектонических ступеней, гипсометрические отметки которых снижаются с востока на запад: от приподнятого края Сибирской платформы к относительно опущенной Западно-Сибирской плите» [Андерсон и др., 2011].

района по трем категориям степени геодинамической устойчивости: условно безопасные ($S_{Ef} > 0,65$); нейтральные ($0,45 < S_{Ef} < 0,65$); опасные ($S_{Ef} < 0,65$). Римскими цифрами показаны три прогнозируемые неустойчивые зоны в пределах сети ГНСС, требующих проверки.

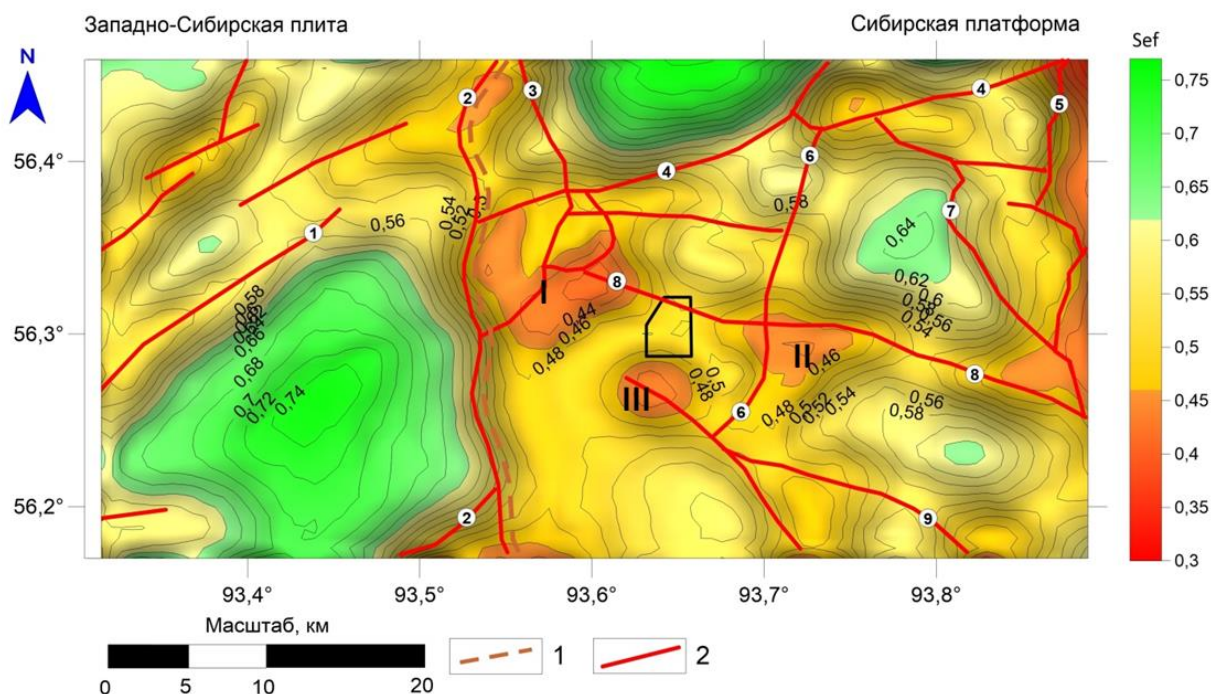


Рисунок 4.3 – Схема районирования по степени геодинамической безопасности. 1 - граница контакта Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты; 2 – крупные тектонические разломы. Римскими цифрами показаны выявленные неустойчивые зоны

г) Геоморфологические данные.

На рисунке 4.4 представлена карта, характеризующая устойчивость среды по геоморфологическим особенностям рельефа и меры близости к тектоническим разломам. Теоретические основы подхода представлены в работе [Гвишиани и др., 2019]. Структурный блок, включающий площадку строящейся ПИЛ, характеризуется относительно благоприятными геоморфологическими условиями.

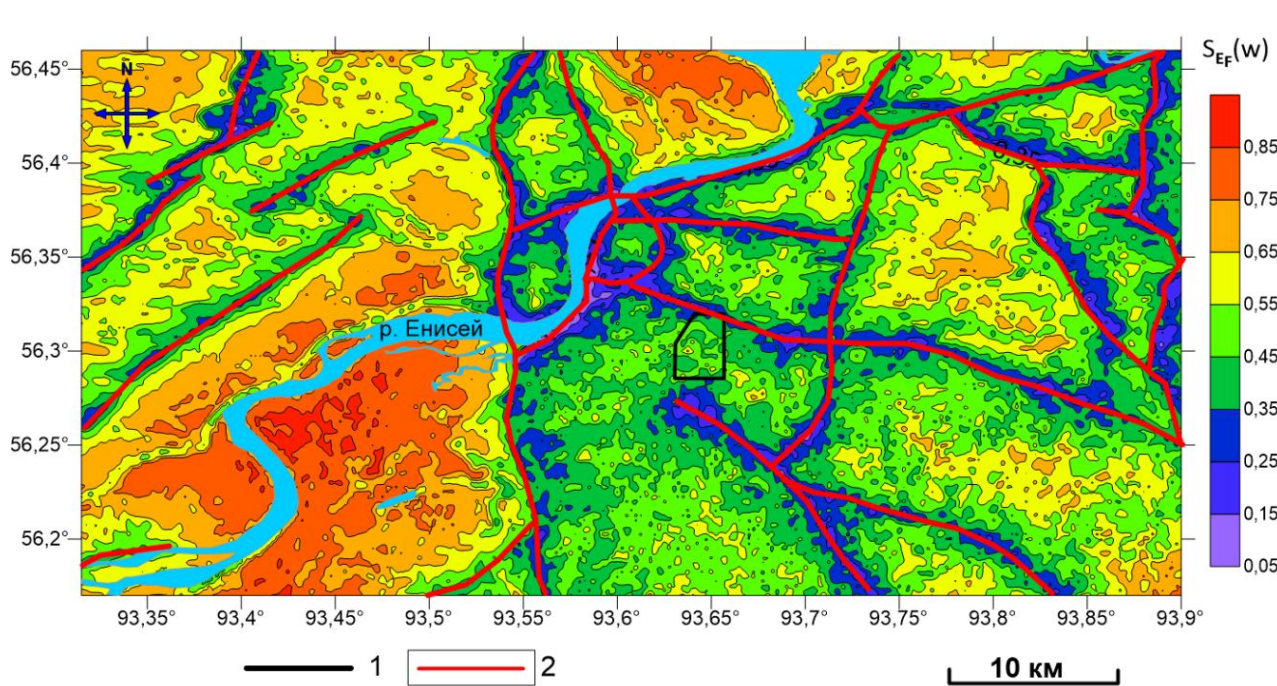


Рисунок 4.4 – Пример расчета меры геодинамической безопасности, учитывающей рельеф и близость к тектоническим разломам

Приведенный выше материал послужил базой для планирования ГНСС-наблюдений, а также для последующей интерпретации полученных данных о современных движениях земной коры в районе строительства ПИЛ.

4.2. Анализ смещений ГНСС-пунктов за период с 2012 по 2021 гг.

На рисунках 4.5 - 4.6 показаны векторы скоростей горизонтальных СДЗК ГНСС-пунктов, полученные за период с 2012 по 2021 год. Они подтверждают современную активность Муратовского, Атамановского, Канско-Атамановского, Правобережного и Шумихинского разломов. Абсолютные величины скоростей заключены в диапазоне от 1 до 4 мм/год. Наибольшие значения зафиксированы вблизи Муратовского и Атамановского разлома (п. 1204, 1214), Енисейского разлома (п. 1213), разломов Тельского быка (п. 1211, 1223), Правобережного (п. 1207) и Безымянного (п. LP09) разломов.

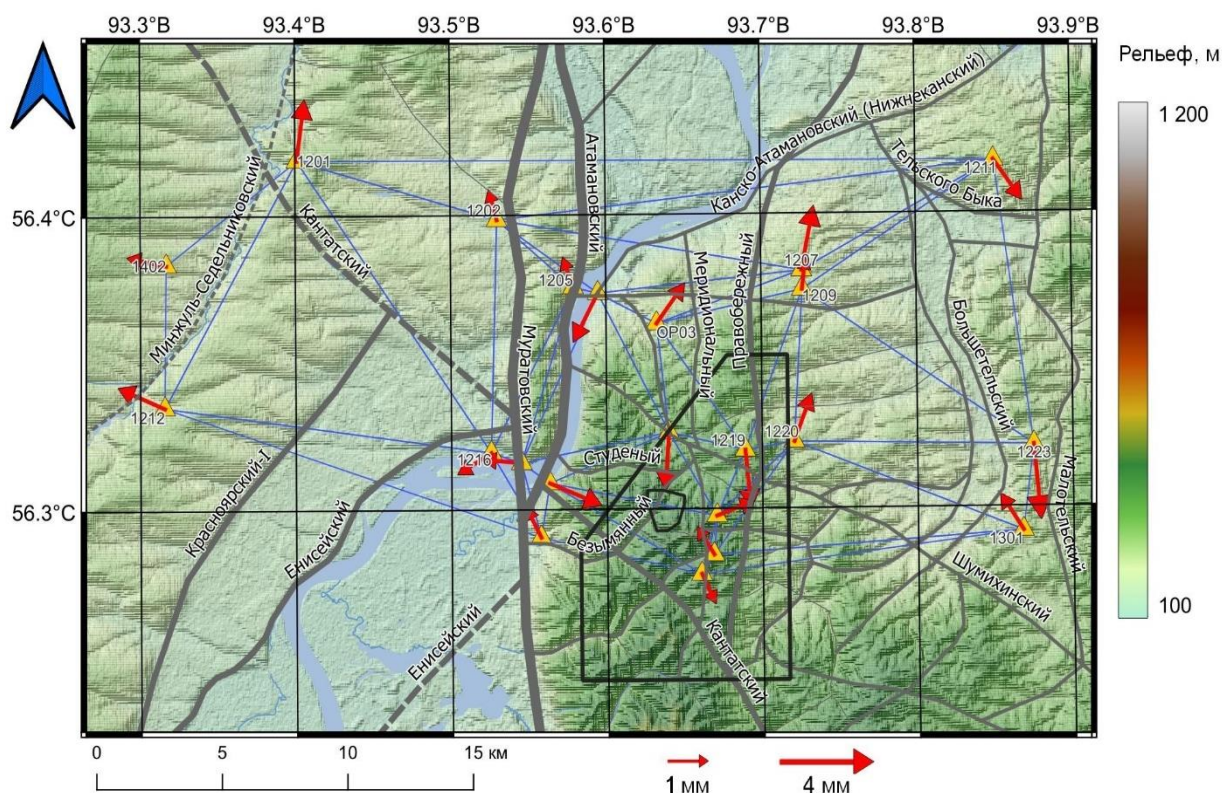


Рисунок 4.5 – Векторы скоростей смещений, установленные по результатам обобщения ГНСС-наблюдений за период с 2012 по 2021 гг. [Гвишиани и др., 2022]

В первую эпоху измерений 2012-2013 гг. пункты ГНСС смещались преимущественно в северо-восточном и юго-восточном направлении и приурочены (рисунок 4.6). В период 2012-2014 гг. ориентировка векторов кардинально изменилась: направления смещений пунктов 1202, 1207, LP08 на север, а пунктов 1213, 1214, 1211, LP06 - на юг. Изменение их азимута составило $\approx 90^\circ$. Пункты OP03, OP02 и 1215 изменили направление почти на 170° . Абсолютные значения смещений варьировались в широком диапазоне - от 1 до 16 мм. Пункты, расположенные по обе стороны Муратовского разлома испытывали движения в противоположных направлениях.

