

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ТЕОРИИ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ГЕОФИЗИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИТПЗ РАН)

УДК 550.348.436:551.24:550:34
Рег. N НИОКТР 124093000045-0
Рег. N ИКРБС

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИТПЗ РАН
чл.-корр. РАН

_____ П.Н. Шебалин
« ____ » _____ 2024 г.

ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ РАЗНОМАСШТАБНОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО
МОНИТОРИНГА НА КАМЧАТКЕ
(промежуточный, этап 2024 года)

Руководитель НИР,
гл. науч. сотр., зав. лаб.,
д.ф.-м.н., профессор РАН

_____ Г.М. Стеблов
Подпись, дата

Москва 2024

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР, гл. науч. сотр., зав. лаб., д.ф.-м.н., проф. РАН	_____ Подпись, дата	Г.М. Стеблов (введение, раздел 1,2,3, заключение)
Исполнители:		
ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук	_____ Подпись, дата	А.А. Баранов (раздел 1)
ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук	_____ Подпись, дата	И.С. Владимирова (раздел 1)
науч. сотр. канд. физ.-мат. наук	_____ Подпись, дата	В.А. Тимофеева (раздел 2)
мл. науч. сотр.	_____ Подпись, дата	Г.Э. Мельник (раздел 1,2)
мл. науч. сотр.	_____ Подпись, дата	М.С. Гридчина (раздел 2)
науч. сотр.	_____ Подпись, дата	В.С. Вдовин (раздел 1)
мл. науч. сотр.	_____ Подпись, дата	Я.В. Туркин (раздел 1)
Нормоконтроль	_____ Подпись, дата	О.В. Селюцкая

РЕФЕРАТ

Отчет 32 с., 1 кн., 16 рис., 15 источн., 1 прил.

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ, КАМЧАТКА, СЕЙСМИЧЕСКАЯ И ВУЛКАНИЧЕСКАЯ ОПАСНОСТЬ, СПУТНИКОВАЯ ГЕОДЕЗИЯ, СОВРЕМЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ, ГНСС

Исследования по теме НИР выполняются в рамках Комплексной межведомственной программы по изучению и развитию уникальной территории Камчатского края «Третья Камчатская экспедиция» по направлению «Вулканология и сейсмология Камчатки» в сотрудничестве с Камчатским филиалом Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» и с Институтом вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук. Исследования, проводимые по теме в 2024 г., включали: разработку теоретических основ изучения тектонической активности подвижных регионов Северной Евразии на различных масштабных уровнях на основе комплексной интерпретации спутниковых геодезических данных Камчатской региональной наблюдательной сети и развиваемой в настоящее время высокоточной континентальной опорной сети ГНСС; решение методических и практических вопросов развития Камчатского регионального наблюдательного полигона на основе спутниковых геодезических систем. В рамках разработки теоретических вопросов анализировалась взаимосвязь глобальных, континентальных и региональных геодинамических процессов и их проявлений при моделировании движений земной поверхности в региональном масштабе для выявления закономерностей движений в межплитовой контактной зоне и для разделения эффектов от процессов различных масштабов в наблюдаемых поверхностных движениях. В рамках проработки методических и практических вопросов рассматривалось формирование высокоточной отсчетной основы для обработки исходных измерений Камчатской региональной сети ГНСС с оценкой достижимости точности координатных определений, приемлемой для последующей геодинамической интерпретации, а также вопросы развития и сгущения существующей наблюдательной сети на Камчатке и организации системы регулярной обработки исходных измерений ГНСС.

СОДЕРЖАНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	5
ВВЕДЕНИЕ	6
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ.....	8
1 Построение отсчетной основы геодинамического назначения	8
2 Идентификация разномасштабных геодинамических процессов на Камчатке	18
3 Организация системы спутникового геодезического мониторинга вулканической и сейсмической активности на Камчатке	25
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	28
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	30
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Публикации по теме НИР, изданные в 2024 г.	32

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ФАГС	—	Фундаментальная астрономо-геодезическая сеть
СДКМ	—	Система дифференциальной коррекции и мониторинга
ГНСС	—	Глобальные навигационные спутниковые системы (GPS, ГЛОНАСС и др.)
IGS	—	International GNSS Service — Международная служба ГНСС
ВОМО	—	Высокоточное относительное местоопределение
ВАМО	—	Высокоточное абсолютное местоопределение

