

На правах рукописи



Мельник Геннадий Эдуардович

**Анализ современных тектонических движений и оценка стабильности
платформенных областей Северной Евразии**

Специальность 1.6.9.

Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2026

Работа выполнена в лаборатории Спутниковых методов изучения геофизических процессов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук и в отделе космической геодезии Управления геодезии и метрологии публично-правовой компании «Роскадастр».

Научный руководитель:	Стеблов Григорий Михайлович , профессор РАН, доктор физико-математических наук, заместитель директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук
Официальные оппоненты:	
Ведущая организация:	

Защита диссертации состоится **XX XX 202X г. в XX часов** на заседании Диссертационного совета 24.1.132.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, по адресу 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д.10, стр.1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте института www.ifz.ru. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации vak.ed.gov.ru и на сайте ИФЗ РАН.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в 2-х экземплярах направлять по адресу: 123242, Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр. 1, ИФЗ РАН, ученому секретарю диссертационного совета Жосткову Руслану Александровичу.

Автореферат разослан «_ » XX 202X г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

Р.А. Жостков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований

Актуальность данного исследования обусловлена двумя основными аспектами. Во-первых, понимание особенностей движения земной поверхности способствует углублённому пониманию геофизических процессов, происходящих внутри Земли. Во-вторых, современные системы координат, базирующиеся на методах космической геодезии, закрепляются в виде совокупности геодезических пунктов с известными координатами и предсказуемой кинематикой. Таким образом, для создания высокоточных систем отсчёта координат необходима информация о характере движений и деформаций земной коры.

Цели и задачи исследований

Целью данной работы является анализ современных тектонических движений и количественная оценка стабильности платформенных областей Северной Евразии.

Для достижения поставленной цели в процессе выполнения диссертации необходимо было решить следующие основные задачи:

1. Выполнить подготовку первичных измерительных данных станций наблюдений за глобальными навигационными спутниковыми системами (ГНСС);
2. Произвести обработку первичных измерительных данных ГНСС;
3. Выполнить регрессионный анализ сформированных временных рядов прямоугольных геоцентрических координат наблюдательных станций;
4. Выполнить оценку качества данных и отбор пунктов для дальнейшего анализа деформаций по оценке точности;
5. Произвести вычисление плоских деформаций для региона Северной Евразии;
6. Выполнить анализ получившегося поля деформаций;
7. Произвести анализ скорости движения земной поверхности в Фенноскандии как регионе повышенной внутриплитной деформации.

Результаты и их научная новизна

В настоящей работе впервые обработана база данных наблюдений глобальных навигационных спутниковых систем на пунктах фундаментальной астрономо-геодезической сети. При этом применён новый подход, заключающийся в обработке отечественных пунктов с опорой на глобально распределённый набор пунктов. Это позволило существенно повысить точность определения координат пунктов и, как следствие, проанализировать внутриплитные деформации, величина которых на 2–3 порядка меньше, чем деформации на границах плит.

В результате исследования выявлены некоторые пространственные вариации деформаций. На Восточно-Европейской платформе наблюдается растяжение; к востоку от Уральских гор растяжение сменяется сжатием; Исключением является Байкальская рифтовая зона.

Проведённый анализ точности подтвердил статистическую значимость обнаруженных вариаций деформаций на фоне шумов. Эти вариации были

рассмотрены с точки зрения влияния сил, действующих на тектоническую плиту, включая влияние со стороны астеносферы и взаимодействие на границах со смежными плитами. Построенные вариации сопоставлены с палеомагнитными реконструкциями прошлых геологических эпох, что позволило предложить объяснения наблюдаемых особенностей.

Особое внимание уделено региону Фенноскандии, где выявлена полоса сжатия на переходе от областей поднятий к платформенным территориям тектонической плиты.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Представительность пространственного покрытия фундаментальной астрономо-геодезической территории Северной Евразии при совместном уравнивании измерений по всему Земному шару, обеспечивает точность определения геоцентрических координат, которая позволяет анализировать наличие внутриплитных деформаций;
2. По сибирской и западно-сибирской платформы от хребта Черского на востоке до Уральских гор на западе выделяется зона сжатий, на фоне которых, исключением является Байкальская рифтовая зона. К западу от Уральских гор наблюдается область положительной дилатации, что соответствует геодинамической обстановке растяжения;
3. Из сопоставления спутниковых геодезических данных и палеомагнитных реконструкций установлено замедление скорости спрединга вдоль границы между Евразийской и Североамериканской плитами в северной части Атлантического океана за последние 3 млн лет, что является одним из факторов, обуславливающих обстановку субширотного растяжения к западу от Уральских гор;
4. По спутниковым геодезическим данным в юго-восточной части Фенноскандии выделяется зона сжатий, маркирующая переход от сводообразного поднятия к северному обрамлению Восточно-Европейской платформы.

Теоретическая и практическая значимость работы

Научная значимость данного исследования обусловлена двумя ключевыми факторами. Во-первых, знание особенностей движения земной поверхности позволяет глубже понять геофизические процессы, происходящие внутри Земли. Во-вторых, современные координатные системы, основанные на методах космической геодезии, фиксируются через совокупность геодезических пунктов с известными координатами и предсказуемой кинематикой. Таким образом, для разработки высокоточных систем координат необходимы данные о движениях и деформациях земной коры.

Практическая часть данного исследования заключается в том что в ходе выполнения данной работы были созданы программные средства для автоматизации обработки измерений ГНСС, существенно повышающие быстроту и эффективность обработки ежедневно поступающих данных с пунктов фундаментальной астрономо-геодезической сети, что является основой для создания новой системы координат.

Степень достоверности результатов

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов достигается за счёт корректной фильтрации исходных измерений, выбора адекватных математических и физических моделей исследуемых процессов, применения методов уравнивания и статистической обработки данных, использования статистических критериев согласованности и тестов на устойчивость.

Степень разработанности темы исследования

В основе современных представлений о глобальной геодинамике лежит теория тектоники плит, согласно которой литосферные плиты в первом приближении рассматриваются как жёсткие тела. Это допущение использовалось в ранних кинематических моделях, описывающих движение плит как вращение вокруг полюсов Эйлера, включая NUVEL-1A [49], основанную на данных океанического дна, и последующую NNR-MORVEL56 [34], уточнившую параметры движения и структуру плит. В этих моделях поверхность Земли представляется системой жёстких блоков с деформациями, сосредоточенными на границах. Развитие спутниковой геодезии позволило перейти к более детальному описанию современных деформаций, что реализовано, например, в модели GSRM v2.1 [72], учитывающей также области распределённой деформации и оценивающей скорости её проявления, главным образом в зонах взаимодействия плит. Однако внутриплитовые области остаются изученными недостаточно, поскольку большинство моделей рассматривают их как квазижёсткие, несмотря на данные высокоточных ГНСС-наблюдений, указывающие на необходимость более детального анализа внутриплитовых деформаций.

Методология и методы исследования

Методическая основа исследования базируется на применении методов космической геодезии, прежде всего глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), что обусловлено их высокой точностью, глобальностью и возможностью формирования непрерывных временных рядов координат. В качестве координатной основы используется международная земная система отсчёта ITRF, формируемая на основе совместной обработки данных ГНСС, спутниковой и лунной лазерной локации, доплеровских измерений (DORIS) и радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ). Обработка ГНСС-наблюдений выполнялась дифференциальным методом с учётом пространственной коррелированности ошибок, что позволяет повысить точность при близком расположении пунктов. Длительные серии наблюдений формируют временные ряды координат, анализируемые с помощью регрессионных методов для оценки скоростей смещений, выявления линейных и нелинейных трендов, сезонных вариаций и шумовой составляющей. На основе полученных скоростей выполняется анализ пространственного распределения деформаций с

применением метода конечных элементов для построения непрерывного поля латеральных деформаций.

Личный вклад автора

Основные результаты, полученные лично диссертантом в ходе выполнения работы, включают:

1. Обзор ранее выполненных исследований по тематике диссертации;
2. Систематизация и формирования архива первичной измерительной информации с пунктов фундаментальной астрономо-геодезической сети;
3. Автоматизация обработки данных наблюдений ГНСС с пунктов фундаментальной астрономо-геодезической сети с помощью авторских программных средств;
4. Обработка данных наблюдений ГНСС с пунктов фундаментальной астрономо-геодезической сети, с целью формирования временных рядов смещений наблюдательных пунктов;
5. Вычисление скоростей движения геодезических пунктов на территории Северной Евразии;
6. Построение карт горизонтальной дилатации для Фенноскандии и для северной Евразии.

Анализ полученных результатов и формулировка основных выводов проводились совместно с научным руководителем – д.ф.-м.н., профессором РАН Г.М. Стебловым.

Апробация работы и публикации

Основные результаты исследований были представлены на 12 Международных и Всероссийских конференциях, а также семинарах и совещаниях.

Основные положения диссертационной работы опубликованы в 13 научных работах, 7 из которых в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка используемой литературы, и одного приложения.

Общий объем работы составляет 129 страниц машинописного текста, включая 51 рисунок и 6 таблиц. Список литературы содержит 108 библиографических наименований.