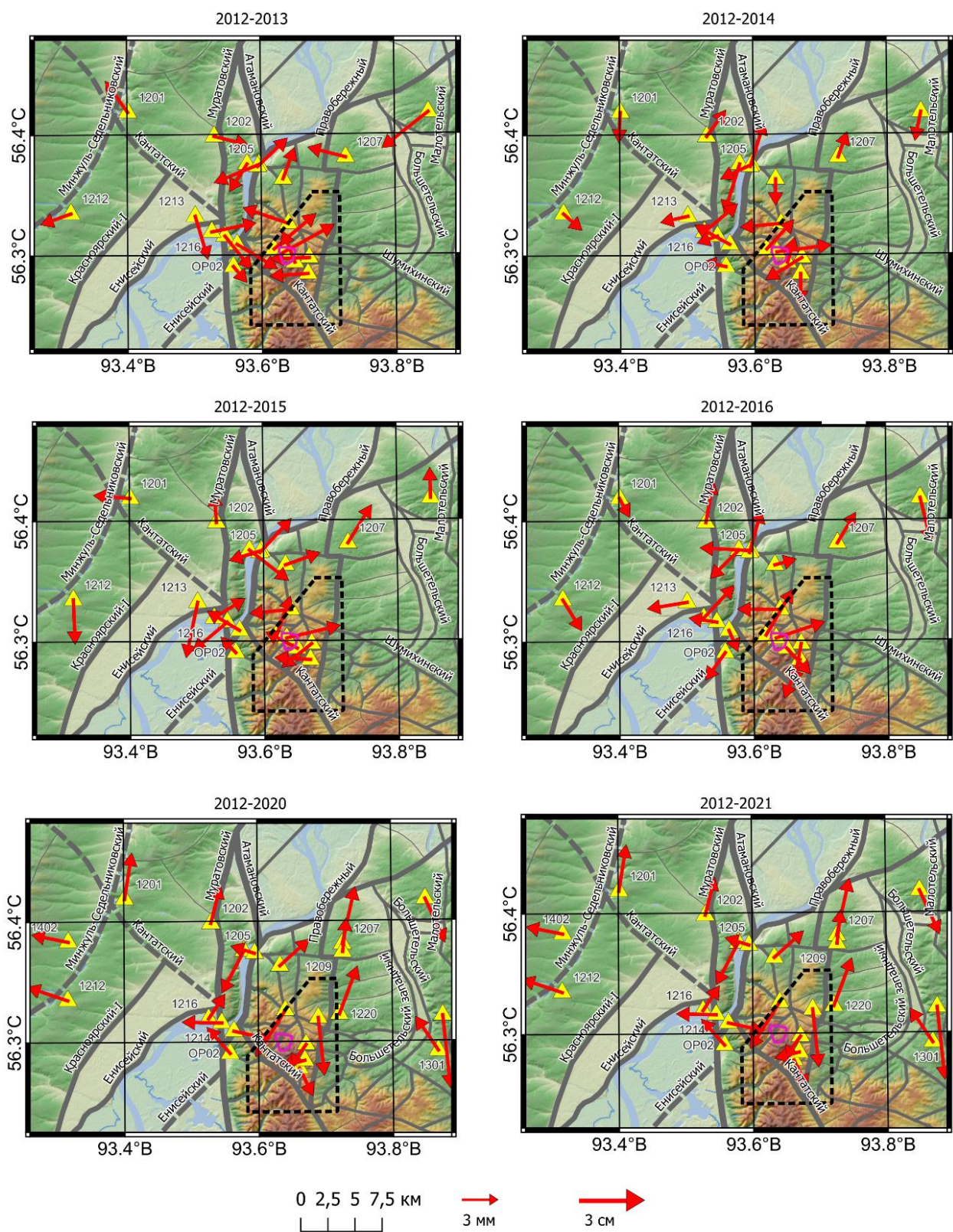


Рисунок 4.6 – Горизонтальные смещения ГНСС-пунктов по различным эпохам наблюдений с 2012-2021 гг. Серые линии – тектонические разломы. Желтые треугольники – ГНСС-пункты

Общий характер горизонтальных движений в 2012-2016 гг. повторяет 2012-2014 гг., что может свидетельствовать о переходе к периоду релаксаций напряжений. Тем не менее, на отдельных пунктах, расположенных в центральной части (1214, OP02, OP03, LP05. LP06), абсолютные значения смещений достигали 18 мм.

В период 2012-2020 гг., по сравнению с предыдущими эпохами, северная часть (пункты 1201, 1202, 1207, 1209) смещалась в направлении на север, а западная (пункты 1215, OP02, 1216, 1212, 1402) в восточном. Максимальное значение вектора смещений до 25 мм получены на пункте 1223 в блоке, который ограничен разломами Тельского Быка и Шумихинским. Движение в одну сторону наблюдалось для пунктов 1201 и 1202 в блоке, ограниченным Муратовским, Кантатским и Минжуй-Седельниковским разломами. Пункты 1219 и 1220, расположенные по разным крыльям Правобережного разлома имеют разнонаправленное движение. В 2012-2021 гг. ориентация векторов и тенденция к увеличению модуля движений в северном направлении, которые были отмечены в 2012-2020 гг., сохранялась.

Таким образом, анализ свидетельствует, что тенденция движений имеет циклический характер, когда меняются как направление, так и абсолютные значения смещений ГНСС-пунктов. За почти 10-летний период времени с 2012 по 2021 год модуль векторов субмеридиональной направленности для пунктов в северной и восточной частях достигал 30-35 мм. В тоже время, за счет цикличности движений средняя скорость смещений пунктов значительно меньше, чем скорость, получаемая чистым суммированием годовых величин. За все время наблюдений на геодинимическом полигоне Нижне-Канского массива было зафиксировано два цикла релаксации напряжений и смены знаков движений [Татаринов и др., 2018; Гвишиани и др., 2022].

4.3 Расчет параметров деформаций земной поверхности (компоненты тензора деформаций, главные деформации и оси их ориентаций, дилатация, деформация сдвига) для дальней зоны ПИЛ

На рисунке 4.7 приведены карты изменения главных деформаций по отдельным эпохам измерений. Видно, что участки с максимальными значениями деформаций растяжения находятся в северной и западной частях.

Первая зона (северная часть) приурочена к Атамановскому разлому. Для нее получена максимальная величина деформации растяжения (ε_p) $\varepsilon_p = 11,6 \times 10^{-6}$ и сжатия ($\varepsilon_{сж}$) $\varepsilon_{сж} = 10^{-7}$. Чуть меньшее $\varepsilon_p = 6,1 \times 10^{-6}$ отмечена возле Канско-Атамановского разлома. Однако, в северо-восточной части преобладает обстановка сжатия в непосредственной близости от Правобережного разлома $\varepsilon_{сж} = -10^{-7}$.

Вторая зона (западная часть) связана с Кантатским разломом, участок между пунктами 1202 и 1212. На северном крыле отмечено растяжение $\varepsilon_p = 5 \times 10^{-6}$. На противоположном крыле - субмеридиональное растяжение $\varepsilon_p = 8,6 \times 10^{-6}$ с незначительным сжатием по другой главной оси $\varepsilon_{сж} = -1,7 \times 10^{-6}$. На центральном участке наблюдается значительный разброс в ориентировке осей, не позволяющий с достоверностью говорить о каком-либо едином направлении.

В 2012-2014 гг. растяжение испытывала северная и юго-западная части территории. Максимальное значение ε_p достигают 8×10^{-6} . Эпоха 2012-2015 гг. полностью идентична эпохе 2012-2013 гг. В тоже время, она отличается от эпохи 2012-13 гг. меньшими значениями деформаций растяжения-сжатия вдоль главных осей, в частности в северной части полигона. Диапазон изменения $\varepsilon_{сж}$ изменяется от $-11,6 \times 10^{-6}$ до $-14,6 \times 10^{-6}$

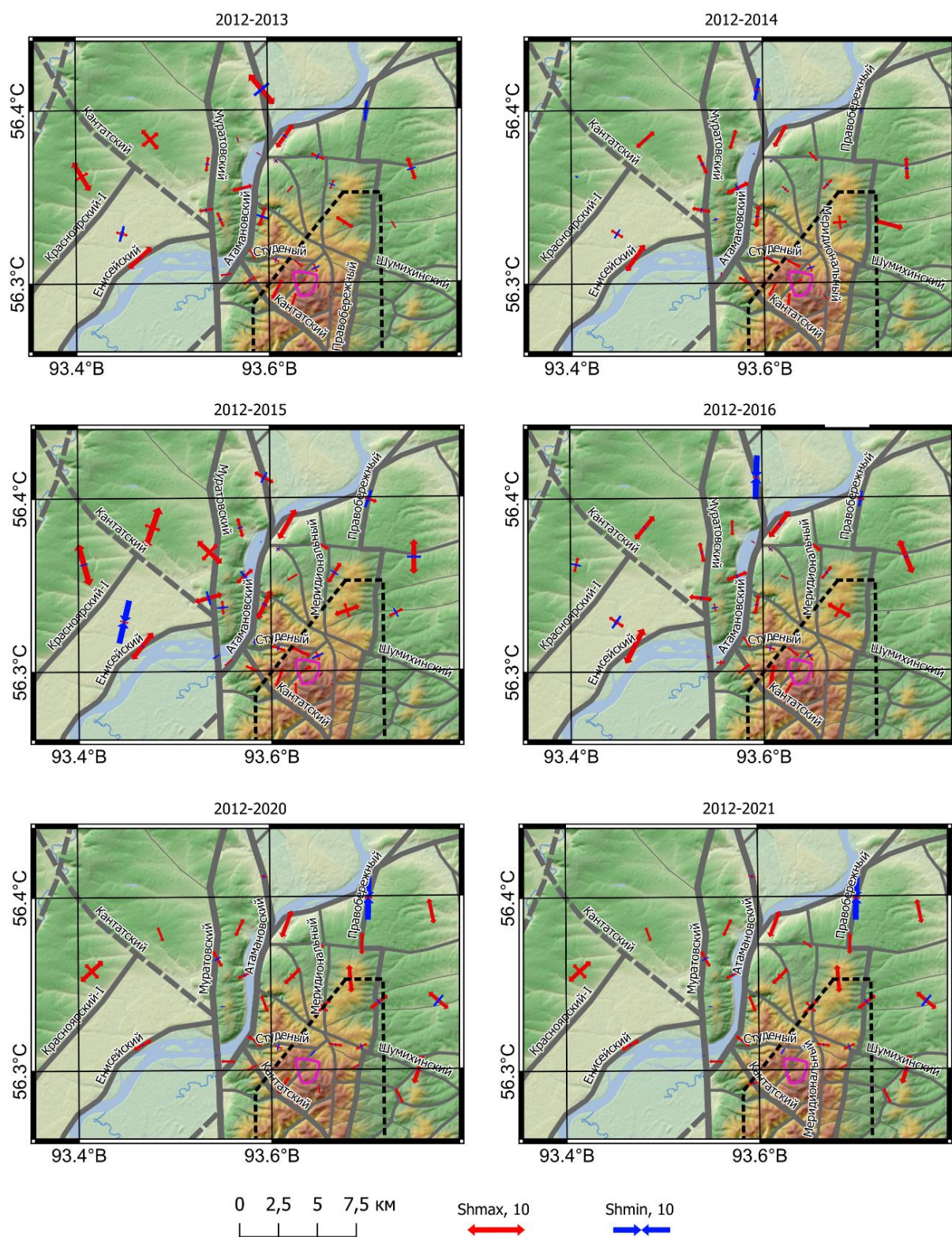


Рисунок 4.7 – Главные оси деформаций по результатам ГНСС-наблюдений 2012-2021 гг.

В 2012-2016 гг. характер деформаций соответствует эпохе 2012-2014 гг. Абсолютные значения остались на том же уровне.

В отличие от предыдущих эпох наблюдений в интервале 2012-2020 гг. обширная зона сжатия охватывает полосой всю северо-восточную и юго-восточную и западную части района, включая Западно-Сибирскую низменность, Красноярскую равнину, Итатаскую возвышенность. Все оси сжатия имеют субмеридиальную направленность и приурочены к Атамановскому, Правобережному и Большетельскому разломам. Эпоха 2012-2021 гг. повторяет эпоху 2012-2020 гг.

Таким образом, результаты анализа распределения главных деформаций позволяют проследить динамику из изменения на территории ГДП. Она 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.). Можно также предположить, что наиболее активно деформации проявляются в более узких зонах близ разломов и тектонических узлов.

Далее был выполнен такой же анализ развития деформационного процесса на территории Нижне-Канского геодинамического полигона по другим параметрам: по дилатации, которая характеризует уменьшение (Δ_-) или увеличение (Δ_+) площади земной поверхности и по деформации чистого сдвига (при чистом сдвиге прямоугольный элемент, выделенный в окрестности некоторой точки, испытывает только деформации сдвига, а удлинения его сторон отсутствует). Эти параметры более наглядно позволяют проследить характер деформирования по площади.

Деформации дилатации.

На рисунке 4.8 показана вычисленная модель динамики пространственно-временного изменения дилатации конечных элементов по эпохам наблюдений 2012-13, 2012-14, 2012-15, 2012-16, 2012-20, 2012-21 гг. Из рисунка видна главная особенность процесса – постоянство расположения основных аномальных зон дилатации, конечно, при некотором изменении

размеров и эффекта цикличности для некоторых зон. На рисунке 4.8 они обозначены римскими цифрами.