ВВЕДЕНИЕ

Исследования широкого спектра известных геодинамических процессов различных пространственно-временных масштабов базируется в настоящее время на комплексном применении различных видов инструментальных наблюдений, среди которых все большее место занимают спутниковые геодезические измерения на базе систем ГНСС. Применение систем ГНСС показало свою эффективность для решения задач геодинамики, в частности, для оценки сейсмической и вулканической опасности, в течение последних трех десятилетий повсеместных наблюдений в регионах сейсмической и вулканической активности. Наиболее важные аспекты применения систем ГНСС в задачах геодинамики состоят в возможности мониторинга медленных (криповых) движений в земной коре, отражающих процессы подготовки сильных землетрясений и извержений вулканов. Сейсмические процессы (включая предсейсмические, постсейсмические) и вулканизм относятся к числу процессов, наиболее интенсивно проявляющихся на Камчатке.

В основе исследования современных движений земной коры с помощью систем ГНСС лежит анализ смещений наблюдательных пунктов на земной поверхности по результатам анализа регулярных последовательных координатных определений этих пунктов. Пространственно-временная разрешающая способность системы спутниковых геодезических наблюдений определяется, соответственно, пространственной регулярностью покрытия и режимом наблюдений, что, в свою очередь обуславливает возможность выделения в наблюдаемых смещениях земной поверхности проявлений процессов различных пространственно-временных масштабов и возможность их последующего разделения. С учетом интенсивности проявления различных тектонических процессов в виде движений земной поверхности на уровне сантиметров, возможность их геодинамической интерпретации зависит от точности координатных определений на всех масштабных уровнях, от локального до глобального, в единой самосогласованной системе отсчета.

Согласно указанным концептуальным аспектам спутниковых геодинамических исследований, за отчетный период в рамках выполнения темы НИР были проанализированы вопросы формирования высокоточной отсчетной основы для обработки исходных измерений Камчатской региональной сети ГНСС с оценкой достижимости точности координатных определений, приемлемой для последующей геодинамической интерпретации, вопросы моделирования тектонических процессов различных пространственно-временных масштабов, которые проявляются на Камчатке, а также вопросы развития и сгущения существующей наблюдательной сети на Камчатке.

В целом, теоретические и практические вопросы, рассмотренные в ходе выполнения работ по теме НИР направлены на создание комплексных физических и математических моделей извержения вулканов и моделей вулканических аппаратов, на разработку методик контроля состояния и дистанционного мониторинга действующих вулканов для создания системы разномасштабного сейсмического и геодинамического мониторинга на Камчатке.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1 Построение отсчетной основы геодинамического назначения

Прецизионная отсчетная основа наземного базирования, применимая для решения геодезических и геодинамических задач различного масштаба, включая глобальный, формируется из распределенной сети опорных пунктов на земной поверхности, координаты которых определены и согласованы между собой и с положением геоцентра. Практическое применение отсчетной основы достигается применением технологий вычисления взаимного положения опорных и определяемых пунктов, что обеспечивает возможность определения координат произвольных пунктов пользователя в системе координат, реализуемой такой отсчетной основой. С учетом тектонических факторов непрерывных изменений взаимного положения физических точек земной поверхности поддержание такой согласованности в длительной перспективе требует многолетних начальных наблюдений и выделения опорной сети, состоящей из пунктов со стабильной предсказуемой взаимной кинематикой. В наибольшей степени такому требованию удовлетворяют пункты, расположенные во внутренних платформенных областях литосферных плит, где кинематика земной поверхности определяется движениями литосферных плит, что обуславливает стационарность горизонтальных линейных скоростей каждого такого пункта на протяжении миллионов лет [Стеблов Г.М. и др., 2024].