Благодарности

Представленная диссертация является результатом деятельности автора за период работы с 2020 по 2026 гг. в отделе космической геодезии Публично-правовой компании «Роскадастр», лаборатории спутниковых методов изучения геофизических процессов Института физики Земли РАН, лаборатории геодинамики, спутниковой геодезии и математических методов изучения геосистем Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, а также кафедры высшей геодезии Московского государственного

университета геодезии и картографии. Автор выражает искреннюю признательность научному руководителю – заместителю директора института теории прогноза землетрясений (ИТПЗ РАН) д.ф.-м.н., проф. РАН Г.М. Стеблову за неоценимую помощь на всех этапах выполнения работы.

Особую благодарность за помощь и консультации в вопросах обработки исходных геодезических измерений и анализа полученных данных автор выражает благодарностью коллективам Управления геодезии и метрологии ППК «Роскадастр», лаборатории спутниковых методов изучения геофизических процессов Института физики Земли РАН и коллективу сотрудников Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи работы, показана научная новизна и практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится историческое развитие представлений о тектонике плит, в целом, и о стабильности платформ северной Евразии, в частности.

До середины XX века в геотектонике преобладало фиксистское направление, в рамках которого значительные горизонтальные перемещения земной коры не рассматривались. Наиболее разработанные гипотезы данного подхода опирались на глыбово-волновые представления о развитии земной коры.

В начале XX века, на фоне кризиса в геотектонике, связанного с открытием радиоактивности и пересмотром представлений о первоначально «горячем» состоянии Земли, была выдвинута гипотеза дрейфа континентов. Идеи, близкие к данной концепции, ранее формулировались в работах О. Фишера (1889) и Ф. Б. Тейлора (1910) и получили обобщённое название мобилизма. Наиболее последовательное развитие гипотеза получила в трудах А. Вегенера. В книге «Происхождение континентов и океанов» он рассматривал современное строение земной коры как результат горизонтального перемещения континентальных блоков, сложенных более лёгкими породами (сиаль), по поверхности более плотной океанической коры (сима).

Несмотря на наличие большого объёма наблюдательных данных, подтверждавших идею дрейфа континентов, убедительный механизм перемещения литосферных блоков предложен не был. Это обстоятельство привело к критическому отношению со стороны научного сообщества и временному отказу от мобилистических представлений.

До формирования современной теории тектоники плит в геотектонике был получен ряд важных результатов, связанных с изучением внутреннего строения Земли. В частности, в 1935 г. Н. Хаскелл показал, что послегляциальное поднятие в Скандинавии может быть объяснено вязко-текучими свойствами мантии на геологических временных интервалах.

Вместе с тем перед мобилистическим подходом сохранялись принципиальные нерешённые задачи, одной из которых являлось установление

механизма, обеспечивающего перемещение континентов. Таким решением стала гипотеза о конвекции мантии. Другой значимой проблемой мобилистического подхода являлась сложность воссоздания траектории движения континентов. Значительным продвижением в этой области оказалось открытие палеомагнетизма. Основной идеей палеомагнетизма является то, что при охлаждении некоторых вулканических пород, таких как базальт, они «записывают» направление и интенсивность магнитного поля Земли в момент своего образования. Этот «записанный» магнетизм может быть измерен и использован для восстановления геологической истории. Истинная революция в понимании палеомагнетизма произошла в 1960-х годах, когда учёные обнаружили полосовые магнитные аномалии на дне океана. Оказалось, что магнитное поле вулканических пород на дне океана показывает регулярные полосы, чередующиеся между нормальным и обратным состоянием, параллельными хребту.

Используя огромное количество данных, собранных за почти пятьдесят лет после того, как Альфред Вегенер впервые предложил гипотезу о дрейфе континентов, Дан Маккензи, Роберт Паркер, Джейсон Морган и Ксавье Ле Пишон представили новую мобилистическую концепцию тектоники – обновлённую глобальную тектоническую модель, которая впоследствии стала известна как теория тектоники плит. Согласно этой теории, земная кора и верхняя мантия состоят из нескольких больших и множества меньших «плит», которые перемещаются относительно друг друга. Согласно другому постулату сформулированной теории, литосферные плиты в первом приближении описываются как твёрдые тела, и их движение подчиняется теореме вращения Эйлера.

Построение первых глобальных тектонических моделей опиралось на три основных типа геологических данных. К первому относятся результаты исследований магнитных аномалий океанического дна. Вторую группу составляют данные об ориентации трансформных разломов в зонах срединно-океанических хребтов. Третий тип представлен сведениями о направлениях векторов смещений в очагах субдукционных землетрясений.

Параметры вращения тектонических плит определялись на основе данных, полученных из пунктов наблюдений, расположенных на значительном удалении от границ плит. Предполагалось, что каждая плита имеет внутреннюю стабильную область, практически неподверженную деформациям. До недавнего времени вопрос о возможных деформациях в пределах этих стабильных областей не изучался.

С развитием методов космической геодезии и увеличением числа наблюдательных станций, особенно в северной Евразии, стало возможным более детально исследовать внутриплитные деформации. Увеличение числа станций и их равномерное распределение позволили оценить эти деформации с высокой точностью и проверить справедливость гипотезы о внутренней стабильности плит.

Наличие внутриплитных деформаций подтверждается, например, постледниковым изостатическим поднятием в Фенноскандии. Этот процесс сопровождается как вертикальными, так и горизонтальными деформациями несмотря на то, что данный регион удалён от границ плит и считается частью их

внутренней структуры. В настоящей работе особый интерес представляли вопросы о том, существуют ли другие типы внутриплитных деформаций, каков их характер и порядок величин.

Космическая геодезия внесла значительный вклад в геодинамические исследования, преодолевая многие ограничения, связанные с классическими методами геодезии.

В настоящее время выделяют четыре основных метода космической геодезии, к ним относятся:

- Лазерная локация спутников (Satellite Laser Ranging) (SLR)
- Допплеровская орбитография (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) (DORIS)
- Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ) (Very-Long-Baseline Interferometry) (VLBI)
- Глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС) (Global Navigation Satellite System).

Самым массовым методом космической геодезии на данный момент является использование глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Одним из основных применений ГНСС в космической геодезии является точное определение прямоугольных геоцентрических координат пунктов на земной поверхности с точностью до нескольких миллиметров.

Принцип работы глобальных навигационных спутниковых систем основывается на методе определения местоположения пункта на земной поверхности через измерение расстояния между спутником, на котором расположен излучатель радиосигнала и приёмником, установленным на земной поверхности. В сущности, данный метод реализует пространственную линейную засечку, позволяя определить местоположение приёмника на Земле, измеряя расстояния до нескольких спутников, местоположение которых известно.

Во второй главе приводится методология исследований современных движений земной поверхности. Точное определение деформаций земной поверхности, вызванных как общим движением тектонических плит, так и более локализованными внутриплитовыми деформациями, становится возможным благодаря анализу данных, полученных с помощью спутниковой геодезии. Для всесторонней оценки внутренних деформационных процессов необходимо обеспечение достаточной плотности расположения наблюдательных станций.

Современные спутниковые системы передают данные об орбитах в реальном времени с точностью свыше 1.5 метра в рамках навигационных сигналов, что является недостаточным для достижения миллиметрового уровня точности в определении координат. Для задач, требующих высокой степени точности, применяются орбитальные данные от Международной службы ГНСС (International GNSS Service) (IGS), доступность которых наступает спустя около двух недель после сбора данных и которые позволяют добиться точности определения положения спутников до 2.5 см для системы GPS и до 3 см для системы ГЛОНАСС.

Эксперименты по измерению фазовых задержек сигналов раскрыли значительные новые возможности системы, достигая точности в 1-2 мм. Это

открыло путь для использования ГНСС-технологий в области геодинамических исследований.

Одна из особенностей фазовых измерений заключается в том, что в начальный момент проведения измерений остаётся неопределённым целое количество длин волн, находящихся между спутником и приёмным устройством. Эта начальная фазовая неопределённость, представленная неизвестным числом длин волн, должна быть учтена в фазовых измерениях для корректного вычисления псевдодальности. Данная неопределённость остаётся неизменной до момента, когда происходит обрыв непрерывного приёма сигнала от спутника.

Обобщённое уравнение GPS-наблюдений псевдодальностей P_j^i i -го спутника, производимых j -м приёмником, может быть записано в следующей форме:

$$P_j^i = c(T_j - T^i) + B_j^i, \quad (1)$$

где T_j – время получения спутникового сигнала по часам приёмника, T^i – время начала передачи сигнала по часам спутника, B_j^i – ошибка измерений, c – скорость света в вакууме.

При длительных наблюдениях система уравнений (1) обеспечивает достаточную точность для решения начальных неопределённостей фаз и для вычисления точных координат станций.

В данном исследовании для обработки первоначальных фазовых данных применяется программный комплекс GAMIT/GLOBK, разработанный Массачусетским Технологическим Институтом.