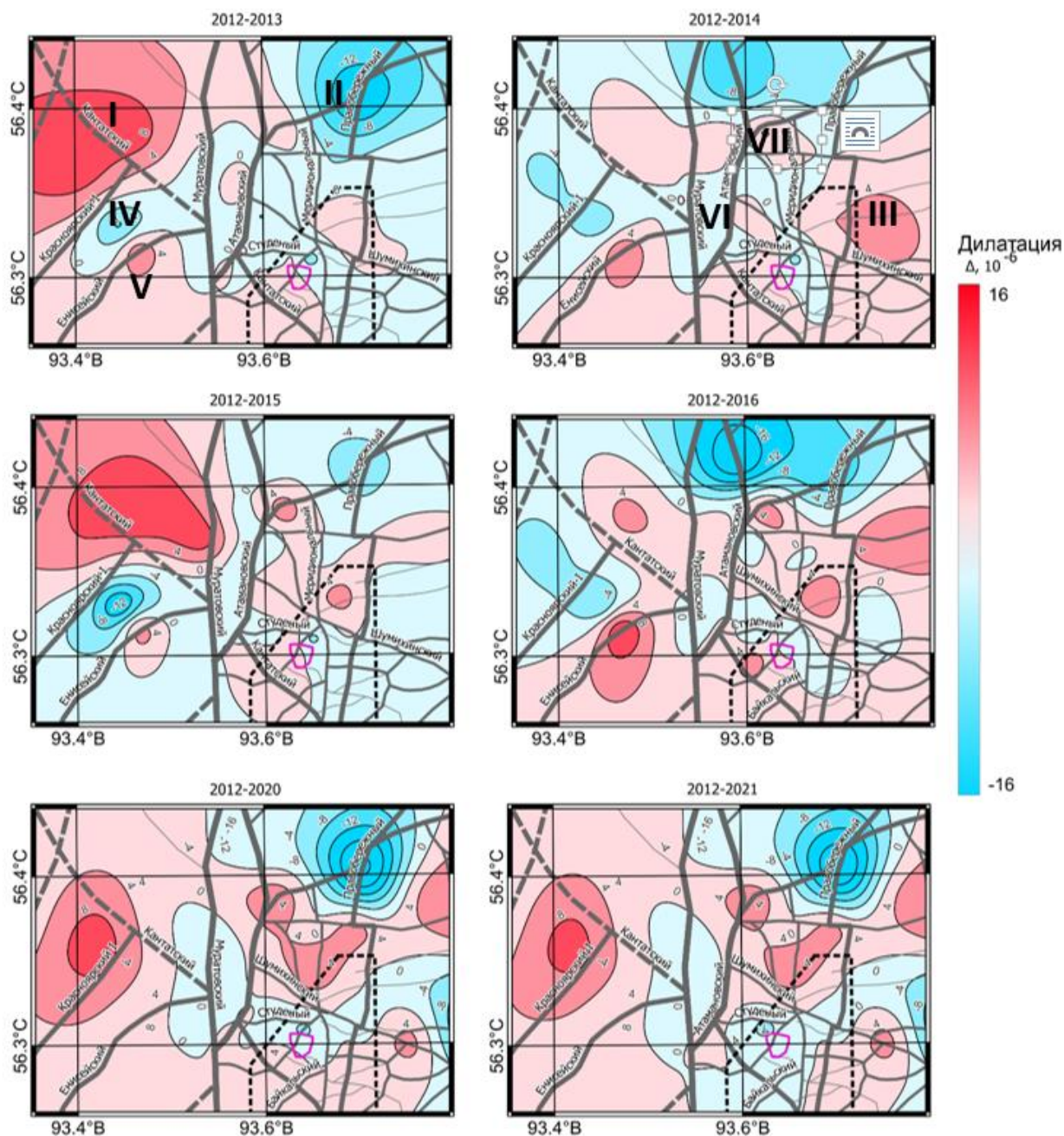


Рисунок 4.8 – Динамика изменения деформации дилатации на территории полигона в интервале 2012-2021 гг. [Гвишиани и др., 2022]

Вначале вся территория делится на две зоны – сжатия (восточная часть) и растяжения (западная часть) по разломам Муратовскому и Атамановскому. Значения дилатации составляют от $\Delta_- = -16 \times 10^{-6}$ до $\Delta_+ = +14 \times 10^{-6}$. В северо-северо-восточной части можно заметить обширную зону сжатия. Центр

находится в узле двух тектонических разломов Канско-Атамановский (Нижне-Канский) и Правобережного. Здесь получена максимальная величина сжатия $\Delta_+ = 12 \times 10^{-6}$. На противоположном берегу (северо-северо-западной части) видна обширная зона растяжения, приуроченная к Кантатскому и Минжульт-Седельниковскому и Красноярскому I разломам. Центр этой зоны относится сопряжению Кантатского и Красноярского I разломов.

В эпоху 2012-2014 максимальные значения Δ приурочены к Енисейскому и Правобережному разломам. Также процесс деформирования активно проявляется в районе тектонического узла Муратовского и Атамановского разломов в виде смены режима со сжатия до растяжения. По сравнению с предыдущей эпохой измерений, исчезла обширная зона растяжения, которые наблюдались в северо-западной части полигона, но в тоже время появилась новая на востоке. Максимальные величины дилатации не превышают по модулю 6×10^{-6} .

Эпоха 2012-2015 гг. повторяет эпоху 2012-2013 гг. В северо-западной части видна обширная зона растяжения, которая начала мигрировать к Муратовскому разлому. Однако, зона сжатия, которая располагалась в северо-северо-восточной части ГДП стала уменьшаться в размере.

В 2012-2016 гг. характер распределения дилатации с незначительными отличиями повторяет эпоху 2012-2014 гг. т.е. продолжительность цикла режима сжатия-растяжения составило приблизительно 2 года. В период с 2020 по 2021 годы наблюдалось изменение, однако тенденция осталась похожей на эпоху 2012-2013 гг. Зоны с отрицательными значениями дилатации практически не изменили своего положения, что указывает на их естественный характер. Природное происхождение зон указывает на то, что процессы, вызывающие отрицательную дилатацию, вероятно, имеют стабильный и долговременный характер. Таким образом, можно сделать два вывода:

1. Развитие процесса сжатия-растяжения земной поверхности в пределах Нижне-Канского массива происходит по циклическому закону, с периодом в 2-3 года.

2. Территория является в тектоническом отношении активной, хотя и в малой степени.

Деформации чистого сдвига.

На рисунке 4.9 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.

В 2012-2013 гг. в северной части отмечены обширные аномалии сдвига (красный цвет), приуроченные к узлу пересечения двух главных разломов - Муратовского и Атаманоского. Максимальные величины $2,2 \times 10^{-5}$. В северо-восточной, юго-западной и центральной части равны 10^{-5} . На всей остальной территории полигона сдвиговые деформации не превышают 2×10^{-6} .

В 2012-2014 гг. в северной части аномальная зона исчезла. Остальная часть полигона осталось без изменений 2×10^{-6} . В 2015 году наблюдался активный процесс сдвиговых деформаций в западной и восточной части полигона. Их величина достигала $1,4 \times 10^{-5}$.

В 2012-2016 гг. повторение 2012-2013 гг. Опять можно наблюдать зону максимальных сдвиговых деформаций в северной части полигона со значением $1,8 \times 10^{-5}$.

В эпоху 2012-2020 гг. зона максимальных сдвиговых деформаций эллипсоидальной формы, проявившаяся в эпохи 2012-2013 и 2012-15 в северной части полигона, начала мигрировать в восточном направлении. Максимальные величины в этой зоне составили $2,0 \times 10^{-5}$. Эпоха 2012-2021 гг. повторяет предыдущую эпоху (2012-2020 гг.).

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 на рисунке 4.9. Это говорит о сдвиговом характере движений по Правобережному разлому (левосторонний сдвиг).

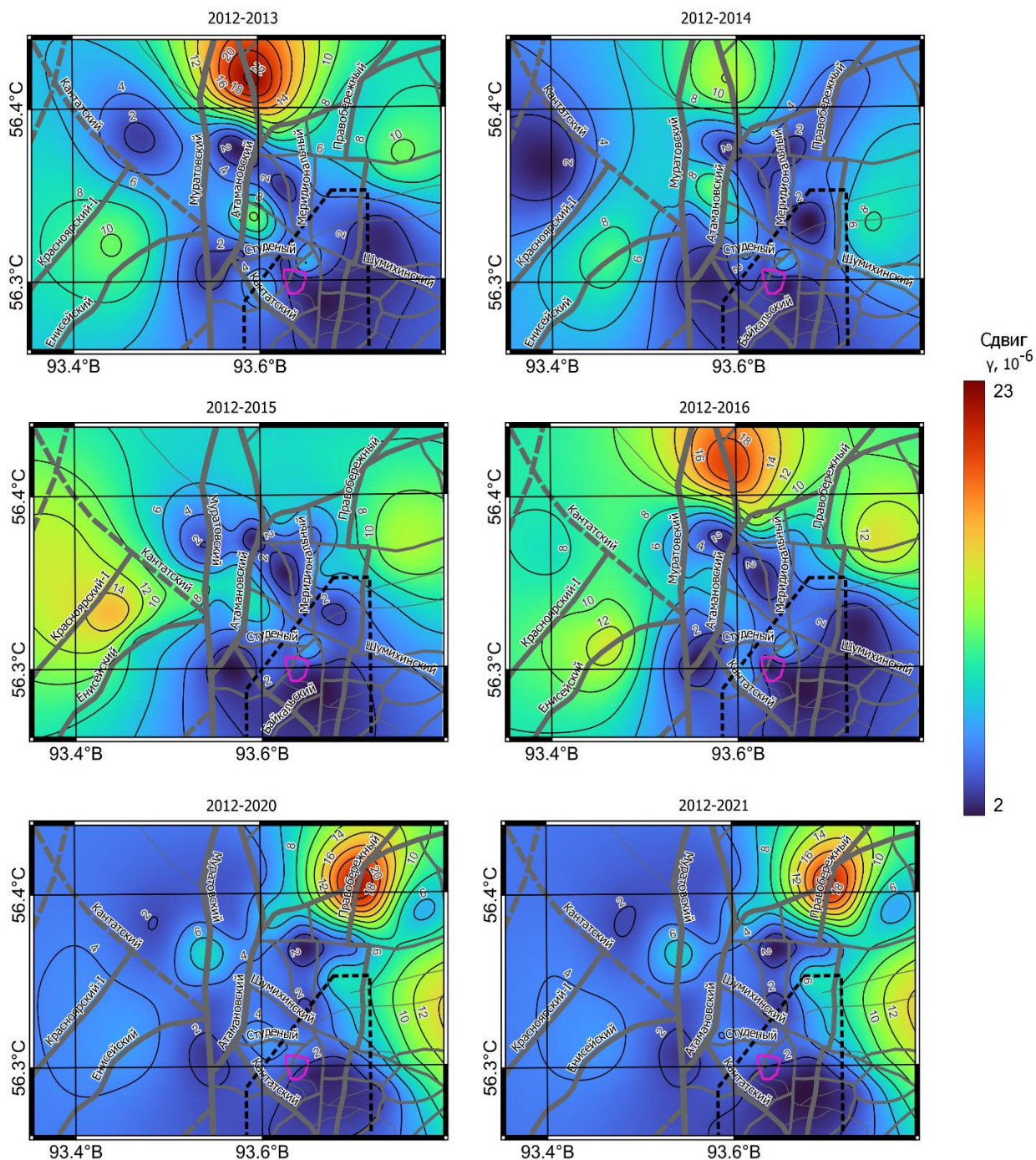


Рисунок 4.9 – Динамика распределения деформации сдвига на территории полигона в интервале 2012-2021 гг.

В тоже время, вся южная часть района по всем эпохам наблюдений имела близкие к «нулевым» значениям деформации сдвига, что связано

преимущественно с вертикальной направленностью движений. Это полностью совпадает с выводами геологов о преобладании отрицательных вертикальных движений в новейшее время в левобережной части р. Енисей. Сопоставление местоположения активных зон дилатации (рисунок 4.8) и формоизменения (рисунок 4.9) указывает на их хорошую согласованность с особенностями тектонического строения района.

В тоже время, вся южная часть района по всем эпохам наблюдений имеет близкие к «нулевым» значениям деформации сдвига, что связано преимущественно с вертикальной направленностью движений. Это полностью совпадает с выводами геологов о преобладании вертикальных движений в новейшее время в левобережной части р. Енисей. Сопоставление местоположения активных зон дилатации (рисунок 4.8) и формоизменения (рисунок 4.9) указывает на их хорошую согласованность с особенностями тектонического строения района.

Для пространственной оценки степени механического разуплотнения массива в пределах активных блочных структур используется анализ внутренних движений и деформаций земной коры на основе классической механики [Гвишиани и др., 2022]. Рассмотрим контрольную сеть ГНСС, состоящую из различных пунктов, как механическую систему. В соответствии с теоремой о движении центра масс, ускорение центра инерции системы не зависит от внутренних сил взаимодействия между материальными точками системы. Ускорение a для n материальных точек механической системы может быть выражено следующим образом:

$$\sum_i m_i \vec{a}_i = \sum_i \vec{F}_i + \sum_i \sum_k \vec{f}_{i,k}, \quad (3.26)$$

где m_i – масса материальной точки, $\vec{F}_i$ – вектор внешней силы, $\vec{f}_{i,k}$ – вектор силы внутреннего взаимодействия пары точек, i, j, k – текущие индексы точек.

Согласно теореме о движении центра масс, векторы внешних сил приложены к центру инерции механической системы. Общее движение системы в заданной системе отсчета определяется суммой внешних сил и не

зависит от внутренних сил взаимодействия между элементами механической системы. Важно отметить, согласно третьему закону Ньютона, сумма всех внутренних сил взаимодействия между материальными точками, второе слагаемое в формуле (3.26), равна нулю. Таким образом, сумма взаимных скоростей движения всех пар материальных точек системы также равна нулю.

Для оценки внутренних движений в пределах геодинамического полигона используется среднее значение всех векторов движений материальных точек, представленных пунктами ГНСС в заданной системе координат. Из этого значения вычитается вектор общего движения механической системы, обусловленного воздействием внешних сил. Предложенный параметр описывает характер внутренних движений в пределах территории геодинамического полигона. Предложенная характеристика 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 для сейсмоактивных районов в работе [Гвишиани и др., 2022].

С использованием данного подхода определена новая характеристика, которая позволяет 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.

Эта характеристика определяется формулой

$$\delta s = \sqrt{u_{nj}^2 + u_{ej}^2} \quad (3.27)$$

где δs – полная длина (модуль) вектора смещения во внутренней системе отсчета; u_{nj} , u_{ej} – вектора смещений соответственно на север и восток во внутренней системе отсчета

Динамика изменения величины δs за период с 2014 по 2021 гг. представлена на рисунке 4.10. Темным цветом обозначены менее подвижные участки земной поверхности, в то время как светлый цвет указывает на более подвижные участки.