Подавляющая часть современных геодезических систем базируется на космических геодезических технологиях, из которых наибольшее распространение получила система ГНСС благодаря компактности и относительной легкости монтажа наземной измерительной аппаратуры, а также возможности ее автономной работы. Общая концепция введения и реализации земной геоцентрической системы координат отражена в опубликованном в 2020 г. международном стандарте ISO 19161-1:2020 [Международный стандарт, 2020]. Данный стандарт разработан на базе положений, принятых Международным Союзом Геодезии и Геофизики (IUGG) и входящей в него Международной Ассоциацией Геодезии (IAG), а также Международным Астрономическим Союзом (IAU). Согласно данному стандарту, базовая реализация международной (геоцентрической) земной системы координат (ITRS) строится в виде международной земной системы отсчета (ITRF) на основе уравнивания многолетних глобальных наблюдений по четырем космическим геодезическим технологиям: ГНСС, РСДБ, ЛЛС, ДОРИС. Введенная с помощью перечисленных космических технологий международная земная система отсчета (ITRF), позволила в большинстве случаев решать геодезические и

геодинамические задачи на независимой от других технологий основе, в геоцентрических координатах.

Для реализации геоцентрической системы координат в виде отсчетной основы, состоящей из сети опорных пунктов ГНСС, плотность покрытия земной поверхности этими пунктами должна обеспечивать возможность уравнивания взаимного положения между ними и высокоточной привязки к ним определяемых пунктов потребителя с помощью существующих алгоритмов и программных средств.

В течение последних 3-х десятилетий в качестве опорной сети для решения геодинамических задач в глобальном масштабе служили пункты Международной службы ГНСС (IGS), реализующие ITRS в виде периодически уточняемых версий ITRF, по мере накопления каждые несколько лет новых данных ГНСС, РСДБ, ЛЛС, ДОРИС. При этом потребителю, использующему аппаратуру ГНСС, предоставлялась из IGS информация, необходимая для высокоточного относительного местоопределения (ВОМО), которая включала: первичные радионавигационные измерения на опорных пунктах ГНСС, синхронные с измерениями потребителя; оценки координат опорных пунктов ГНСС на период наблюдений потребителя; эфемеридно-временную и другую сопроводительную информацию; коэффициенты корреляции между ними. Задача местоопределения потребителя в этом случае сводится к решению уравнений, связывающих синхронные спутниковые радиодальномерные отсчеты на определяемых и опорных пунктах с разностями координат этих пунктов. Такой подход реализует фильтрацию пространственно-коррелированных помех путем дифференциальной коррекции, что отличает методику ВОМО от методов высокоточных абсолютных местоопределений (ВАМО). Разработанные за последние 3 десятилетия специализированные программные пакеты обеспечивают эффективную фильтрацию большей части помех, искажающих первичные спутниковые отсчеты:

- задержки радиосигнала в ионизированной и нейтральной части атмосферы,
- погрешности орбитальной эфемеридной информации,
- вариации параметров вращения Земли,
- рассогласование временной шкалы бортовой и наземной аппаратуры,
- целочисленная неопределенность фазовых измерений,
- многолучевой прием сигнала,
- приливные смещения земной поверхности.

Методика фильтрации помех базируется на моделировании искажающих факторов с известными физическими свойствами, совместном уравнивании параметров искажений с определяемыми координатами, сглаживании несмещенных возмущений путем осреднения

во временной области. Применение указанной выше дифференциальной коррекции позволяет дополнительно существенно снизить итоговую погрешность координатных определений и достичь миллиметрового уровня точности [Herring T.A. et al, 2016] методом длиннобазисных ВОМО. При этом для каждой пары наземных наблюдательных пунктов ГНСС, как опорных, так и определяемых, возможность совместного уравнивания исходных спутниковых наблюдений на этих пунктах ограничивается расстоянием между ними, при котором достигается достаточное количество одновременно видимых спутников без потери связи с ними в течение продолжительного интервала времени (4-6 часов), что выполняется при взаимном удалении пунктов до 2-3 тысяч километров. В результате для решения большинства задач геодинамического мониторинга (тектонических и техногенных процессов) в северной части Евразии было достаточно сравнительно небольшого количества опорных станций, равномерно покрывающих всю ее территорию и интегрированных в Международную службу ГНСС (IGS) (рис. 1.1). Количество таких станций на территории РФ составляло в разное время до 21.