В первой фазе работы, GAMIT применяет дифференциальные методы для создания двойных разностей из первичных фазовых данных. Это позволяет извлечь информацию о взаимном расположении точек наблюдения и выявить, а затем и исправить прерывания в данных, вызванные потерей сигнала. На последующем этапе, GAMIT использует метод взвешенных наименьших квадратов для уточнения фазовых неопределённостей и определения относительных координат всех станций, а также для коррекции параметров вращения Земли, орбит спутников и характеристик атмосферы, опираясь на двойные разности фазовых измерений в качестве входных данных. Работа GAMIT заканчивается получением оценок параметров, которые формируют состояние системы, а также соответствующей ковариационной матрицы, созданной без строгих априорных ограничений. Эти результаты затем используются как квази-наблюдения в последующем этапе анализа исходных данных с применением программного комплекса GLOBK.

GLOBK применяет фильтр Калмана для объединения ежедневных результатов от GAMIT по различным сетям в общее решение, что позволяет учитывать стохастические изменения в оценке параметров. Этот метод объединения данных позволяет сопоставить результаты из региональных геодезических сетей с глобальными данными сети станций IGS, что является необходимым в создании моделей движения литосферных плит.

Высокоточные ежедневные оценки местоположений станций в выбранной системе отсчёта далее объединяются в продолжительные временные последовательности, анализ которых позволяет вычислить скорости движения пунктов на поверхности Земли и характер их движения.

Временные ряды координат геодезических пунктов подвергаются анализу для выявления компонентов, связанных с динамикой литосферы. На рисунке 1 изображен график временного ряда прямоугольных геоцентрических координат – XYZ – для пункта фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС) в городе Салехард. Для того чтобы смоделировать движение геодезического пункта следует найти коэффициенты уравнения, которое наилучшим образом согласуется с данными наблюдений. Самым простым уравнением для моделирования движения геодезического пункта является прямая наклонная линия, которая описывается следующим выражением:

$$X_t = V_x(t - t_0) + X_{t_0}, \quad (2)$$

где V_x – скорость движения геодезического пункта; t_0 – опорная эпоха; t – эпоха наблюдений; X_t – координата на эпоху наблюдений; X_{t_0} – координата на опорную эпоху.

Применив метод наименьших квадратов к временному ряду мы найдём значения неизвестных коэффициентов. На рисунке 2 показан тот же временной ряд что и на рисунке 1, но уже с смоделированной линейной траекторией движения этого пункта.

Временные ряды координат геодезических пунктов могут включать в себя несколько типов сигналов: монотонное смещение, обусловленное движением литосферных плит, ступенчатые изменения, вызванные сейсмическими событиями, постсейсмические переходные процессы, а также периодические колебания, связанные с сезонными изменениями. Помимо этого, в данных присутствуют инструментальные помехи и возможные разрывы, обусловленные изменениями в аппаратуре или программном обеспечении. Усложненная модель движения, в отличие от уравнения (1), учитывает все указанные типы сигналов и записывается следующим образом:

$$X_t = L_{\text{до}} + L_{\text{после}} + \omega + I + S + PSD, \quad (3)$$

где $L_{\text{до}}$ и $L_{\text{после}}$ – линейные составляющие движения геодезического пункта, выражающиеся по формуле (2) и разделённые на «до» сейсмического события и «после» него; ω – составляющая движения геодезического пункта отвечающая за сезонное изменение координат и выражающаяся по формуле (4); I и S – компоненты движения отвечающие за резкое ступенчатое изменения координат в следствии инструментальных (I) или сейсмических (S) эффектов, выражаются по формуле (5); PSD – постсейсмическая деформация (Post-Seismic Deformation) – эффект «загиба» координат после сейсмического события, выражается по формуле (7).

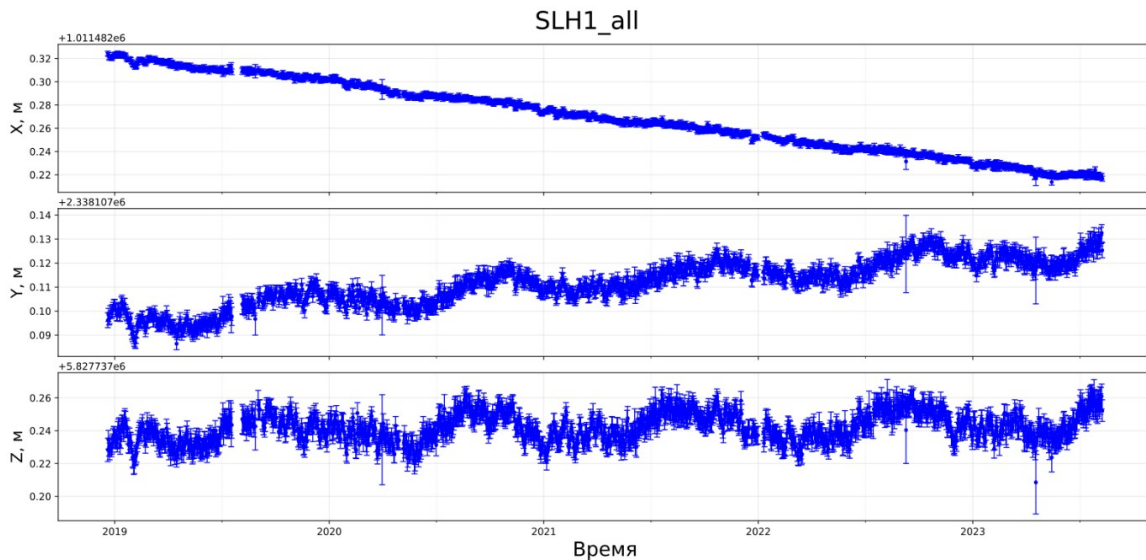


Рисунок 1 – Временной ряд пункта ФАГС в городе Салехард

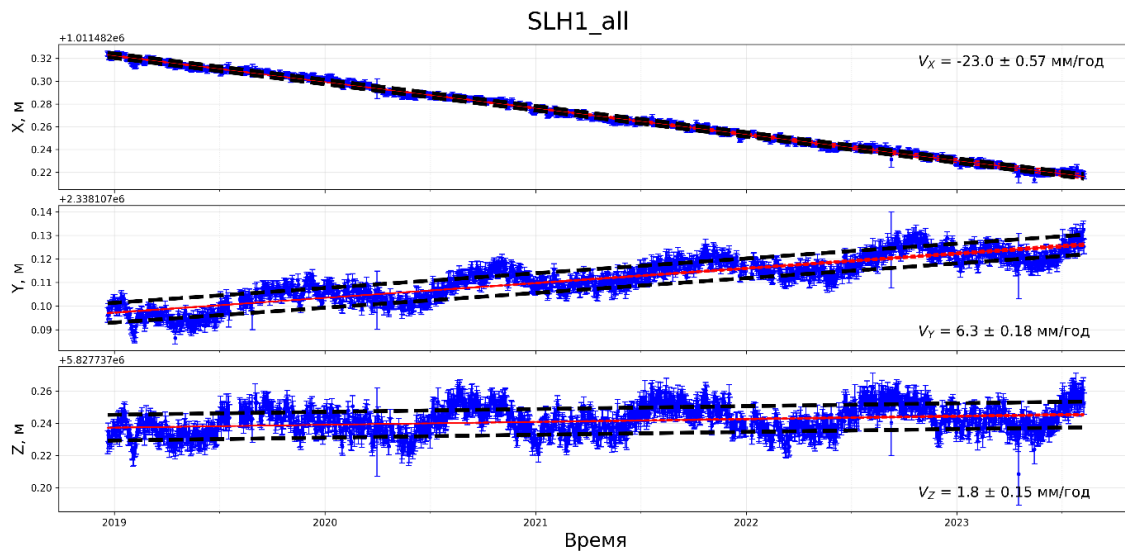


Рисунок 2 – Временной ряд прямоугольных геоцентрических координат (XYZ) пункта ФАГС в г. Салехард. А также смоделированная линейная траектория движения данного пункта (красным). Черным цветом показан уровень шума относительно данной модели

$$\omega = c \cdot \sin[2\pi(t-t_0)] + d \cdot \cos[2\pi(t-t_0)] + e \cdot \sin[4\pi(t-t_0)] + f \cdot \cos[4\pi(t-t_0)] \quad (4)$$

$$I + S = \sum_{i=1}^{n_g} g_i H(t - T_i^g) + \sum_{i=1}^{n_h} h_i H(t - T_i^h), \quad (5)$$

где g_i и h_i – величины i -го ступенчатого изменения координат, вызванные инструментальными и сейсмическими эффектами, соответственно; T_i^g – моменты времени, в которые было измерено положение станции при замене оборудования; T_i^h – моменты времени, в которые было измерено положение станции при землетрясении; H – ступенчатая функция Хевисайда, которая определяется следующим образом:

$$\theta(x) = \begin{cases} 0, & x < 0; \\ 1, & x > 0. \end{cases} \quad (6)$$

$$PSD = \sum_1^{n_e} A_i^e \left(1 - e^{-\frac{-(t-t_0)-t_i^e}{\tau_i^e}} \right) + \sum_1^{n_l} A_i^l \log \left(1 + \frac{(t-t_0)-t_i^l}{\tau_i^l} \right), \quad (7)$$

где A_i^e и A_i^l – амплитуды экспоненциальной и логарифмической составляющей, i -го землетрясения, соответственно; τ_i^e и τ_i^l – периоды релаксации экспоненциальной и логарифмической составляющей, i -го землетрясения, соответственно.

На рисунке 3 показан пример графика временного ряда пункта с смоделированной траекторией его движения согласно уравнению (3).