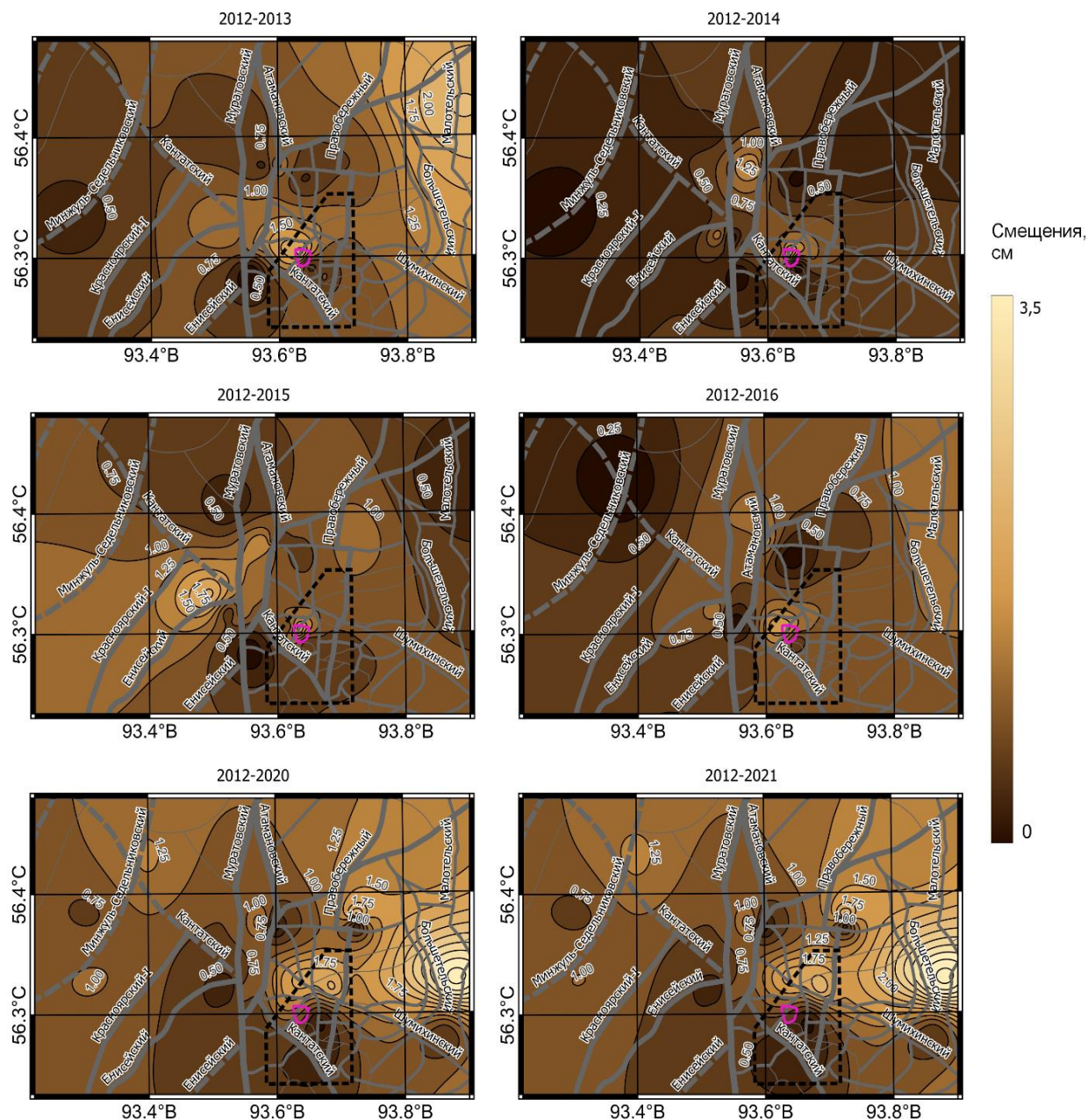


Рисунок 4.10 – Изменение во времени распределения параметра «Дефицит смещений» с 2014 по 2021. Серые линии – тектонические разломы [Гвишиани и др., 2022]

Большинство более подвижных участков находятся в зонах активных тектонических разломов, на которых происходит разгрузка накопленных

напряжений в виде тектонического крипа. Дефицит смещений также 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.

Полученные результаты исследования свидетельствуют о существовании взаимосвязи СДЗК с крупными тектоническими структурами в районе, такими как Приенисейский (Муратовский) разлом, Атамановский разлом, Большетельский разлом и Правобережный разлом, которые формируют иерархическую блочную структуру земной коры. Эти результаты соответствуют основным закономерностям распределения скоростей деформации в северной части Нижне-Канского массива. Важно отметить, что эти движения могли существовать на протяжении длительного времени, как минимум в плейстоцене и голоцене. Это можно объяснить наличием растягивающих напряжений в районе Атамановского разлома, который представляет собой часть Енисейского кряжа и подвергается вертикальным поднятиям, что проявляется в увеличении ширины верхней части разлома.

4.4 Пространственно-временной анализ динамики движений и деформаций в ближней зоне ПИЛ

Анализ полей деформаций, подобный сделанному в предыдущем разделе 4.3, был сделан отдельно для участка «Енисейский» на котором расположена площадка ПИЛ, имеющего приблизительные размеры 3х4 км (ближняя зона).

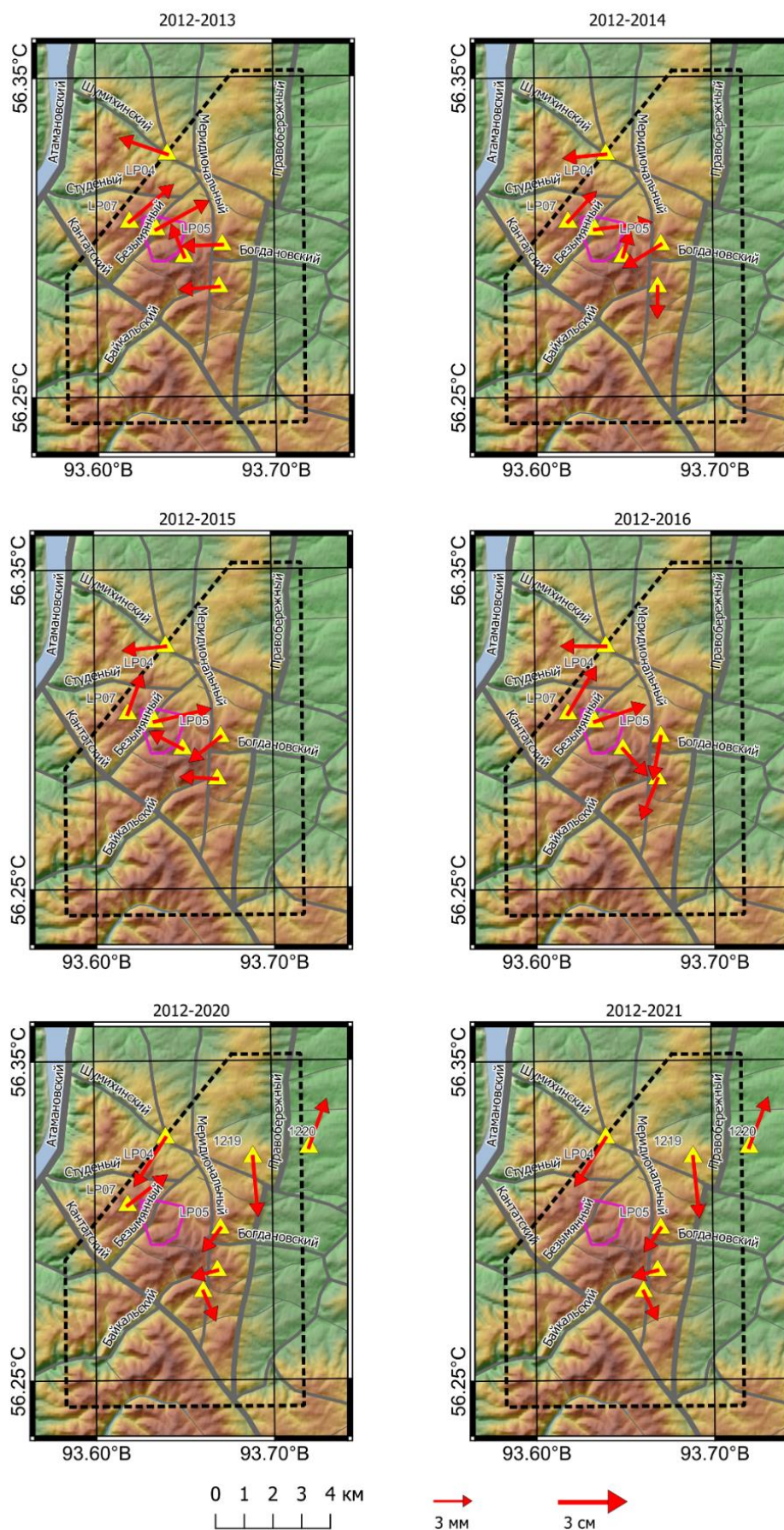


Рисунок 4.11 – Векторы плановых смещений пунктов ГНСС по эпохам измерений с 2012-2021 гг. в ближней зоне ПИЛ

В первую эпоху (2012-2013 гг.) характер смещений пунктов ГНСС разделились на два кластера (рисунок 4.11). Первый имеет субширотную направленность (пункты LP04, LP05 и LP06). Все вектора смещений этого кластера ориентированы в западном направлении. Максимальные значения смещений в этом кластере доходят до 13 мм, и приурочены к мелким тектоническим разломам в границах участка, а именно: пункт LP04 находится на пересечении Шумихинского и Разлома №3. Пункты LP05 и LP06 стоят на разных крыльях Богдановского и Меридиональному разломов. Второй кластер состоит из пунктов LP07, LP08 и LP09, вектора движений которых имеют субмеридеальную направленность. Максимальные значения смещений доходят до 18 мм.

В эпоху 2012-2014 гг. почти все пункты геодинамической сети изменили свое направление и абсолютные значения смещений. Это, вероятно, связано с циклом региональных тектонических движений, отмеченным в предыдущем разделе. В частности, пункт LP06 поменял свою направленность с субширотного на субмеридиальное и стал смещаться строго на юг. Смещение пункта LP07 не изменило направление, но уменьшилась его величина на 10 мм.

В период 2012-2015 гг. абсолютные значения смещений стали такими же, что и в эпоху 2012-13 и достигли величину до 20 мм. Направления также повторяют первоначальную эпоху.

В 2012-2020 гг. и 2012-2021 гг. по сравнению с четырьмя предыдущими эпохами, почти все векторы имеют субмеридеальную направленность. Длина векторов увеличились на несколько миллиметров, при этом максимальном значении 23 мм.

На рисунке 4.12 приведены оси главных деформаций. Зоны максимального растяжения располагаются в северной и центральной частях участка «Енисейский».

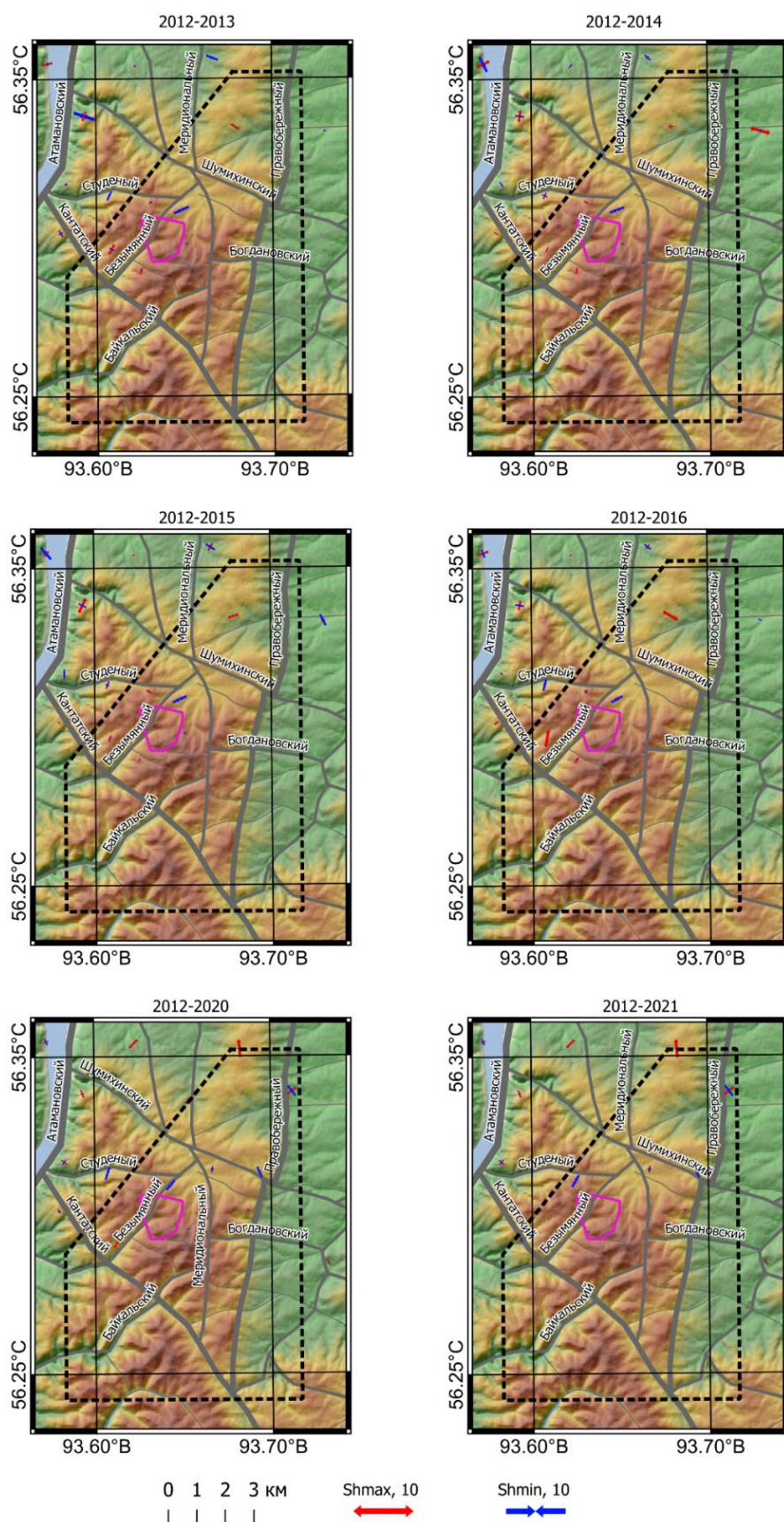


Рисунок 4.12 – Оси главных деформаций по результатам ГНСС-наблюдений с 2012- 2021 гг. в ближней зоне ПИЛ