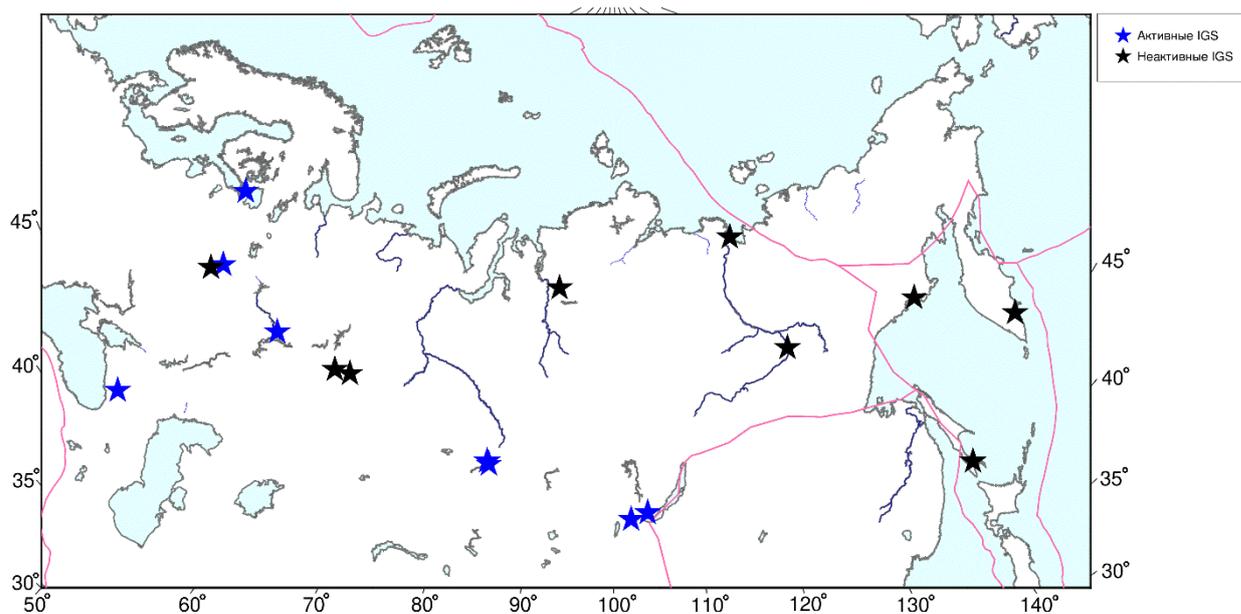


Рисунок 1.1. Пункты IGS в северной части Евразии (Границы плит – MORVEL56 [Argus D. F. et al, 2011])

В настоящее время, на территории РФ имеет место значительный прогресс с развитием наземных сетей опорных пунктов ГНСС различной ведомственной принадлежности, которые по качеству аппаратуры, методике ее установки и эксплуатации, не уступают мировым стандартам, применяемым в IGS (рис. 1.2). К таким сетям наивысшего качества относятся: фундаментальная астрономо-геодезическая сеть (ФАГС), управляемая ППК «Роскадастр» и сеть базовых станций (БС) системы

дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ-КФД), управляемая АО «Российские космические системы». Количество продолжительно и непрерывно действующих станций ГНСС каждой из приведенных сетей насчитывает не менее нескольких десятков (в том числе более 100 установленных пунктов ФАГС), что, в совокупности, образует значительно более плотное покрытие территории РФ, чем прежняя сеть станций IGS на рисунке 1.1. Результаты анализа данных по этим сетям подтверждают их приемлемость для достижения обозначенных выше целей по обеспечению высокоточной информацией, необходимой для геодинимических исследований.