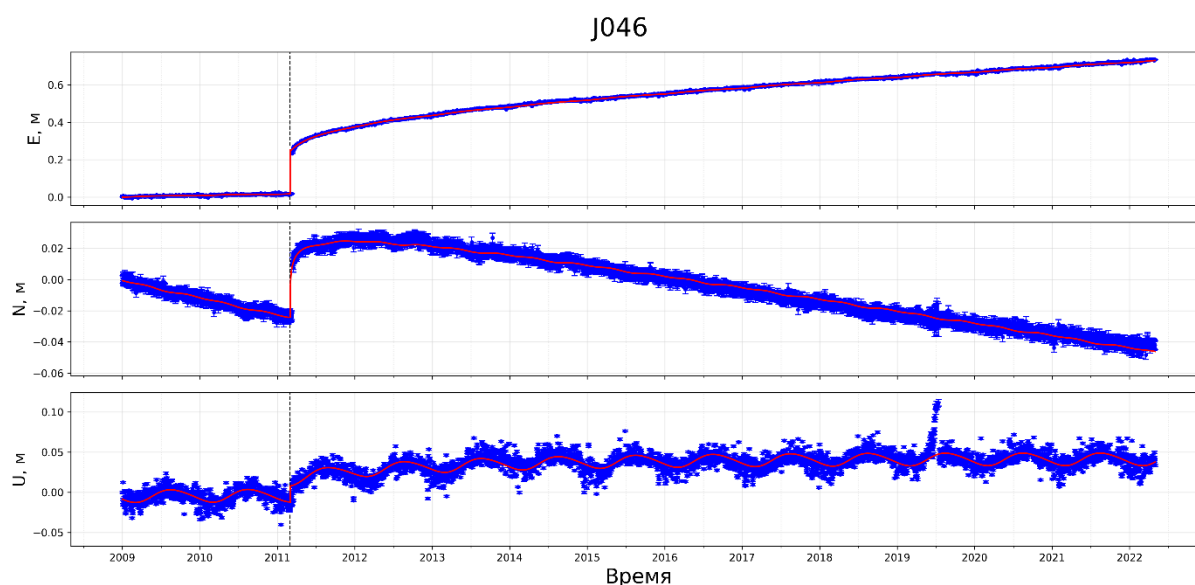


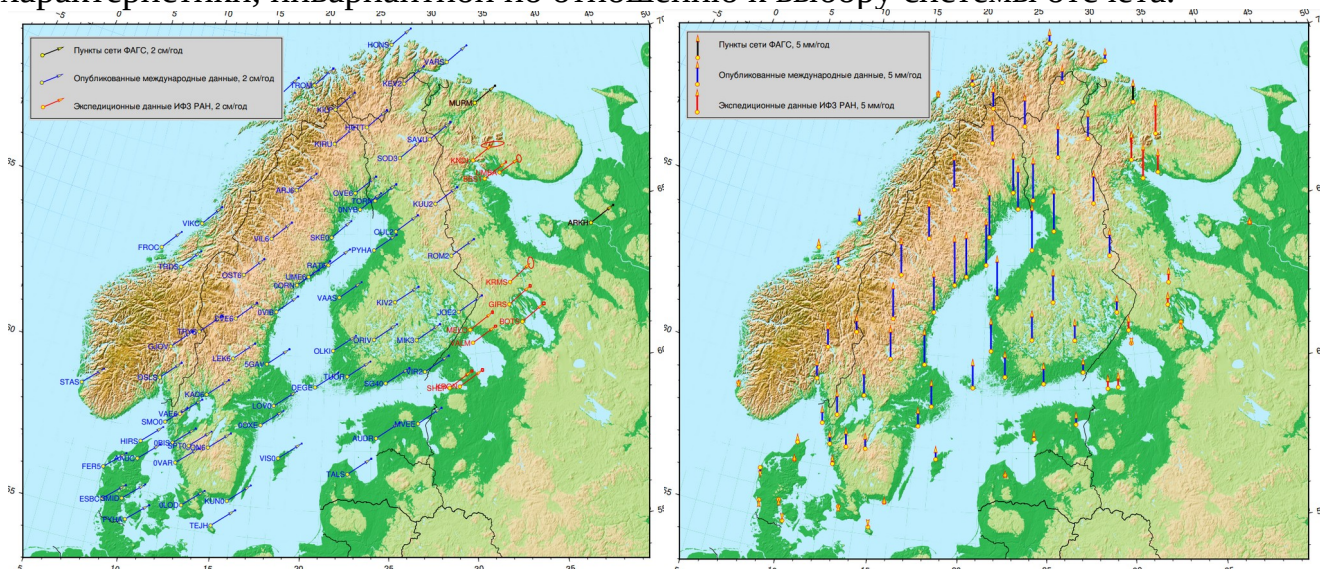
Рисунок 3 – Временной ряд прямоугольных геоцентрических координат (XYZ) геодезического пункта и смоделированная траектория его движения, включая постсейсмическую деформацию

В третьей главе представлено исследование постледниковой изостатической компенсации в Фенноскандии. В ходе последнего ледникового периода, охватившего значительные регионы Северной Европы, Азии, Северной Америки, а также Гренландии и Антарктиды, территории этих континентов были покрыты ледяными щитами, достигавшими максимальной толщины до трех километров. Феномен постгляциального поднятия земной поверхности можно рассматривать как результат замедленной реакции литосферы и верхних слоёв мантии на уменьшение нагрузки, вызванное отступлением ледников.

В настоящей работе для исследования стабильности территории Фенноскандии мы объединили материалы из трёх различных источников. Первый набор данных – это сформированные временные ряды декартовых геоцентрических координат для 64 геодезических пунктов, находящихся на территории Фенноскандии. Мы воспользовались результатами обработки первичных данных, выполняемой Невадской геодезической лабораторией университета Невады в Рино (англ. Nevada Geodetic Laboratory University of Nevada, Reno. NGL). Второй источник данных – это сервис РГС-Центр, предназначенный для обеспечения доступа к спутниковым данным ГНСС,

предоставляемых ППК «Роскадастр». Третий источник – это данные, полученные в результате многолетних наблюдений, периодически повторяемых Лабораторией спутниковых методов изучения геофизических процессов ИФЗ РАН. Повторные измерения представлены данными наблюдений на трёх геодинимических полигонах: Карельский, Кольский и Санкт-Петербургский; в количестве 10 пунктов. Периодические измерения на них выполняются, как правило, раз в 2 года в летний сезон на протяжении более чем 20 лет. Для определения координат пунктов периодических повторных измерений ИФЗ РАН и пунктов ФАГС нами выполнялась обработка сети из 12 пунктов ГНСС, реализованная в программном пакете GAMIT/GLOBK ver. 10.72.

На рисунке 4 представлена общая картина горизонтальных и вертикальных движений, которые в дальнейшем были использованы для анализа локальных геодинимических особенностей данного региона, выполняя который мы перешли к инвариантам движений в виде скоростей горизонтальной дилатации, как характеристики, инвариантной по отношению к выбору системы отсчёта.



(а) Карта горизонтальных движений пунктов ГНСС на территории Фенноскандии

(б) Карта вертикальных движений пунктов ГНСС на территории Фенноскандии

Рисунок 4 – Вертикальные и горизонтальные скорости в Фенноскандии

Для расчёта плоских деформаций нами использовалось покрытие исследуемой территории конечным набором треугольных элементов. Для этого из набора исходных пунктов формировались треугольники с помощью алгоритма Делоне, реализованного в программном пакете Generic Mapping Tools, которые представлены на рисунке 5 (а).

Кинематика каждого треугольника определяется системой из шести уравнений с шестью неизвестными:

$$\begin{bmatrix} V_{E_1} \\ V_{N_1} \\ V_{E_2} \\ V_{N_2} \\ V_{E_3} \\ V_{N_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -N_1 & E_1 & N_1 & 0 \\ 0 & 1 & E_1 & 0 & E_1 & N_1 \\ 1 & 0 & -N_2 & E_2 & N_2 & 0 \\ 0 & 1 & E_2 & 0 & E_2 & N_2 \\ 1 & 0 & -N_3 & E_3 & N_3 & 0 \\ 0 & 1 & E_3 & 0 & E_3 & N_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_E \\ t_N \\ \Omega \\ \varepsilon_{EE} \\ \varepsilon_{EN} \\ \varepsilon_{NN} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

или матричном виде:

$$Gm = d, \quad (10)$$

где d – вектор известных компонент скорости для трёх вершин треугольника в левой части, m – вектор искомых величин в правой части, G – связывающий их линейный оператор, определяемый геометрией треугольника.