Первая (северная часть) приурочена к Шумихинскому и Меридиальному разломам. Максимальная величина растяжения составляет $\varepsilon_p = 3,6 \times 10^{-6}$, Чуть меньшую величину $\varepsilon_p = 3,1 \times 10^{-6}$ наблюдаем вблизи Кантатсокого и Безымянного разломов. Зона растяжения была зафиксирована на противоположном берегу Безымянного разлома. Максимальная величина сжатия $\varepsilon_{сж} = 5,1 \times 10^{-6}$. Остальные части участка характеризуются незначительными величинами сжатия.

В 2012-2014 гг. растяжение испытывала северная и юго-западная части участка «Енисейский». Максимальное значение растяжения $1,7 \times 10^{-6}$. Вместе с тем, в центральной части получено максимальное сжатие, равное $4,8 \times 10^{-6}$. Остальные площади зон сжатия вдоль оси минимальных деформаций в этой эпохе по сравнению с предыдущей остались в том же диапазоне. Ориентация осей главных деформаций в эпоху 2012-2015 гг. полностью идентична эпохе 2012-2013 гг.

Ориентация главных осей деформации участка «Енисейский» в интервале 2012-2016 гг. повторяет эпоху 2012-2014 гг. В интервале 2012-2020 гг. доминирующей является отрицательная по знаку деформация вдоль оси минимального деформирования, т.е. преобладает сжатие. Обширная зона сжатия охватывает полосу северную часть участка. Значения находятся в диапазоне от $-4,8$ до $-1,2 \times 10^{-6}$.

Рассмотрим теперь деформации дилатации и чистого сдвига на участке «Енисейский». Относительное изменение площади конечных элементов по эпохам 2012-2013, 2012-2014, 2012-2015, 2012-2016, 2012-2020, 2012-2021 гг. представлено на рисунках 4.13-4.14.

Весь участок практически поделен на зону сжатия (центральная часть) и зону растяжения (северная и юго-восточной части). Значения величины дилатации не превышают значений -4×10^{-6} до $+2 \times 10^{-6}$. В северной части имеется обширная зона растяжений. Эта зона непосредственно выходит за пределы участка и накладывается на Правобережный, Меридиальный и Шумихинский разломы. Растяжения равны 2×10^{-6} . На пересечении двух разломов

(Безымянного и Студёного) зафиксирована максимальная величина сжатия - 4×10^{-6} .

В 2012-2014 гг. максимальные значения наблюдались в районе сопряжения Шумихинского и Правобережного разломов. По сравнению с предыдущей эпохой преобладают деформации растяжения на всем участке «Енисейский». Эпоха 2012-2015 гг. повторяет эпоху 2012-2013 гг. В 2012-2020 гг. и 2012-2021 гг. повторяется эпоха 2012-2013 гг. с незначительным отличием, что в южной части участка появилась зона сжатия 2×10^{-6} .

На рисунке 4.14 показана динамика деформации полного сдвига по эпохам наблюдений 2012-13, 2012-14, 2012-15, 2012-16, 2012-20, 2012-21 гг. в ближней зоне ПИЛ. Зона с максимальной величиной сдвиговых деформаций была зафиксирована в северо-восточной части участка «Енисейский». В этой зоне она составила 6×10^{-6} . На всей остальной территории участка максимальный сдвиг не превышает 2×10^{-6} .

На рисунке 4.15 отчётливо видно, как с течением времени зона дефицита смещений, так и зона максимальных смещений расширяются, находясь в непосредственной близости от площадки строительства подземной исследовательской лаборатории. В частности, в период 2020-2021 годами были зарегистрированы наиболее выраженные зоны дефицита смещений непосредственно около площадки ПИЛ.

В предложенной модели современные движения земной коры обладают циклическим характером в пространстве и времени, и их источниками считаются глубинные геодинамические процессы, происходящие при кинематическом взаимодействии блоков в зоне акрекции между Западно-Сибирской плитой и Сибирской платформой. Анализ миграции зон "дефицита смещений" в сравнении с структурой блоков позволяет формулировать гипотезы относительно глубинных механизмов, ответственных за наблюдаемые геодинамические явления в этом районе, а также оценивать вероятность нарушения изоляционных характеристик массива.