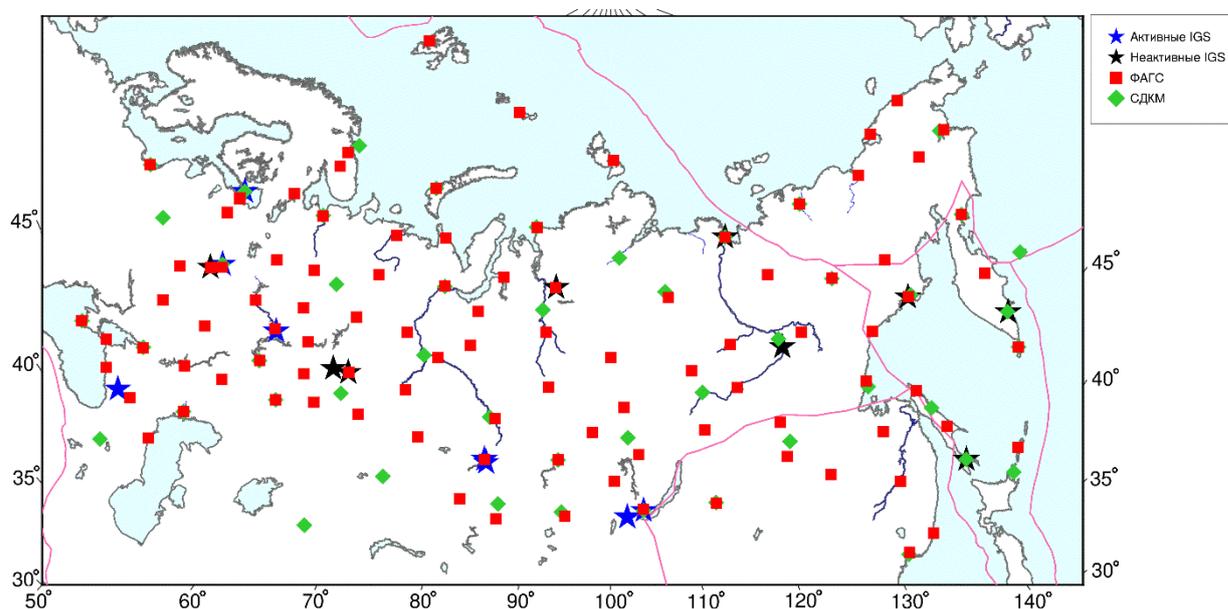


Рисунок 1.2. Активные пункты ГНСС в северной части Евразии (Границы плит – как на рис.1.1)

Геодинимические процессы, определяющие подвижность твердой земной поверхности на уровне разрешающей способности современной космической геодезии:

эндогенные:

- движения литосферных плит;
- сейсмические процессы, включая предсейсмические и постсейсмические;
- астеносферные течения;
- постледниковая изостатическая компенсация;
- вулканизм;
- вариации параметров вращения и фигуры Земли, положение геоцентра;

экзогенные:

- приливные воздействия небесных тел;

– перераспределение масс подвижных оболочек Земли (атмосфера, гидросфера, криосфера).

техногенные:

– последствия эксплуатации недр (добыча рудных и нефтегазовых ископаемых).

Все приведенные процессы характеризуются различной интенсивностью и различными пространственными и временными масштабами, длятся от нескольких секунд до многих тысячелетий, охватывают земную поверхность в пределах от нескольких километров до всего земного шара, включают как горизонтальные, так и вертикальные смещения, достигающие величины от нескольких миллиметров до метров за обозримые периоды наблюдений (в несколько лет).

Предсказуемость взаимной кинематики опорных пунктов, обеспечивающая их приемлемость в качестве отсчетной основы в длительной перспективе, определяется точностью моделирования геодинамических факторов, вызывающих смещения и деформации земной поверхности. В наибольшей степени условию предсказуемости отвечают пункты, расположенные во внутренних платформенных областях литосферных плит, которые характеризуются стационарностью горизонтальных линейных скоростей каждого такого пункта на протяжении миллионов лет.

Стабильность кинематики платформенных областей литосферных плит подтверждается построением геодинамической модели современной Земли на основе глобальной модели сейсмической томографии SMEAN2 [Лобковский Л.И. и др., 2024]. Для сферической модели Земли было получено решение уравнения Стокса для вязкой жидкости на основе данных сейсмической томографии методом конечных элементов с помощью программного кода CitcomS. Полученные распределения аномалий температуры и поля скоростей мантийных течений объясняют основные особенности современной геодинамики северной части Евразии. Согласно расчетам, в мантии Земли сформировано несколько глобальных конвекционных ячеек, ответственных за общую геодинамику и верхнемантийные течения, связанные с общей системой литосферных плит, срединно-океанических хребтов, зон субдукции и коллизии (рис. 1.3). Исходя из реологии мантии, размеров конвективных ячеек и скорости мантийных течений, распространение изменений в кинематике крупных литосферных плит занимает миллионы и десятки миллионов лет (рис. 1.4). Более мелкие верхнемантийные ячейки и микроплиты формируют региональные структуры на поверхности Земли.