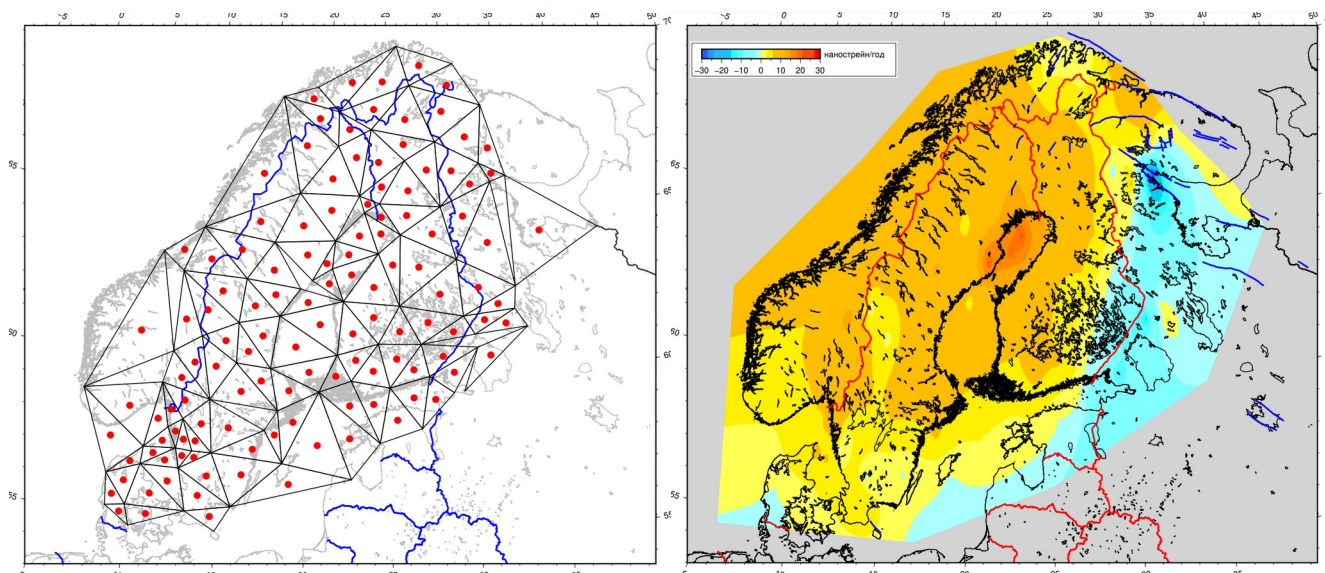
Решение системы (10) имеет вид:

$$m = G^{-1}d, \quad (11)$$

В результате решения (11) интенсивность площадных деформаций представляется следующим образом:

$$\delta = \varepsilon_{EE} + \varepsilon_{NN}. \quad (12)$$

В случае если δ положительна, то это характерно для ситуации растяжения данной территории, если же δ отрицательна, это означает что данная территория испытывает сжатие. На схеме величин площадной деформации (Рисунок 5), преобладают области положительных значений, в то время как отрицательные зафиксированы только на северо-восточной окраине Фенноскандинавского щита. Эта особенность указывает на доминирование обстановок сдвига и/или растяжения, при которых площади расчётных треугольников увеличиваются. Отмечено последовательное уменьшение величин от центральной части Фенноскандии к её периферии, коррелирующее с уменьшением скорости современных вертикальных движений в этом же направлении. Данные, приведённые в настоящей работе, и их анализ подтверждают простираение на восток области постледниковой изостатической компенсации, включая вертикальные и горизонтальные движения.



(а) Триангуляция, построенная по исходным наблюдательным пунктам (б) Скорость площадной деформации

Рисунок 5 – Площадные деформации Фенноскандии, вычисленные методом конечных элементов

Результаты, полученные по данным ГНСС также были сопоставлены с данными проекта Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE). Данный проект представлен в виде двух спутников, находящихся на высоте около 490 км над поверхностью Земли и следующие друг за другом на расстоянии около 220 км. Измеряя вариации расстояния между спутниками восстанавливают гравитационное поле. В результате 20-летнего периода работы GRACE сформирован ряд ежемесячных оценок параметров гравитационного поля Земли из которого с уверенностью выделяются вековые вариации, особенно в зоне постледникового поднятия.

Учитывая пространственную разрешающую способность использованных гравиметрических данных, для сопоставления их с вертикальными движениями по имеющимся данным ГНСС в Фенноскандии, в настоящем исследовании были выбраны две области размером порядка длины полуволны 60-ой гармоники сферического разложения, т.е. около 330 км, по которым было выполнено пространственное осреднение имеющихся данных ГНСС и спутниковой гравиметрии.

Таковыми областями являются: (1) центральная область Скандинавского полуострова, прилегающая к северу Ботнического залива и к западу от него и (2) зона сочленения Балтийского щита с Русской плитой к востоку от Ботнического залива (рисунок 6).

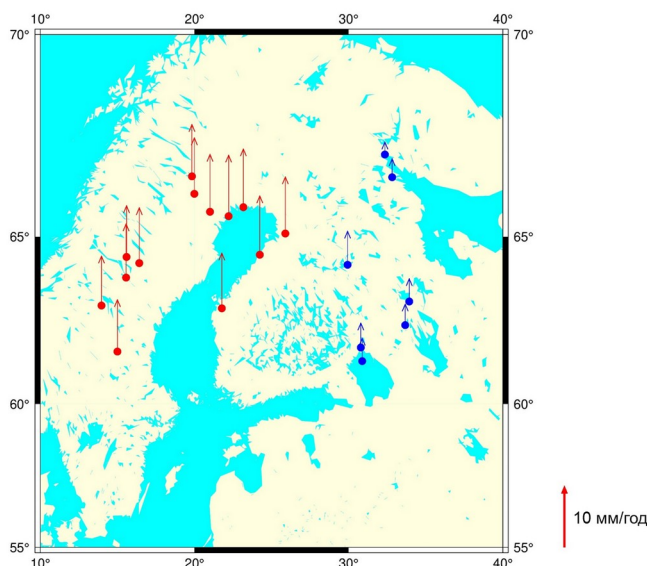


Рисунок 6 – Скорости вертикальных движений в Скандинавии: красные стрелки – зона 1, синие стрелки – зона 2

Как видно из таблицы 1 соотношение вертикальной скорости по ГНСС и вариаций ускорения силы тяжести заметно отличаются для двух сопоставленных зон: 0.14 для первой зоны и 0.19 – для второй. Исходя из предположения о линейной зависимости скорости вертикального поднятия от интенсивности поступления избыточных гравитирующих масс, следовало ожидать примерного равенства этих двух коэффициентов. Объяснение отмеченного различия коэффициентов можно найти в том, что первая зона характеризуется латеральным растяжением (оттенки красного по шкале на рисунке 5 (б)), в то время как вторая зона расположена в полосе латерального сжатия (оттенки голубого по шкале на рисунке 5 (б)).

Таблица 1. Вертикальные скорости по ГНСС и изменения ускорения силы тяжести (без коррекции за постледниковую компенсацию GIA) по данным проекта GRACE/GRACE-FO: средние значения для первой и второй зон в Скандинавии

Зона	Вертикальная скорость по ГНСС, мм/год	Тренд вариаций ускорения силы тяжести, мкГал/год	Соотношение вариаций ускорения силы тяжести и вертикальной скорости по ГНСС, мкГал/мм
1	9.0	1.3	0.144
2	3.7	0.7	0.189

Для оценки эффекта локального латерального сжатия литосферы на гравитационные аномалии рассмотрим максимально упрощенную модель в виде вертикально ориентированного цилиндрического сегмента литосферного слоя, подстилающего произвольный круговой сегмент земной поверхности. Избыточное

ускорение силы тяжести в центре круга на земной поверхности вследствие осесимметричного бокового сжатия подстилающего цилиндра несложно оценить, интегрируя вклад от избыточной массы элемента объема цилиндра в вертикальную составляющую ускорения силы тяжести:

$$\delta g = \varepsilon \int_0^h dz \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^a G \frac{\rho}{R^2} \frac{z}{R} r dr \quad (13)$$

где

δg – избыточное ускорение силы тяжести;

z, r, φ – цилиндрические координаты с началом в центре круга на земной поверхности: глубина, радиальная и угловая координаты, соответственно;

$R = \sqrt{z^2 + r^2}$ – длина радиус-вектора от начала координат к элементу объема;

h, a – глубина и радиус сечения цилиндра;

ρ – плотность;

G – гравитационная постоянная;

ε – коэффициент осесимметричного бокового сжатия цилиндра, приравниваемый площадной деформации кругового сегмента земной поверхности.

Считая плотность ρ постоянной, заменяя переменные в подынтегральном выражении в (13), получим δg в явном виде:

$$\delta g = 2\pi G \rho \varepsilon (a + h - \sqrt{h^2 + a^2}) \quad (14)$$

При средней плотности земной коры $\rho = 2,67 \text{ г/см}^3$, коэффициенте сжатия $\varepsilon = 10^{-8}$, глубине цилиндра $h = 100 \text{ км}$, радиусе $a = 330 \text{ км}$, получим из (14) величину избыточной аномалии $\delta g = 0.095 \text{ мкГал}$. Аналогичным образом для осесимметричного растяжения такого же цилиндра с тем же коэффициентом противоположного знака получим уменьшение гравитационной аномалии на ту же величину.