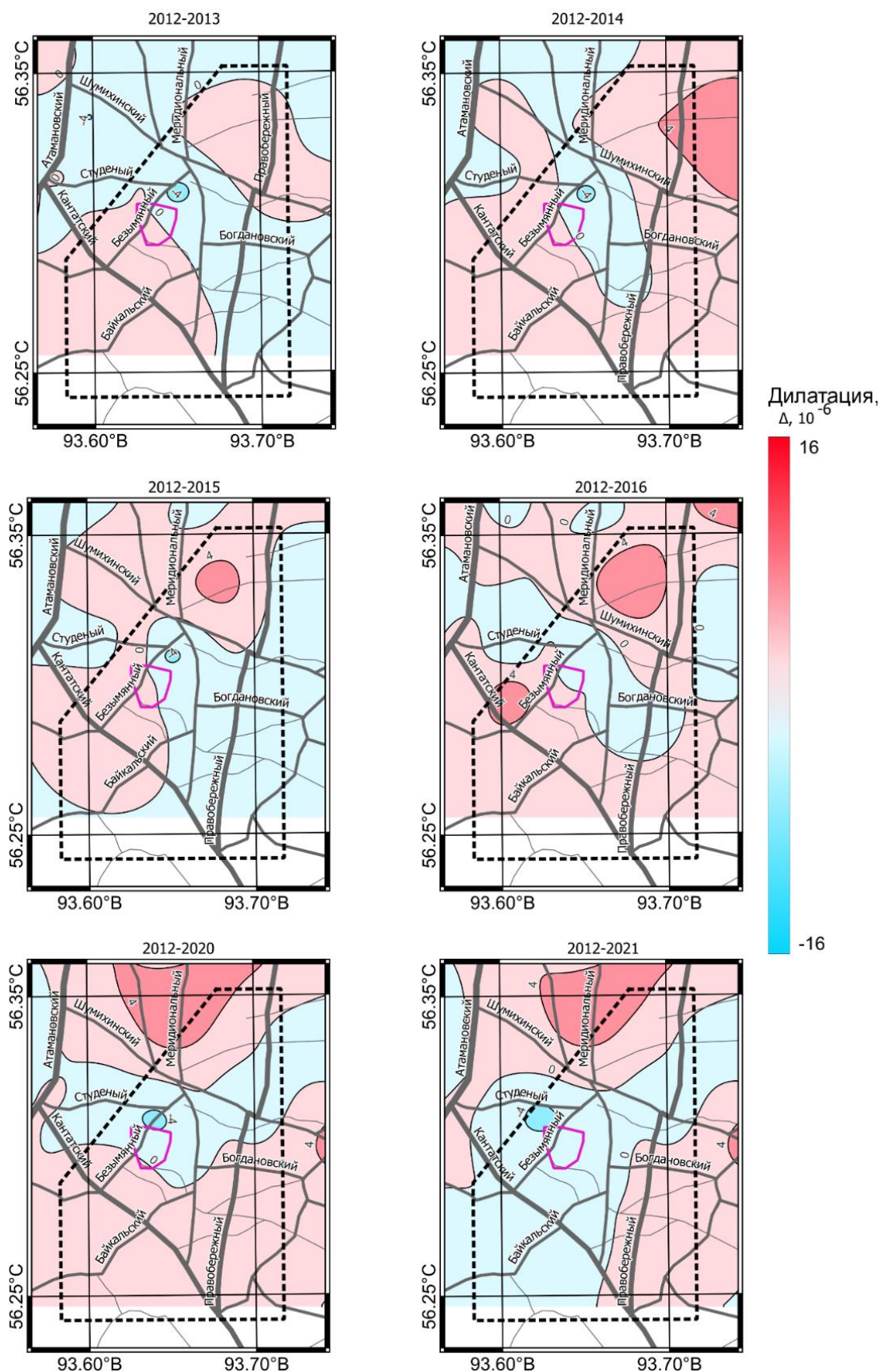


Рисунок 4.13 – Динамика дилатации в 2012-2021 гг. в ближней зоне ПИЛ

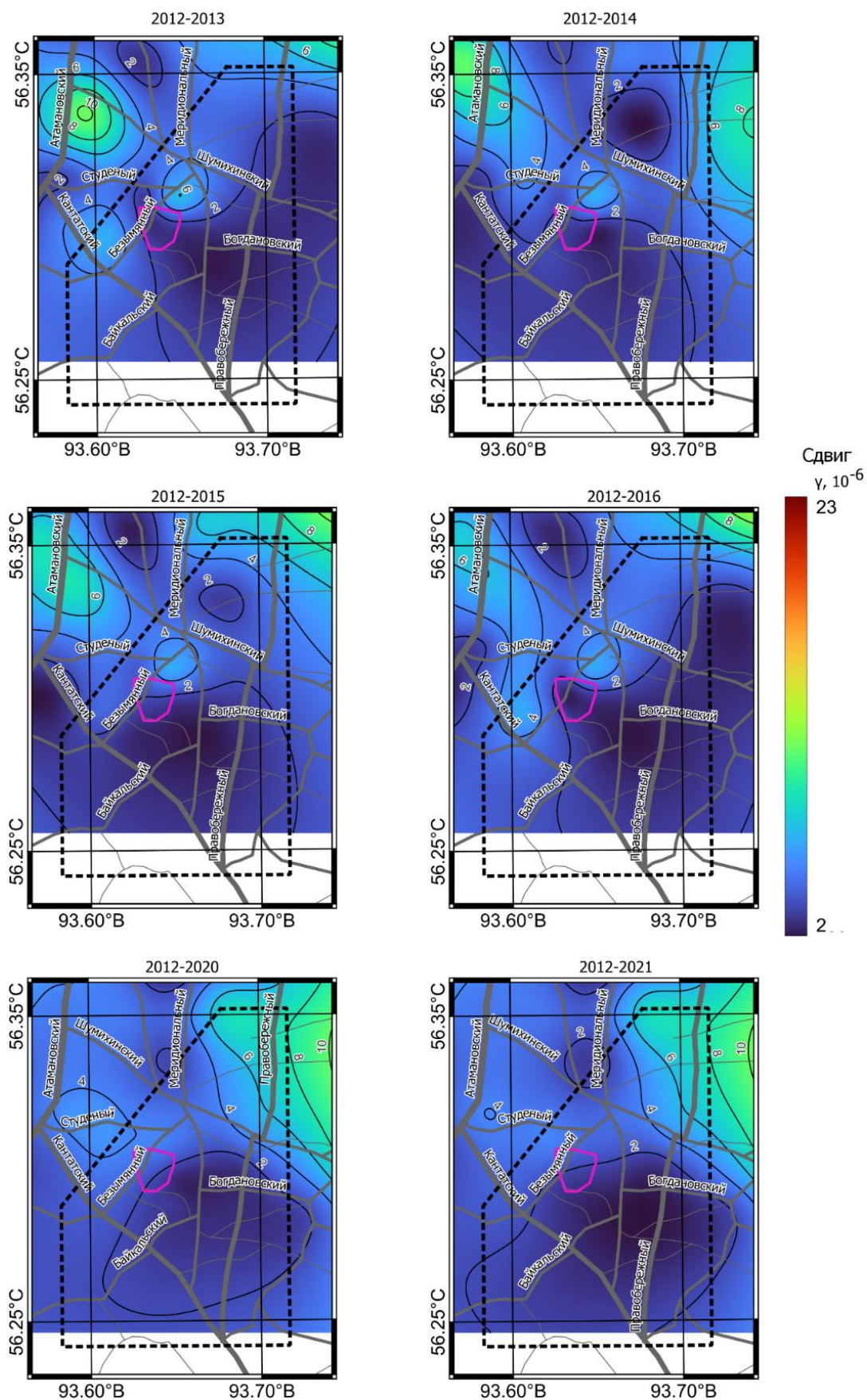


Рисунок 4.14 – Динамика изменения величин сдвиговых деформаций ближней зоне ПИЛ

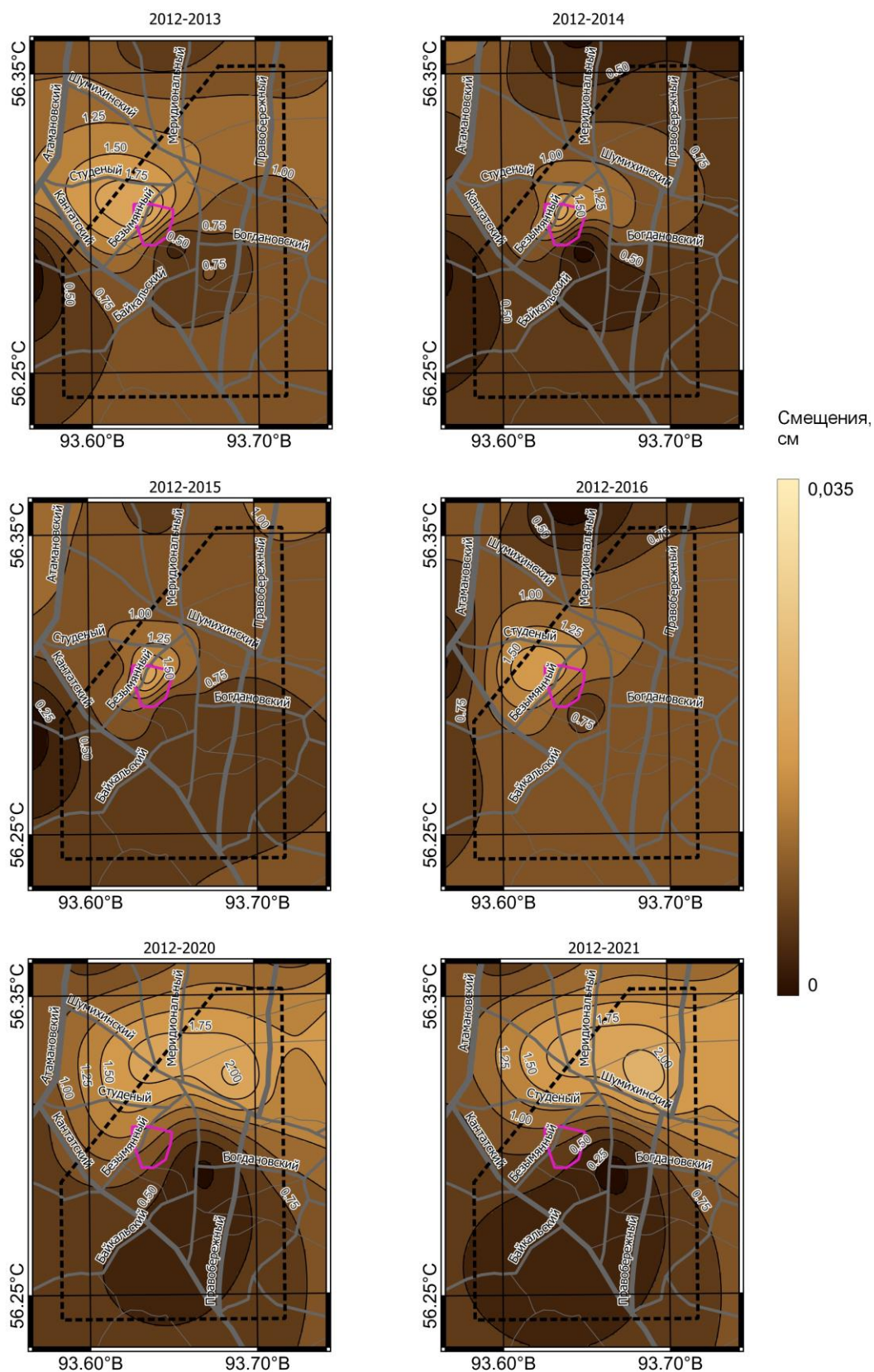


Рисунок 4.15 – Динамика распределения величины дефицита смещений δs в ближней зоне ПИЛ

4.5 Выводы по главе 4

Таким образом, анализ карт распределения величин смещений и различных расчетных параметров деформаций по площади района строительства ПИЛ и, особенно, динамики их изменения во времени позволяют сделать следующие выводы.

1. Характер плановых смещений ГНСС-пунктов за 2012-2021 гг. подтверждает нелинейный – квазициклический характер геодинамического режима. Зафиксировано два цикла смены направлений движений (время цикла около 2-3 лет). Более показателен анализ полей параметров деформаций во времени. Отдельные ГНСС-пункты имеют устойчивый тренд смещений в одном направлении для всех эпох наблюдений, например, пункты 1205 и 1206. Однако, большинство пунктов меняют азимуты в широком диапазоне. Создается мозаичная картина, разнонаправленных движений отдельных структурных блоков.

2. Анализ деформаций, как инвариантной характеристики, позволил получить более устойчивую картину. Из приведенных на рисунке 4.7 осей главных деформаций сжатия и растяжения видно, что азимут из колебаний лежит уже в существенно меньшем диапазоне. Практически для всей площади преобладают деформации растяжения. Наибольшие значения деформации дилатации с устойчивым трендом за весь период наблюдений зафиксированы в северной части – в зонах динамического влияния Муратовского и Атамановских разломов, а также в зоне сочленения Правобережного и Канско-Атамановских разломов. Показанная на рисунке 4.8 динамика изменения аномальных зон дилатации сжатия и растяжения также носит псевдоциклический характер. Однако местоположение наиболее крупных аномальных зон практически не меняет своего положения (римские цифры на рисунке 4.8), колеблются лишь абсолютные значения деформаций. Это является своего рода подтверждением их тектонического происхождения, а не ошибками измерений или обработки. В окрестностях Первого Красноярского

разлома происходит постепенное накопление деформаций дилатации (на рисунке 4.8 аномалия синего цвета в северной части). Распределение деформаций сдвига на рисунке 4.9 показало, что чисто сдвиговый характер деформации имеют в северной части Атамановского и Правобережного разломов.

На тех участках, где отмечается тренд накопления деформаций в длительной перспективе, они могут достигнуть критических для данного типа пород значений (приблизительно 3×10^{-3}). В тоже время, за счет циклического характера, общая интегральная величина деформаций за счет временного масштабного эффекта будет существенно меньше. Однако, необходимо подчеркнуть, что при большом количестве циклов «разгрузка-нагрузка» (т.к. планируемое время эксплуатации объекта превышает 10 тыс. лет) изоляционные свойства породного массива могут существенно снизиться.

3. Более детальный анализ деформаций на территории участка «Енисейский» показал, что в его северной части преобладают деформации субмеридионального сжатия, а в южной небольшого относительного растяжения. Граница приблизительно проходит по Безымянному разлому. Более точно установить ее не удалось, ввиду разрежённости сети наблюдений. Деформации дилатации и сдвига по абсолютной величине существенно меньше максимально полученных для данного района (рисунок 4.13). При этом, за период наблюдений с 2012 по 2021 гг. отмечается миграция нулевой изолинии дилатации (изолиния режима «сжатие-растяжение») в 2013, 2014, 2015, 2016 гг., а в период 2020-2021 гг. на территории площадки ПИЛ формируется зона относительного сжатия.

Зона растяжения к северу от строительной площадки непрерывно мигрирует от Правобережного разлома до Меридионального, и можно предложить, что релаксация напряжений в виде деформационного процесса продолжается вплоть до Атамановского разлома. Для территории площадки ПИЛ характерны околонулевые сдвиговые деформации во всех эпохах

наблюдений, что соответственно говорит об отсутствии наиболее опасных для подземных сооружений деформаций формоизменения (сдвига).

При планировании геомеханических наблюдений в ПИЛ на глубине 500 метров наибольшее внимание необходимо уделить зонам контакта Безымянного разлома, контактирующего с зоной будущих горных выработок ПГЗРО.

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 геодинамических исследований на локальных геодинамических полигонах и нормативно-методических документов, регламентирующих обращение с РАО, показал, что для обеспечения требуемой точности оценки скоростей деформаций верхней части земной коры, необходим новая методика проведения высокоточных геодезических наблюдений средствами ГНСС и деформационного анализа, учитывающая уникальные особенности объекта.

2. Разработаны теоретические положения расчетов и моделирования полей деформаций по ГНСС-данным, полученным на Нижне-Канском геодинамическом полигоне, характеризующих деформации дилатации и чистого сдвига верхней части земной коры, а также динамику их изменения во времени. Для получения однородного набора деформационных характеристик предложены два решения: интерполяция значений смещений в узлы регулярной сетки, сформированной равновеликими треугольниками и пространственное 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 можно обеспечить точность определения координат марок пунктов в плане на уровне 1- 1.5 мм, а по высоте – 2 мм. Результаты опробования

методики в полевых условиях позволили выявить участки с повышенными значениями скоростей деформаций растяжения и сжатия, достигающих 1×10^{-5} в год.

4. Разработаны конструкции и технологии закладки скального геодезического центра, 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 сдвигения в районе зоны контакта Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформой характеризуются циклическим развитием во времени, связанным с кинематическим взаимодействием тектонических блоков. Для выявления возможных зон потери изоляционных свойств пород использовать параметр "дефицит смещений", позволяющий объяснять глубинные механизмы наблюдаемых геодинимических явлений в регионе.

8. Полученные результаты показали взаимосвязь скоростей деформаций земной коры с местоположением крупных тектонических структур, включая Приенисейский (Муратовский), Атамановский, Большетельский и Правобережный разломы. Исследована динамика развития дилатации и сдвиговых деформаций в ближней зоне ПИЛ и в зонах указанных разломов 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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Акматов Д.Ж., Николайчук В.В., Тихонов А.А., Шевчук Р.В. Радарная интерферометрия как дополнение к классическим методам наблюдений за сдвижением земной поверхности. Горная промышленность. 2020;(1):144–147. DOI 10.30686/1609-9192-2020-1-144-147.
2. 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.
3. Андерсон Е.Б., Белов С.В., Камнев Е.Н., Колесников И.Ю., Лобанов Н.Ф., Морозов В.Н., Татаринов В.Н. Подземная изоляция радиоактивных отходов. М.: Издательство «Горная книга», 2011. 592 с.
4. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: монография: в 2 т. — М. Картгеоцентр, 2005. — Т. 1.
5. Бернд Х. Разработка и исследование автоматизированной системы геодезического деформационного мониторинга инженерных сооружений на основе высокоточной цифровой инклинометрией и техеометрии: Дисс. канд. техн. наук. – М.: МИИГАиК, 2017. 144 с.
6. Галаганов О.Н., Гусева Т.В., Крупенникова И.С. Сопоставление данных ГЛОНАСС и GPS-измерений способом дифференциального позиционирования в режиме статика при решении геодинамических задач // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12. – № 4. – С. 28–37.
7. Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р. Исследование систем действительных функций на двумерных сетках с использованием нечетких множеств // Чебышевский сборник. Том 20, № 1. 2019а. С. 94–111. DOI: <https://doi.org/10.22405/2226-8383-2019-20-1>.
8. 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 rocksdisplacements // Doklady Earth Sciences. 2022. Vol. 507. №1. pp. 67-74. DOI: 10.1134/S1028334X22600608
9. Герасименко М.Д., Шестаков Н.В., Коломиец А.Г. Определение движений и деформаций земной коры по геодезическим измерениям. Учебное пособие. Владивосток, Издательство Дальневосточного федерального университета. 2017, 39 с.
 10. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. Из-во Наука. М. 1975. 536 с.
 11. Гусева Т.В., Мишин А.В., Сковородкин Ю.П. Современные горизонтальные движения на разных масштабных уровнях. Физика Земли. 1996. №12, с. 86-91.
 12. Докукин П.А., Кафтан В.И., Красноперов Р.И. Влияние формы треугольников в геодезической сети на результаты определения деформаций земной поверхности // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2010. № 5. С. 6-11.
 13. Дубров М.Н., Алешин В.А. Высокоточные лазерные интерферометры в многокомпонентных измерительных системах // Журнал радиоэлектроники. 2000. № 10. с. 7-13.
 14. Есиков Н.П. Современные движения земной поверхности с позиции теории деформации. – Новосибирск: Наука, СО РАН. 1991. 226 с.
 15. Зубович А.В., Бейсенбаев Р.Т., Ван С., Джан Ю., Кузиков С.И., Мосиенко О.И., Нусипов Е.Н., Щелочков Г.Г., Щерба Ю.Г. Современная кинематика Тарим-Тянь-Шань-алтайского региона центральной Азии (по данным GPS измерений) // Физика Земли. 2004. № 9. С. 31-40.
 16. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов, ГКИНП (ГНТА)-03-010-03. Москва, ЦНИИГАиК, 2003 г., Согласно СП 11-104-97, СП 22.13330.2016 и др. предельно допустимые (за весь срок службы сооружений) деформации в основании объектов строительства не должны превышать.