Для локальных и региональных процессов в литосфере, происходящих в течение десятков-сотен лет, таких как вулканизм и сейсмичность, медленные конвективные

мантейные процессы с характерными временами изменения порядка миллионов и десятков миллионов лет являются фоновыми и могут рассматриваться как стационарные.

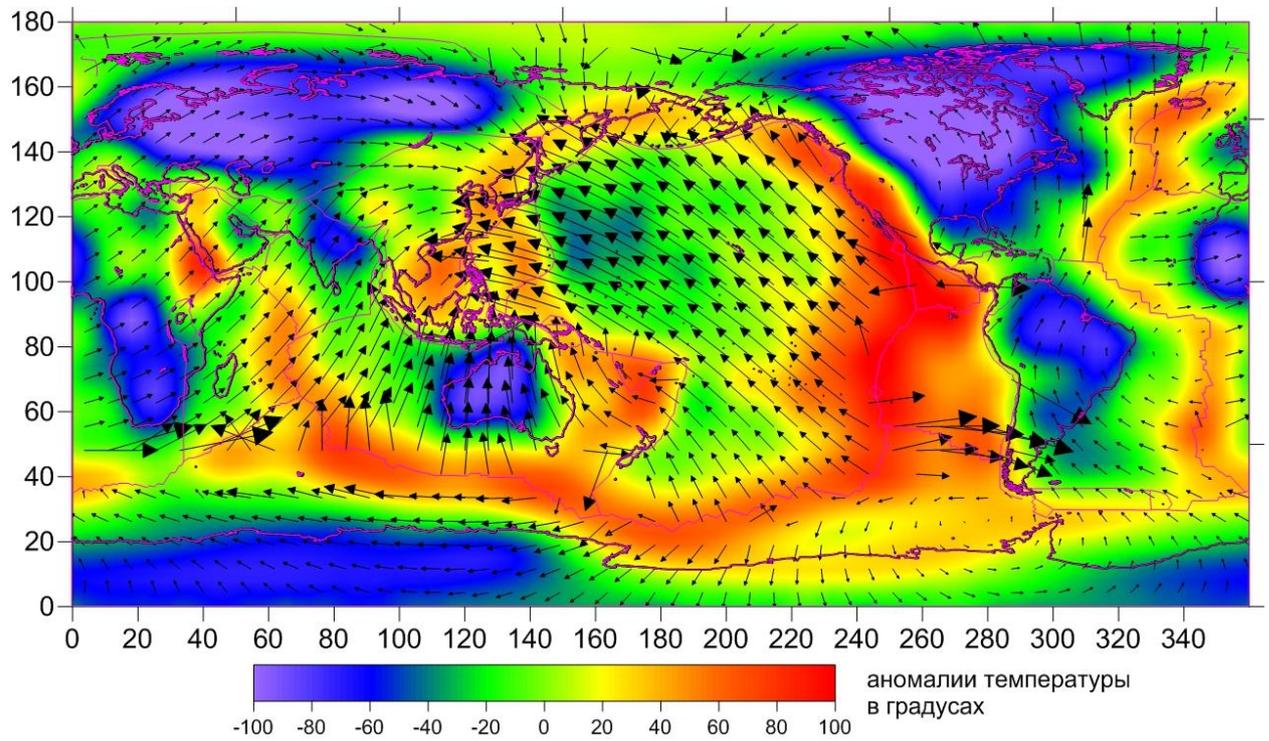


Рисунок 1.3. Распределение аномалий температуры в мантии на глубине 75 км и рассчитанные скорости движения плит на поверхности