Учитывая уменьшение гравитационной аномалии в зоне 1 вследствие растяжения, в среднем на $1.5 \cdot 10^{-8}$ в год и увеличение гравитационной аномалии в зоне 2 вследствие сжатия, в среднем на 10^{-8} в год, внесем соответствующую поправку в тренды вариаций ускорения силы тяжести в табл. 2, прибавив $\delta g = 0.142 \text{ мкГал/год}$ для зоны 1 и вычтя $\delta g = 0.095 \text{ мкГал/год}$ для зоны 2. Тогда соотношение вертикальной скорости по ГНСС и вариаций ускорения силы тяжести становится практически равным 0.16 мкГал/мм для обеих зон, что, в целом, подтверждает закономерность предположения о проявлении измеримого эффекта геодинамической обстановки в гравитационных аномалиях в исследованных зонах.

Проведённые исследования позволили сделать следующие выводы: на современном этапе Фенноскандия развивается как сводовое поднятие в обстановке северо-западного сжатия. Его центральная часть (север Ботнического залива) испытывает растяжение, на периферии преобладает взбросо-сдвиговое поле напряжений.

В целом наблюдается уменьшение величины современной деформации от Ботнического залива к периферии Фенноскандинавского щита. В результате анализа горизонтальных смещений удалось выделить полосу сжатия, которая маркирует переход от зоны изостатического выравнивания к Восточно-Европейской платформе (Рисунок 5). Зона сжатий простирается практически по всей восточной и юго-восточной границе Фенноскандии.

В четвёртой главе приводится исследование стабильности северной части Евразии. В настоящее время на территории Северной Евразии существует несколько геодезических сетей постояннодействующих пунктов, наблюдающих глобальные навигационные спутниковые системы. Эти сети охватывают фундаментальную астрономо-геодезическую сеть и систему дифференциальной коррекции и мониторинга. Также в их состав входят станции, эксплуатируемые Росгидрометом и различными научными учреждениями, в том числе институтами Российской академии наук (РАН). Кроме отечественных пунктов существует не малое количество зарубежных постояннодействующих станций наблюдающих ГНСС. Одним из наиболее полных архивов таких данных является Невадская геодезическая лаборатория, расположенная в Бюро горных исследований и геологии Невады в Университете Невады в Рино. В данном архиве присутствуют временные ряды и более чем 20 000 станций, расположенных по всему миру. Из-за такого большого количества данных неизбежно возникают временные ряды, имеющие недостаточную длительность наблюдений, значительные пропуски во времени, а также ряды с высоким шумом по которым скорость изменения координат вычисляется с низкой точностью.

Чтобы отсеять пункты, в данных которых присутствуют подобные проблемы, было решено использовать следующие критерии:

1. Продолжительность временного ряда для пункта должна быть не меньше трёх лет, не считая пробелов в измерениях.

$$(t_n - t_1) \geq 3 \text{ лет}, \quad (15)$$

где t_n – последняя эпоха наблюдения пункта, t_1 – первая эпоха наблюдения пункта.

2. Пробелов в измерениях должно быть не больше 50% от общей продолжительности измерений.

$$n_{\text{пробелов}} \leq \frac{1}{2} n_{\text{эпох}}. \quad (16)$$

3. Для отбраковки грубых вылетов использовался следующий критерий: из средних квадратических отклонений пунктов, прошедших первые два критерия, определялось медианное среднее квадратическое отклонение. Затем, отбраковывались те пункты, СКО которых превышало три медианных СКО:

$$\sigma_{v_i} \leq 3 \cdot \sigma_{v_{\text{медиан}}}. \quad (17)$$

Последний критерий применялся дважды для повышения надёжности фильтрации.

Во время наблюдений, проводимых с помощью глобальных навигационных спутниковых систем, в измеренном радиосигнале присутствуют различные искажающие факторы. Для уменьшения влияния данных факторов применяют методы подавления искажений. Наиболее эффективным и позволяющим достичь максимальной точности является метод фильтрации пространственно-коррелированных помех с помощью дифференциальной коррекции. Однако для применения данного метода требуется наличие опорных пунктов. Эталонным набором опорных пунктов являются пункты входящие в сеть международной службы глобальных навигационных спутниковых систем (IGS). На данный момент в Российской Федерации действующих пунктов IGS всего 8 и среднее расстояние между ними около 2-3 тыс. км. Наряду с пунктами сети IGS в Российской Федерации существует Фундаментальная Астрономо-Геодезическая сеть (ФАГС). Она является высшим звеном государственной геодезической сети Российской Федерации. Основное назначение постоянно действующих пунктов ФАГС – поддержание системы координат и отслеживание её деформаций. На момент 2025 года данная сеть насчитывает 103 пункта.

Одного лишь создания пункта ФАГС недостаточно для того, чтобы использовать его как опорный пункт при дифференциальном методе обработки ГНСС наблюдений. Для этого требуется выполнить обработку наблюдений с этих пунктов в международной геоцентрической системе отсчёта чтобы с высокой точностью определить как координаты, так и кинематику пунктов. В рамках данной работы была проведена переобработка всего массива данных, собранного с пунктов ФАГС за весь период наблюдений, который начинается в 2015 году и продолжается по настоящее время. Основным результатом этой переобработки стало создание единого и согласованного набора координат и скоростей их изменения.

Обработка сети ФАГС проводилась с использованием программного пакета GAMIT/GLOBK. Общий массив данных был разделен на кластеры, каждый из которых включал по 70 пунктов. В состав каждого кластера входили 55 глобально распределённых опорных пунктов и 15 определяемых. На втором этапе обработки выполнялось уравнивание кластеров между собой, что обеспечило получение единого согласованного результата для всей сети. Связывающим звеном между кластерами являлся одинаковый набор исходных опорных пунктов. Актуальной задачей является не только преобработка архивного массива данных, но и поддержание оперативной обработки поступающих данных с течением времени. Данный подход был автоматизирован с помощью самостоятельно написанного набора модулей на языке Python3. В результате, была создана система, благодаря которой в ежедневном режиме определяются пространственные прямоугольные геоцентрические координаты пунктов ФАГС. На рисунке 7 приведена схема взаимодействия модулей данной системы.

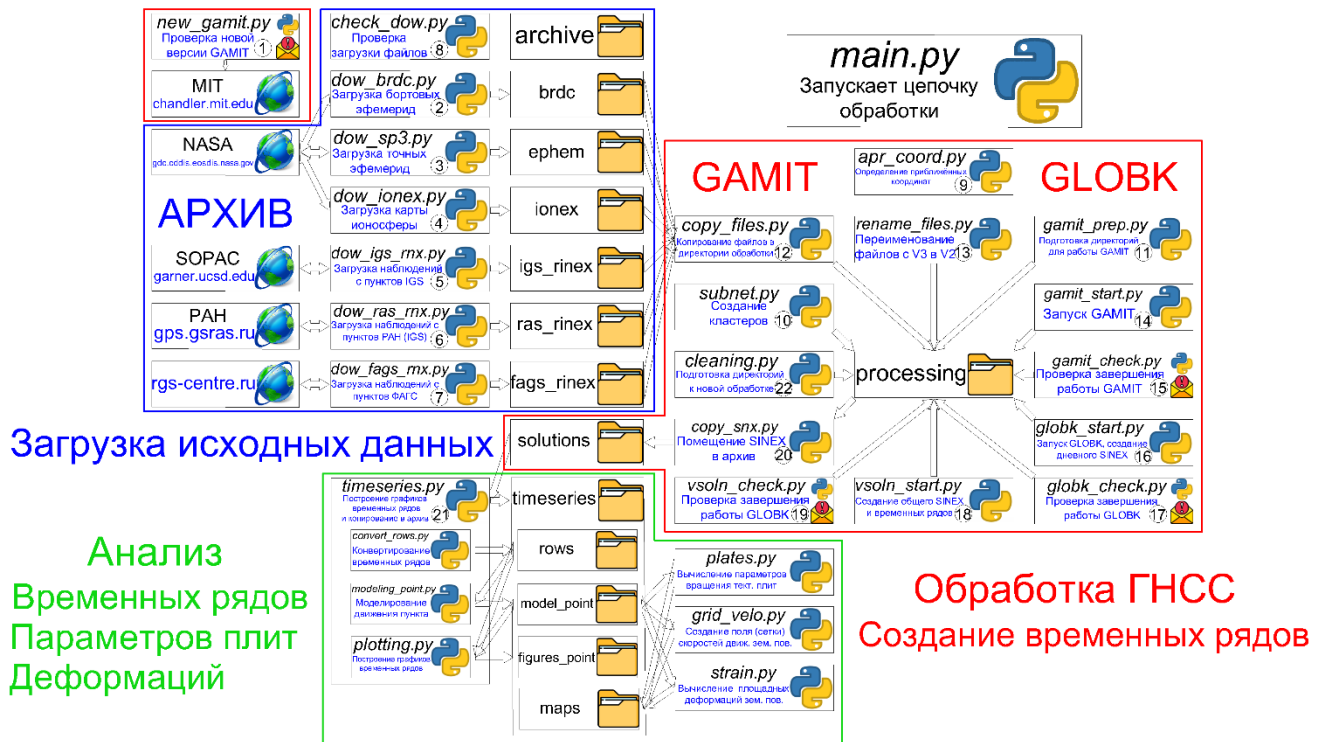


Рисунок 7 – Схема автоматической обработки данных наблюдений с пунктов фундаментальной астрономо-геодезической сети

Моделирование кинематики литосферных плит как вращение недеформируемых блоков литосферы основано на допущении об их внутренней стабильности и локализации межплитовых деформаций вдоль границ. Для задачи оценки внутриплитовых деформаций мы распространили регион исследования на более обширную часть северной Евразии и использовали расширенный набор исходных данных, а именно: скорости движений пунктов ФАГС, скорости движения периодически наблюдаемых полевых пунктов ИФЗ РАН и скорости движения международных пунктов, временные ряды координат которых представлены в архиве Невадской лаборатории. На рисунке 8 показаны вектора скоростей геодезических пунктов, использовавшихся для оценки площадных деформаций исследуемого региона. Для расчёта деформаций нами использовалось покрытие исследуемой территории конечным набором треугольных элементов. Алгоритм вычисления площадных деформаций аналогичен тому, что использовался для вычисления деформаций в Фенноскандии (уравнения 9-12).