- 17.Каленицкий А. И., Ким Э. Л., Середович В. А. К вопросу создания геодинамических полигонов на месторождениях нефти и газа // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2014 № (2—1). С. 207-213.
- 18.Кафтан В.И., Докукин П.А. Геодезические спутниковые измерения, обработка и деформационный анализ. Учебное пособие / Утверждено РИС Ученого совета Российского университета дружбы народов. Москва, 2017. 272 с.
- 19.Кафтан В. И., Сидоров В. А., Устинов А. В. Сравнительный анализ точности локального мониторинга движений и деформаций земной поверхности с использованием глобальных навигационных спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС // Вулканология и сейсмология. – 2017. – № 3. – С. 50–58. DOI: 10.7868/S020303061703004X.
- 20.Кафтан В.И., Мельников А.Ю. Выявление деформационных аномалий по данным ГНСС наблюдений в связи с подготовкой и разрядкой крупных землетрясений // Физика Земли. 2018. № 1. С. 26-36. DOI: 10.7868/S0002333718010027.
- 21.Кафтан В.И., Гвишиани А.Д., Морозов В.Н., Татаринов В.Н. Методика и результаты определения движений и деформаций земной коры по данным ГНСС на Нижне-Канском геодинамическом полигоне в районе захоронения радиоактивных отходов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. с. 83-94. DOI: DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-83-94. 11.
- 22.Кафтан В. И., Татаринов В. Н., Маневич А. И., Прусаков А. Н., Кафтан А. В. Оценка точности ГНСС-наблюдений на эталонном базисе как средство проверки измерительной аппаратуры локального геодинамического мониторинга // Геодезия и картография. – 2020. – Т. 81. – № 7. – С. 37–46. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-961-7-37-46.
- 23.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).
24. Кафтан В.И., Татаринов В.Н., Шевчук Р.В., Маневич А.И., Кафтан А.В. Экспериментальное исследование методики полевой оценки точности измерений ГНСС // *Геодезия и картография*. 2023. № 10. С. 12–21. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-1000-10-12-21.
25. 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.
26. Кочарян Г.Г. Разломная зона как нелинейная механическая система // *Физическая мезомеханика*. 2010, т. 13, Спецвыпуск. С. 5-17.
27. Красноперов Р.И. Анализ сейсмотектонических движений земной коры по данным наблюдений глобальных навигационных спутниковых систем: Дисс. физ.-мат. наук. – М.: ГЦ РАН, 2012. 150 с.
28. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании. – М.: Агентство Экономических Новостей, 1999. – 220 с.
29. Кузьмин Ю.О. Современная аномальная геодинамика асейсмичных разломных зон. // *Вестник Отделения наук о Земле РАН*. 2002. № 1(20).
30. Кузьмин Ю.О., Жуков В.С. Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород. М.: Изд-во «Горная книга». 2012. № 5. 264 с.
31. Кузьмин Ю. О. Актуальные проблемы идентификации результатов наблюдений в современной геодинамике // *Физика Земли*. – 2014. – № 5. – С. 51–64.
32. Кузьмин Ю.О., Фаттахов Е.А. Тензометрический анализ деформаций земной поверхности по результатам длительных светодальномерных наблюдений на Камчатке // *Путь науки*. 2016. Т. 2. № 5 (27). с. 75-78.

33. Кузьмин Ю.О. Идентификация результатов повторных геодезических наблюдений при оценке геодинамической опасности объектов недропользования Вестник СГУГиТ. 2018. Т. 23. № 4.
34. Кучай В.К., Захаров В.К. Геодезическая основа для изучения современной динамики Земли // Геология и Геофизика. 1984. №5. с. 17–24.
35. Лобанов Н. Ф., Бейгул В. П., Лопатин П. В., Озерский А. Ю. Выбор расположения и обоснование пригодности участка для создания подземной исследовательской лаборатории на Нижнеканском массиве горных пород // Горный журнал 2015 № 10 С 59—64.
36. Мазуров Б. Т., Дорогова И. Е. Геодинамика и геодезические методы ее изучения: учеб. пособие. – Новосибирск: СГГА, 2014. – 174 с.
37. Мазуров Б.Т., Панжин А.А., Силаева А.А. Структурное моделирование полученных по геодезическим данным сдвижений путем визуализации // Геодезия и картография. 2016. № 3. с. 35–40.
38. Мазуров Б.Т., Кафтан В.И. Обзор развития геодинамики и геодезических методов решения геодинамических задач // Геодезия и картография. – 2020. – № 2. – С. 25-39. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-956-2-25-39.
39. Мальнева И.В. Природные катастрофы, связанные с опасными геологическими процессами, и их прогнозирование // Жизнь Земли. 2017 39(1) с. 12–25.
40. Маневич А.И. Анализ и мониторинг скоростей деформаций земной поверхности локальных геодинамических полигонов с учетом масштабного эффекта // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. №6-1. с. 194–203. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-61-0-194-203.
41. 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
42. 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.
43. Маневич А.И., Шевчук Р.В., Кафтан В.И., Лосев И.В., Урманов Д.И., Шакиров А.И. Программа для расчета компонент деформаций по данным геодезических наблюдений PyGeoStrain 1.0 // Zenodo. 2023. <https://doi.org>.
44. 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.
45. Мельников А.Ю. Разработка методики анализа деформационного процесса в сейсмоактивных регионах по данным спутниковых высокоточных координатных определений: Дисс. техн. наук. – М.: РУДН, 2012. 150 с. 92, 93.
46. Милюков В.К., Кравчук В.К. Наблюдения спектра деформаций земли лазерным интерферометром-деформографом // Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 1996. №2. 73 – 78
47. Милюков В.К. Мониторинг состояния магматических структур вулкана Эльбрус по наблюдениям литосферных деформаций // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. с. 3-15.
48. Милюков В.К., Копаев А.В., Лагуткина А.В., Миронов А.П., Мясников А.В. Наблюдения приливных деформаций земной коры в Приэльбрусье // Физика Земли. 2007. № 11. с.21-29.

49. Милюков В.К., Дробышев В.Н., Торчинов Х.М.З., Хубаев Х.М. Изучение геодинамики горной Осетии в 2009-2011 гг. // Вестник Владикавказского научного центра. 2011. Т. 11. № 4. С. 49-53.
50. Милюков В.К., Кравчук В.К., Миронов А.П., Латынина Л.А. Деформационные процессы в литосфере, связанные с неравномерностью вращения Земли // Физика Земли. 2011. № 3. с. 96-109.
51. Милюков В.К., Дробышев В.Н., Миронов А.П., Стеблов Г.М., Хубаев Х.М. Осетинская геодезическая спутниковая сеть: создание и первые результаты геодинамического мониторинга // Вестник Владикавказского научного центра. 2014. Т. 14. № 4. С. 2-11.
52. Миронов И.К., Магуськин В.М. Опыт наблюдений за деформациями земной поверхности на малых площадках в разломных зонах в 1984-1995 гг. на Камчатке Вулканология и сейсмология. 2019. №4. с. 52-68. DOI: 10.31857/S0203-03062019452-68.
53. Михайлов В.О., Киселева Е.А., Смольянинова Е.И., Дмитриев П.Н., Голубев В.И., Тимошкина Е.П., Хайретдинов С.А. Радарная спутниковая интерферометрия: новые технологии спутникового мониторинга областей разработки полезных ископаемых, смещений природных и техногенных объектов // Наука и технологические разработки. 2016. Т. 95. № 3. с. 5-11.
54. Морозов В.Н., Родкин М.В., Татаринев В.Н. Геодинамическая безопасность Ростовской АЭС // Международная конференция «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли». Новосибирск. 2001. С. 271-277.
55. Морозов В.Н. Белов С.В., Татаринев В.Н. На страже радиозэкологической безопасности России // Природа. 2006. №7(1091). С. 3–12.
56. Морозов В. Н., Кафтан В. И., Татаринев В. Н. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния и результаты GPS-

- мониторинга эпицентральной зоны землетрясения 24 августа 2014 (г. Напа, шт. Калифорния, США) // Геотектоника. 2018. С. 90–102.
57. Мясников А.В. О проблеме учета влияния метеорологических факторов на большие прецизионные системы на примере баксанского большебазового лазерного интерферометра // Сейсмические приборы. 2019. Т. 55. № 2. с. 27-38. DOI: 10.21455/si2019.2-2.
58. НП-064-05. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. М. 2006.
59. Оценка исходной сейсмичности района и площадки размещения объекта использования атомной энергии при инженерных изысканиях и исследованиях. РБ-019-17. М. 2018.
60. Пеллинен Л. П. Высшая геодезия (Теоретическая геодезия). М., Недра, 1978. 264 с.
61. 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).
62. Порсов А. Ю., Бейгул В. П., Паленов М. В. Создание подземной исследовательской лаборатории в Красноярском крае // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды 2013 № 1 (29) С. 14—21.
63. Правила закладки центров и реперов на пунктах геодезической и нивелирной сетей. – М.: Картгеоцентр – Геодезиздат, 1993.
64. Правила закрепления центров пунктов спутниковой геодезической сети. Москва, ЦНИИГАиК, 2001.
65. Размещение атомных станций. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности. НП-032-01. Утв. Госатомнадзором России от 08.11.2001, — М., 2001. № 10.
66. РБ-019-01. Федеральные норма и правила. Оценка сейсмической опасности участков размещения ядерно- и радиационно опасных объектов на основании геодинамических данных. М. 2002.

- 67.Руководство по безопасности при использовании атомной энергии
«Оценка исходной сейсмичности района и площадки размещения
объекта использования атомной энергии при инженерных изысканиях и
исследованиях» 2018. РБ-019—18.
- 68.Садовский М. А. О естественной кусковатости горных пород // ДАН
СССР. — 1979. — Т. 247. — № 4. — С. 829 – 831.
- 69.Соловьёв А. А., Краснопёров Р. И. (2022) Отчет о деятельности
Геофизического центра РАН за 2021 год. Результаты научных
исследований и международных проектов. М.: Исследования по
геоинформатике, т. 10, №1 (BS1001), [https://doi.org/ 10.2205/2022BS056](https://doi.org/10.2205/2022BS056).
- 70.Татаринов В.Н. Геодинамическая безопасность на объектах ядерного
топливного цикла // Использование и охрана природных ресурсов в
России. Бюллетень №1 (85). 2006. С.46-51.
- 71.Татаринов В.Н., Татаринова Т.А. Учет масштабного эффекта при
наблюдениях за деформациями земной поверхности спутниковыми
навигационными системами // Маркшейдерский вестник. №5. 2012.
С.15-19.
- 72.Татаринов В.Н., Морозов В.Н., Маневич А.И., Татаринова Т.А. Новые
геодезические данные о цикличности геодинамических движений в зоне
контакта Западно-Сибирской платформы и Сибирской плиты.
Материалы IV Международная научно-практической конференции
«Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с
использованием современных геоинформационных технологий». Часть
2. Майкоп. Изд-во «ИП Кучеренко В.О.» 2017. С.182-189.
- 73.Татаринов В.Н., Морозов В.Н., Кафтан В.И., Маневич А.И. Современная
геодинамика южной части Енисейского кряжа по результатам
спутниковых наблюдений // Геофизические исследования. 2018. Т.19.
№4. С. 64-79. DOI: 10.21455/gr2018.
- 74.Татаринов В.Н., Морозов В.Н., Кафтан В.И., Маневич А.И., Татаринова
Т.А. Подземная исследовательская лаборатория: задачи

- геодинамических исследований // Радиоактивные отходы. 2019. № 1(6). С. 77-89.
75. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии». 2017. НП-064-17.
76. Шароглазова Г.А., Товбас С.К., Маркович К.И. Инструментальные исследования современной геодинамики в Полоцком регионе // Вестник Полоцкого государственного университета. 2015 № (16). С. 153-155.
77. 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.
78. Шевчук С.В., Квятковская С.С., Шевчук Р.В. Новый подход к интерпретации данных геодинамического мониторинга на объектах подземных хранилищ газа // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № (2-1). С. 77-91.
79. Шерман С.И., Семинский С.А., Борняков С.А., Буддо В.Ю., Лобацкая Р.М., Адамович А.Н., Трусков В.А., Бабичев А.А. Разломообразование в литосфере: зоны сдвига. Новосибирск: Наука, 1992. 258 с.
80. Шерман С.И., Лунина О.В. Новая карта напряженного состояния верхней части литосферы Земли // Доклады Академии наук (РАН), т. 378, № 5, 2001.
81. Ященко В. Р., Ямбаев Х. К. Геодезический мониторинг движений земной коры. – М.: изд- во МИИГАиК, 2007. – 208 с.
82. Bock Y., Melgar D. Physical applications of GPS geodesy: a review // Reports on Progress in Physics. 2016. Vol. 79(10). No. 106801. DOI:10.1088/0034-4885/79/10/106801.