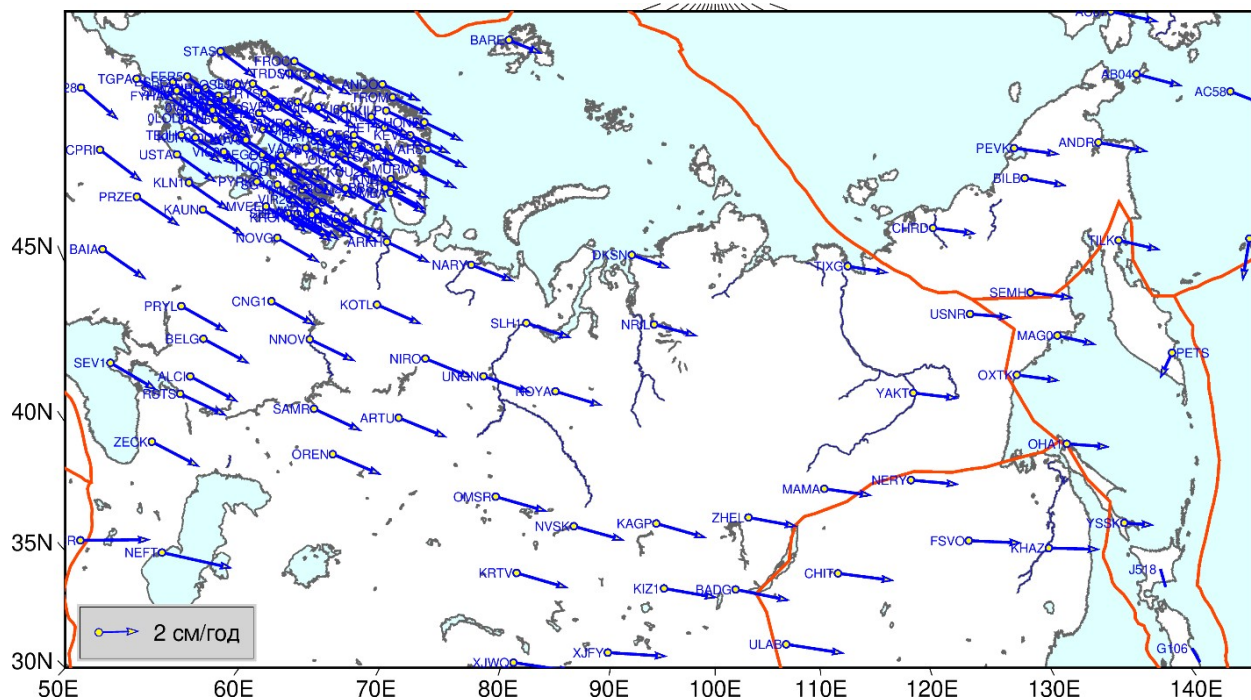


Рисунок 8 – Карта скоростей геодезических пунктов, использовавшихся для оценки площадных деформаций

Построив оптимальную триангуляцию, вычислив деформацию для каждого треугольника, а затем применив методы интерполяции и подавления искажений была получена карта непрерывного поля площадной деформации, а также были нанесены оси деформации (Рисунок 9).

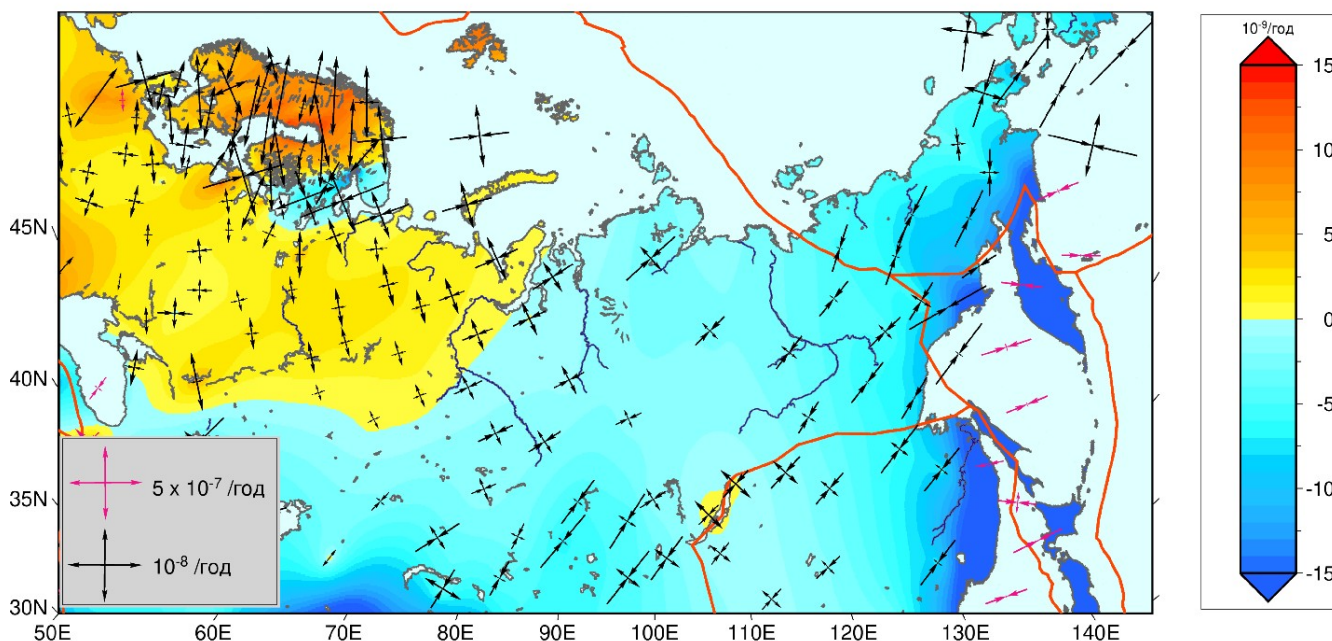


Рисунок 9 – Интенсивность площадных деформаций. Оттенками жёлтого показаны зоны растяжения, оттенками синего – зоны сжатия

Из этой карты видно, что Евразийская плита испытывает вариативные деформации, как растяжения, так и сжатия, которые на большей части внутренних платформенных областей имеют порядок $\pm 10^{-9}/200\text{д}^{-1}$, сопоставимый с достигнутой в прежние годы точностью измерений. Зона значительного сжатия наблюдается на восточных окраинах РФ, что объясняется процессами субдукции Тихоокеанской плиты. В районе озера Байкал отмечается область растяжения, связанная с Байкальским рифтогенезом. В центральной части Фенноскандии выделяется регион растяжения, ассоциируемый с постледниковым поднятием. Кроме того, на восточных окраинах Фенноскандии наблюдается полоса сжатия, маркирующая переход от куполообразного поднятия к платформенным областям. Отдельный вопрос о внутриплитной стабильности вызывает Уральский хребет. По результатам, представленным на карте интенсивности горизонтальных деформаций, при пересечении этого хребта с запада на восток наблюдается переход от растяжения к сжатию, что, возможно, говорит о взаимном движении платформенных областей, разделённых хребтом. Однако, по существующим представлениям, считается, что Уральские горы с высокой степенью стабильны и не подвержены активным геодинамическим процессам и деформациям.

Рассмотрим конфигурацию межплитовых границ, окружающих северную часть Евразии. Сибирская платформа окружена с двух сторон конвергентными поясами: с востока конвергентная граница между Евразийской плитой и Северо-Американской плитой с невысокой интенсивностью схождения; с юга – Альпийско-Гималайский складчатый пояс вследствие достаточно интенсивного дрейфа Индийской плиты на север, в сторону Евразии. В распределении деформаций по Сибирской платформе можно отметить согласованность ориентации главных осей сжатия с геодинамическим режимом обоих конвергентных поясов. Такой конфигурацией границ можно объяснить наблюдаемую обстановку сжатия Сибирской и Западно-Сибирской платформ. Восточно-Европейская платформа окружена с юга продолжением Альпийско-Гималайского складчатого пояса в виде Кавказского хребта, а с севера, северо-запада, запада – продолжением границы между Евразийской и Северо-Американской плитами, которая к северу от кажущегося полюса взаимного вращения (в районе Тикси) становится дивергентной, представляющей собой зону спрединга в северной части срединно-океанического хребта в Северном Ледовитом океане с продолжением в Атлантике. Зона спрединга, находящаяся на восходящей ветви конвективной мантийной ячейки, должна создавать сжимающие деформации на расходящихся плитах. В совокупности, геодинамический режим южной и северо-западной границ ВЕП не объясняет наблюдаемую обстановку растяжения этой платформы.