83. Boncori M.J.-P. Measuring coseismic deformation with spaceborne synthetic aperture radar: a review // *Frontiers in Earth Science*. 2019. T. 7. Vol. 16. DOI: 10.3389/feart.2019.00016.
84. Braitenberg C. The deforming and rotating Earth – A review of the 18th International Symposium on Geodynamics and Earth Tide, Trieste 2016 // *Geodesy and Geodynamics*. 2018. Vol. 9. No. 3. p. 187-196. DOI:10.1016/j.geog.2018.03.003.
85. Cardozo N., Allmendinger R.W. SSPX: A program to compute strain from displacement/velocity data // *Computers and Geosciences*. 2009. Vol. 35. pp. 1343-1357. DOI: 10.1016/j.cageo.2008.05.008.
86. Chatzinikos M., Fotiou A., Pikridas C. The effects of the receiver and satellite antenna phase center models on local and regional GPS networks // *Conference: 19th International Symposium on Modern Technologies, Education and Professional Practice in Geodesy and Related Fields* At: Sofia, Bulgaria V: Conf. Proc., pp. 213 – 223.
87. Chrzanowski A., Y.Q. Chen, and J.M. Secord. 1986. Geometrical analysis of deformation surveys, *Proceedings of the Deformation Measurements Workshop*, Boston, Massachusetts, 31 October-1 November, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, M.A., pp. 170-206.
88. Crowell B.W. PyTAGS: A Python package for the temporal analysis of GNSS strains, V1.0, 2019. DOI: 10.5281/zenodo.2634525.
89. Deformation Analysis [Research institute of geodesy, topography and cartography]. URL: www.vugtk.cz/~deformace (25.04.2023).
90. Dermanis, A. & Grafarend, E. W., 1992. The Finite Element Approach to the Geodetic Computation of Two-and Three Dimensional Deformation Parameters: A Study of Frame Invariance and Parameter Estimability. Maracaibo, Venezuela, The International Conference on Cartography – Geodesy.

91. Dilssner F., Springer T., Flohrer C., Dow J. Estimation of phase center corrections for GLONASS-M satellite antennas // 2010. V 84: pp. 467–480. DOI 10.1007/s00190-010-0381-7.
92. Dimitrios G. A., Papanikolaou X., Ganas A., Paradissis D. StrainTool: A software package to estimate strain tensor parameters (Version v1.0). 2019. DOI: 10.5281/zenodo.3266398.
93. Doma, M. I. A Comparison of Two Different Measures of Precision into Geodetic Deformation Monitoring Networks. *Arabian Journal of Science and Engineering*. 2014. 39(2), pp. 695–704.
94. Dvulit P., Savchuk S., Sosonka I. Accuracy estimation of site coordinates derived from GNSS-observations by non-classical error theory of measurements // *Geodesy and Geodynamics* 2021. Vol. 12. pp. 347-355 DOI:10.1016/j.geog.2021.07.005.
95. Flesch L.M., Haines A.J., Holt W.E. Dynamics of the India-Eurasia collision zone // *Journal of Geophysical Research*. - 2001. - V. 106. - P. 16435–16460.
96. Frank F.C. Deduction of earth strain from survey data // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1966. Vol. 56. p. 35–42.
97. Galetzka J., Melgar D., Genrich J.F., Geng J., Owen S., Lindsey E.O., Xu X., Bock Y., Avouac J.-P., Adhikari L.B., Upreti B.N., Pratt-Sitaula B., Bhattarai T.N., Sitaula B.P., Moore A., Hudnut K.W., Szeliga W., Normandeau J., Fend M., Flouzat M., Bollinger L., Shrestha P., Koirala B., Gautam U., Bhattarai M., Gupta R., Kandel T., Timsina C., Sapkota S.N., Rajaure S., Maharjan N. Slip pulse and resonance of Kathmandu basin during the 2015 Mw 7.8 Gorkha earthquake, Nepal imaged with geodesy // *Science Express*. 2015. <https://doi.org/10.1126/science.aac6383>.
98. Garthwaite M.C., Hazelwood M., Nancarrow S., Hislop A. Dawson J.H. A regional geodetic network to monitor ground surface response to resource extraction in the northern Surat Basin, Queensland // *Australian Journal of Earth Sciences*. 2015. №62. P. 469-477. <https://doi.org/10.1080/08120099.2015.1040073>.

99. Gerald L. Mader. GPS antenna calibration at the National Geodetic Survey // National Geodetic Survey N/NG56, 1315 East-West Highway, Silver Spring, MD 20810.
100. GNSS Station Monumentation..., 2022 GNSS Station Monumentation. Knowledge Base UNAVCO. URL: <https://kb.unavco.org/kb/article.php?id=104> (date of the application 26.07.2022).
101. Goudarzi M.A., Cocard M., Santerre R. GeoStrain: An open source software for calculating crustal strain rates // Computers & Geosciences. 2015. Vol. 82. p. 1–12. DOI:10.1016/j.cageo.2015.05.007.
102. Gustafson L., Ljungberg A. A deformation analysis of the Forsmark GPS monitoring network from 2005 to 2009. Forsmark site investigation SKB P-10-29. SKB, Swedish nuclear fuel and waste management CO, 2010, 33 P.
103. Harmening C., Neuner H. A spatio-temporal deformation model for laser scanning point clouds // Journal of Geodesy. 2020. Vol. 94. Iss. 2. DOI:10.1007/s00190-020-01352-0.
104. He P., Wen Y., Xu C., Chen Y. Complete three-dimensional near-field surface displacements from imaging geodesy techniques applied to the 2016 Kumamoto earthquake // Remote Sensing of Environment. 2019. Vol. 232. No. 111321. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111321.
105. Jahr T., Kroner C., Lippmann A. Strainmeters at Moxa observatory, Germany // Journal of Geodynamics. 2006. Vol. 41(1-3). p. 205-212. DOI:10.1016/j.jog.2005.08.017.
106. Jahr T. Non-tidal tilt and strain signals recorded at the Geodynamic Observatory Moxa, Thuringia/Germany // Geodesy and Geodynamics. 2018. T. 9. №. 3. p. 229-236. DOI: 10.1016/j.geog.2017.03.015.
107. Kuzmin Yu.O. Recent geodynamics of fault zones: faulting in real time scale. Geodynamics & Tectonophysics. 2014. 5 (2), 401–443. doi:10.5800/GT2014520135.

108. Lazos I, Chatzipetros A, Pavlides S, Pikridas Ch, Bitharis S, Acta Geodyn. Geomater., Tectonic crustal deformation of corinth gulf, greece, based on primary geodetic // Acta Geodyn. Geomater. 2020. №. 4 (200), pp. 413–426, DOI: 10.13168/AGG.2020.0030.
109. Lee, D. T. & Schachter, B. J. Two Algorithms for Constructing a Delaunay Triangulation. International Journal of Computer and Information Science. 1980. 9(3), pp. 219–242.
110. Lindborg T., Berglund S. Monitoring Forsmark – evaluation and recommendations for programme update. 2018. pp.359.
111. Mader, G.L. GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey. GPS Solutions 1999, V. 3, № 1, C. 50-58.
112. Manning J., Johnstone G. Guidelines for Antarctic GPS Monumentation. 2002. 19 P.
113. McCaffrey R. Block kinematics of the Pacific–North America plate boundary in the Southwestern United States from inversion of GPS, seismological, and geologic data // Journal of Geophysical Research. 2005. V. 110. B07401. doi:10.1029/ 2004JB003307.
114. Milyukov V.K., Klyachko B.S., Myasnikov A.V., Striganov P.S., Yanin A.F., Vlasov A.N. A laser interferometer–deformograph for monitoring the crust movement // Instruments and Experimental Techniques. 2005. Vol. 48. No. 6. p. 780–795.
115. Montenbruck O., Steigenberger P., Villiger A., Rebischung P. On the relation of GNSS phase center offsets and the terrestrial reference frame scale: a semi-analytical analysis // Journal of Geodesy. 2022. №96(90). DOI: 10.1007/s00190-022-01678-x.
116. Normandeau J., Meertens C., Bartel B. Permanent station GPS/GNSS antenna monuments and mounts supported by UNAVCO. Knowledge Base UNAVCO. URL: <https://kb.unavco.org/kb/article/permanent-station-gps-gnss-antenna-monuments-and-mounts-supported-by-unavco-poster-for-unavco-science-meeting-2010-646.html> (date of the application 26.07.2022).

117. Nyberg S., Kallio U., Koivula H. (2013) GPS monitoring of bedrock stability at Olkiluoto nuclear waste disposal site in Finland from 1996 to 2012. *Journal of Geodetic Science*, 3, pp.121-128. DOI: 10.2478/jogs2013-0017.
118. PyGeoStrain: A software package for calculation crustal strain (v1.0). 2023. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7948241>.
119. Reilinger R., McClusky S., Souter B., Hamburger M., Prilepin M., Mishin A., Guseva T., Balassanian S. Preliminary estimates of plate convergence in the Caucasus collision zone from global positioning system measurements// *J. Geophys. Res.* 1997. V.24. N 14. P. 1815-1818.
120. Sarsito, D. A., Susilo, S., Rudyawan, A., Muhammad, N. A., Andreas, H., & Pradipta, D. Walanae Fault Kinematic Deduced from Geometric Geodetic GNSS GPS Monitoring // *E3S Web of Conferences*. 2019. 94, 04008. doi:10.1051/e3sconf/20199404008.
121. Schmid R., Dach R., Collilieux X., Jäggi A., Schmitz M., Dilssner F. Absolute IGS antenna phase center model igs08.atx: status and potential improvements // *Journal of Geodesy*. 2015. №90. p. 343–364. DOI 10.1007/s00190-015-0876-3.
122. Segall P., Davis J. L. GPS applications for geodynamics and earthquake studies // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 1997. Vol. 25. No. 1. p. 301-336. DOI:10.1146/annurev.earth.25.1.301.
123. Shen Z.-K., Jackson D.D., Ge B.X. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements // *Journal of Geophysical Research*. 1996. V. 101. P.27957–27980.
124. Sjöberg L., Pan M., Asenjo E. An analysis of the Äspö crustal motion-monitoring network observed by GPS in 2000, 2001 and 2002 SKB R-02-33. SKB, Swedish nuclear fuel and waste management CO. 2002. pp.47.
125. Sutyagin I., Tatarnikov D. Absolute robotic GNSS antenna calibrations in open field environment. *GPS Solutions* 2020 24:92. DOI:10.1007/s10291-020-00999-8.

126. Tatarinov V.N., Aleshin, I.M., Tatarinova T.A. Experience of Space Geodesy Observations at Nuclear Facilities // Seismic Instruments. 2019. №55. P. 676-687. DOI: 10.3103/S0747923919060094.
127. Telling J., Lyda A., Hartzell P., Glennie C. Review of Earth science research using terrestrial laser scanning //Earth-Science Reviews. 2017. T. 169. p. 35-68. DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.04.007.
128. Terada T., Miyabe N. Deformation of the earth crust in Kwansai district and its relation to the orographic feature // Bull. Earthquake Res. 1929. Vol. 7. 223 p.
129. Teza G., Pesci A., Galgaro A. Grid_strain and grid_strain3: Soft-ware packages for strain field computation in 2D and 3D environments // Computers & Geosciences. 2008. V. 34, Iss. 9. P.1142–1153. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.07.006>.
130. Tsuboi C. Investigation on the deformation of the earth's crust found by precise geodetic means // Jap. J. Astron. Geophys. 1933. Vol. 10. 93 p.
131. Wessel P., Luis J.F., Uieda L., Scharroo R., Wobbe F., Smith W.H.F., Tian D. The Generic Mapping Tools version 6 // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2019. No. 20. p. 5556–5564. DOI: 10.1029/2019GC008515.
132. Witchayangkoon B., Elements of GPS precise point positioning, B.Eng. (Honors) King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 1992, M.S. University of Maine, 1997.
133. Wu J., Tang C., Chen Y. Effect of triangle shape factor on precision of crustal deformation calculated // Journal of Geodesy and Geodynamics. 2003. Vol. 23(3). P. 26-30.
134. Wubben G, Schmitz M, Boettcher G, Schemann C (2006) Absolute GNSS antenna calibration with a robot: repeatability of phase variations, calibration of GLONASS and determination of carrier-to-noise pattern. In: Proceedings of IGS workshop, Darmstadt, Germany, May 8–12. http://www.geopp.de/media/docs/pdf/gppig_s06_pabs_g.pdf.

135. Zumberge J. F. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks / J. F. Zumberge, M. B. Heflin, D. C. Jefferson, M. M. Watkins et al, Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012). – 1997. – T. 102. – № B3. – C. 5005–5017.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021665069

**Программа для расчета компонент деформаций по
данным геодезических наблюдений PyGeoStrain 1.0**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Геофизический центр Российской
академии наук (ГЦ РАН) (RU)*

Авторы: *Маневич Александр Ильич (RU), Шевчук Роман
Васильевич (RU), Лосев Илья Владимирович (RU)*



Заявка № 2021663755

Дата поступления 02 сентября 2021 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 17 сентября 2021 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

ПРИЛОЖЕНИЕ 2



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

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

«25» декабря 2023 г.

СПРАВКА

В рамках научно-исследовательских работ Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геофизического центра Российской академии наук были апробированы результаты диссертационного исследования Шевчука Р.В. на тему «Обоснование и разработка метода выявления зон возможного нарушения изоляционных свойств массива горных пород на основе деформационного анализа».

Разработанный метод выявления зон возможного нарушения изоляционных свойств массива горных пород позволил определить временные и пространственные изменения параметров деформаций, необходимые для обеспечения безопасности захоронения высокоактивных радиоактивных отходов в геологических формациях Нижне-Канского массива. Разработанные Шевчуком Р.В. методические принципы ГНСС-измерений позволяют обеспечить субсантиметровую точность регистрации движений земной поверхности в районе строительства подземной исследовательской лаборатории.

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

(подпись)



(подпись)

Дзедобов Б.А.
(ФИО)