Однако если рассмотреть движения в этой зоне в прошлые геологические эпохи, то обнаруживается, что скорость спрединга не была постоянной. Так как Арктическая часть границы между Евразийской и Северо-Американской плитами составлена океаническими хребтами, то исторические перемещения этих плит реконструируются по комплексу данных о гравитационных, магнитных и сейсмических аномалиях вдоль примыкающих к хребтам подводных котловин. Одной из таких детально изученных структур в Арктическом регионе является Евразийский бассейн. Данные по палеомагнитным аномалиям вдоль хребта

Гаккеля показывают, что в Кайнозой скорость раскрытия Евразийского бассейна довольно заметно менялась, и в современную эпоху, на протяжении 3 млн лет оценивается на уровне 1 см/год.

Для сравнения палеомагнитных оценок полной скорости спрединга в Евразийском бассейне с современной скоростью была выполнена оценка этой величины по спутниковой геодезии за текущие 30 лет. Полная скорость расхождения плит в произвольной точке их общей границы вычислялась в виде:

$$\bar{V}_i = \bar{\Omega}_{EUR-NAM} \times \bar{R}_i, \quad (16)$$

где $\bar{\Omega}_{EUR-NAM}$ – вектор Эйлера, определяющий положение полюса и угловую скорость взаимного вращения контактирующих плит, \bar{V}_i и \bar{R}_i – скорость и радиус-вектор i -той точки контакта Евразийской и Северо-Американской плит.

В таблице 2 представлены современные скорости вдоль хребта Гаккеля, вычисленные по ГНСС и скорости в прошлые геологические эпохи, вычисленные по палеомагнитным аномалиям. Из таблицы видно, что полная скорость спрединга в Евразийском бассейне сократилась, в среднем, примерно в 3 раза по сравнению с палеомагнитными оценками, что говорит о заметном замедлении этого процесса, по крайней мере, в последние 3 млн лет.

Таблица 2 – Сопоставление скорости спрединга вдоль хребта Гаккеля по палеомагнитным данным и по ГНСС

Сегменты хребта Гаккеля	Скорость по ГНСС, см/год	Скорость по палеомагнитным аномалиям, см/год
Восток	0.2	0.8
Центр	0.4	1.1
Запад	0.5	1.2

Учитывая конфигурацию конвективных потоков земной мантии в качестве одного из основных факторов, определяющих скорость спрединга, можно сделать вывод о пренебрежимо малых вариациях этих процессов за обозримые периоды современных инструментальных наблюдений (3 десятилетия) и стабильной блоковой кинематике древних платформ, подверженных их влиянию. При этом вариации спрединга в прошлые геологические эпохи проявляются в виде малых, медленно меняющихся внутриплитных деформаций таких платформ, на фоне которых кинематика геодезических пунктов, расположенных вдали от пограничных деформаций, остается стабильной и предсказуемой. Это обстоятельство делает их надёжной отсчетной основой для высокоточного координатного обеспечения в пределах Северной Евразии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Заключение данной диссертации подводит итог проведённым исследованиям по изучению стабильности платформенных областей северной Евразии. Исследование проводилось в двух основных направлениях: детальный анализ Фенноскандии с акцентом на постледниковое поднятие и изучение территорий Российской Федерации и сопредельных регионов.

В первой части работы внимание было посвящено региону Фенноскандии, где присутствует постледниковое поднятие. В процессе исследования была обнаружена зона сжатия, которая служит маркером перехода от сводообразного поднятия к платформенным областям. Выявленные данные указывают на сложный характер взаимодействий между различными тектоническими структурами, что вносит вклад в общее понимание геодинамики платформенных областей.

Выявленная зона сжатия подтверждается сопоставлением вертикального поднятия, полученного по ГНСС с вариациями ускорения силы тяжести, полученными по спутниковым проектам GRACE и GRACE-FO.

Во второй части диссертации исследовалась большая территория, охватывающая всю Российскую Федерацию и несколько прилегающих регионов. В результате удалось построить карту зон растяжений и сжатий, что позволило выявить особенности тектонических процессов в регионе. В частности, было установлено, что западная часть региона подвержена процессам растяжения.

Сравнительный анализ данных ГНСС и палеомагнитных исследований показал, что в прошлые геологические эпохи скорость спрединга в исследуемом регионе была примерно в три раза выше, чем в настоящее время. Это замедление скорости спрединга является причиной наблюдаемого растяжения в западной части региона. Эти результаты предоставляют важные сведения о долгосрочных изменениях геодинамических процессов, что способствует более глубокому пониманию истории геологического развития региона.

В процессе исследования были переобработаны большие массивы данных ГНСС, что послужило фундаментом для обновления государственной системы отсчета координат. Эта система имеет потенциально широкое применение в различных областях науки и техники, включая мониторинг тектонических движений землетрясений и инженерных сооружений.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в периодических изданиях рекомендованных ВАК:

1. Стеблов Г. М., Мельник Г. Э., Погорелов В. В., Постледниковое движение и вариации гравитационного поля в пределах Балтийского щита // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. — 2025.
2. Н. А. Бовшин, А. Ю. Лапшин, Г. Э. Мельник, В. В. Попадьев Результаты последнего уравнивания ФАГС в системе ITRF // Труды Института прикладной астрономии РАН. — 2025. — № 72. — С. 1.
3. Стеблов Г. М., член-корреспондент РАН Шебалин П. Н., Мельник Г. Э. Высокоточные спутниковые геодезические измерения и геодинамические исследования на территории Северной Евразии: состояние и перспективы // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. — 2024. — Т. 518, № 9. — С. 195–204.
4. Мельник Г.Э., Ощепков И. О точности определения скоростей движения геодезических пунктов // Труды Института прикладной астрономии РАН. — 2024. — Т. 69. — С. 26–38.
5. Мельник Г. Э., Стеблов Г. М. СТАБИЛЬНОСТЬ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ ГЕОДЕЗИИ // Физика Земли. — 2024. — № 2. — С. 85–97.
6. Галаганов О.Н., Гусева Т.В., Крупенникова И.С., Мельник Г.Э., Мокрова А.Н., Передерин В.П., Передерин Ф.В., Розенберг Н.К. Сопоставление деформационного поля и сейсмического потока территорий Крыма и Северного Кавказа в зоне коллизии Евразийской и Аравийской литосферных плит // Мониторинг. Наука и технологии. — 2023. — № 1. — С. 1.
7. Стеблов Г.М., Агибалов А.О., Мельник Г.Э., Передерин В.П., Передерин Ф.В., Сенцов А.А. Анализ современных движений и деформаций земной коры Фенноскандии по данным ГНСС // Физика Земли. — 2022. — № 4. — С. 19–29.
8. Мельник Г.Э., Стеблов Г.М., Галаганов О.Н., Крупенникова И.С., Мокрова А.Н., Розенберг Н.К., Передерин Ф.В., Передерин В.П. Исследование постледниковых движений Фенноскандии по данным глобальных навигационных спутниковых систем // Геодезия и картография. — 2022. — № 2.

Публикации в прочих изданиях:

1. Мельник Г. Э., Шукуров З. Ф. ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОЙ АКТИВНОСТИ ЗОНЫ КАРЖАНТАУСКОГО РАЗЛОМА ПО ДАННЫМ ПОСТОЯННО ДЕЙСТВУЮЩИХ gps СТАНЦИЙ // Современные техника и технологии в научных исследованиях : Сборник материалов XV Международной конференции молодых ученых и студентов, Бишкек, 26–28 апреля 2023 года. — Научная станция РАН в г. Бишкеке Бишкек: 2023. — С. 224–226.

2. **Мельник Г. Э.**, Стеблов Г. Исследование стабильности платформенных областей на территорию Северной Евразии // Сборник тезисов III Всероссийская научная конференция с международным участием Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений. — 2023.
3. **Мельник Г. Э.**, Ощепков И. Точность определения скоростей движения геодезических пунктов // Сборник тезисов ФУНДАМЕНТАЛЬНОЕ И ПРИКЛАДНОЕ КООРДИНАТНО-ВРЕМЕННОЕ И НАВИГАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ (КВНО-2023). — 2023.
4. **Мельник Г. Э.**, Агибалов А. О., Сенцов А. А. Изучение современного напряженно-деформированного состояния Фенноскандии по данным ГНСС // Материалы Международного молодежного научного форума Ломоносов-2022 / Под ред. И. А. Алешковский, А. В. Андриянов, Е. А. Антипов, Е. И. Зимакова. — Москва: ООО МАКС Пресс, 2022.
5. **Мельник Г. Э.**, Стеблов Г. М. Исследование постледниковых движений Фенноскандии по зарубежным и российским данным ГНСС // Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН. Тезисы и программа конференции. — М.: ИФЗ РАН, 2021. — С. 45–45.
6. Гусева Т.В., Крупенникова И.С., **Мельник Г.Э.**, Мокрова А.Н., Передерин В.П., Передерин Ф.В., Розенберг Н.К. Спутниковый геодинамический мониторинг в Карелии и прилегающих областях // Hortus botanicus. — 2021. — Т. 16. — С. 220–228.