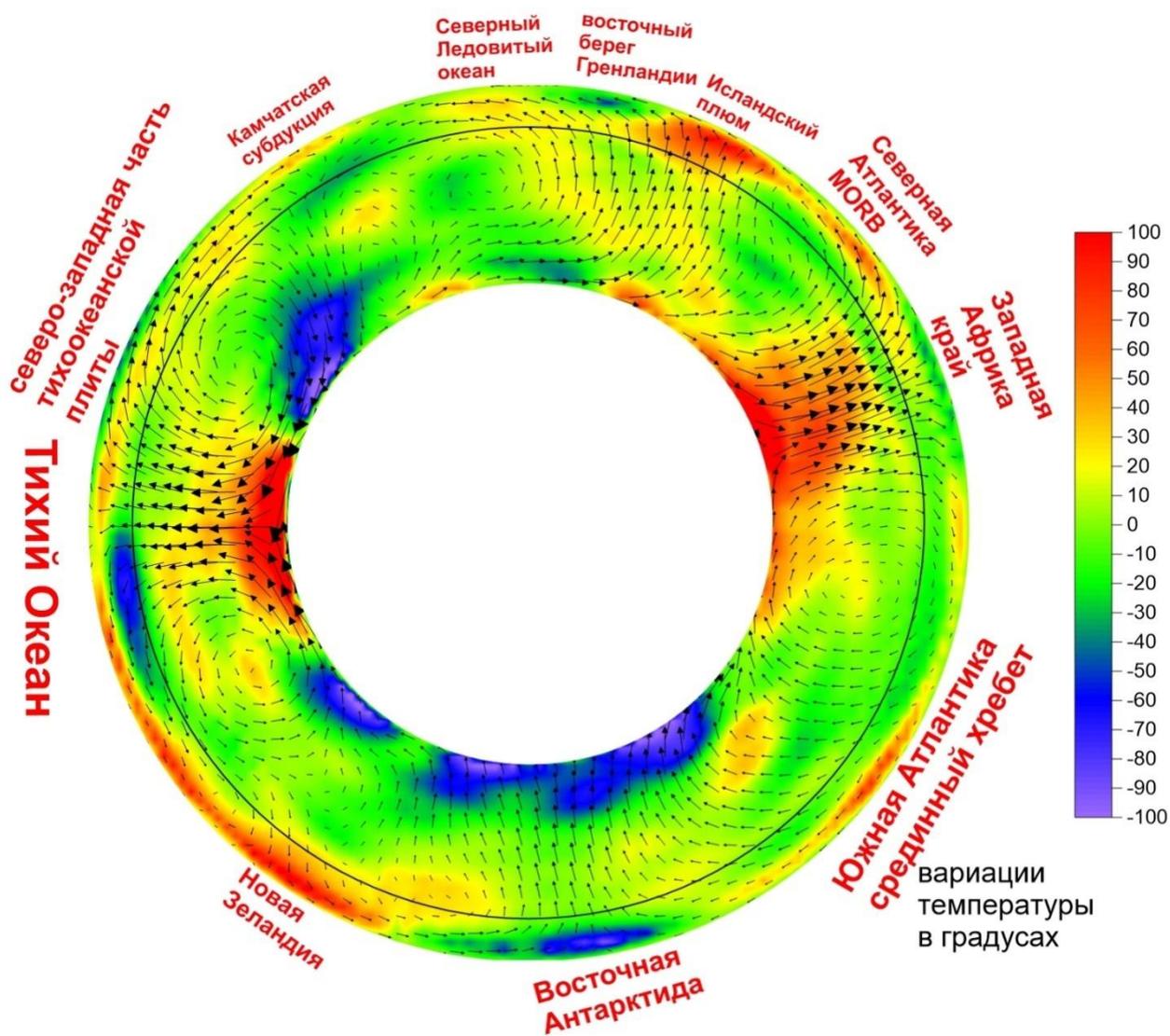


Рисунок 1.4. Распределение скоростей течений и аномалий температуры в мантии Земли в сечении по 160 и 340 градусу восточной долготы

К настоящему времени, значительная часть наблюдательных пунктов, находящихся на территории Российской Федерации, проработала достаточно продолжительное время, чтобы определять по ним скорости смещений земной поверхности с приемлемой точностью и анализировать пространственные вариации этих движений. Из первичной спутниковой измерительной информации по всем пунктам Российской фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС) были вычислены скорости движения этих пунктов в общеземной геоцентрической системе отсчета [Мельник Г.Э. и др., 2024].

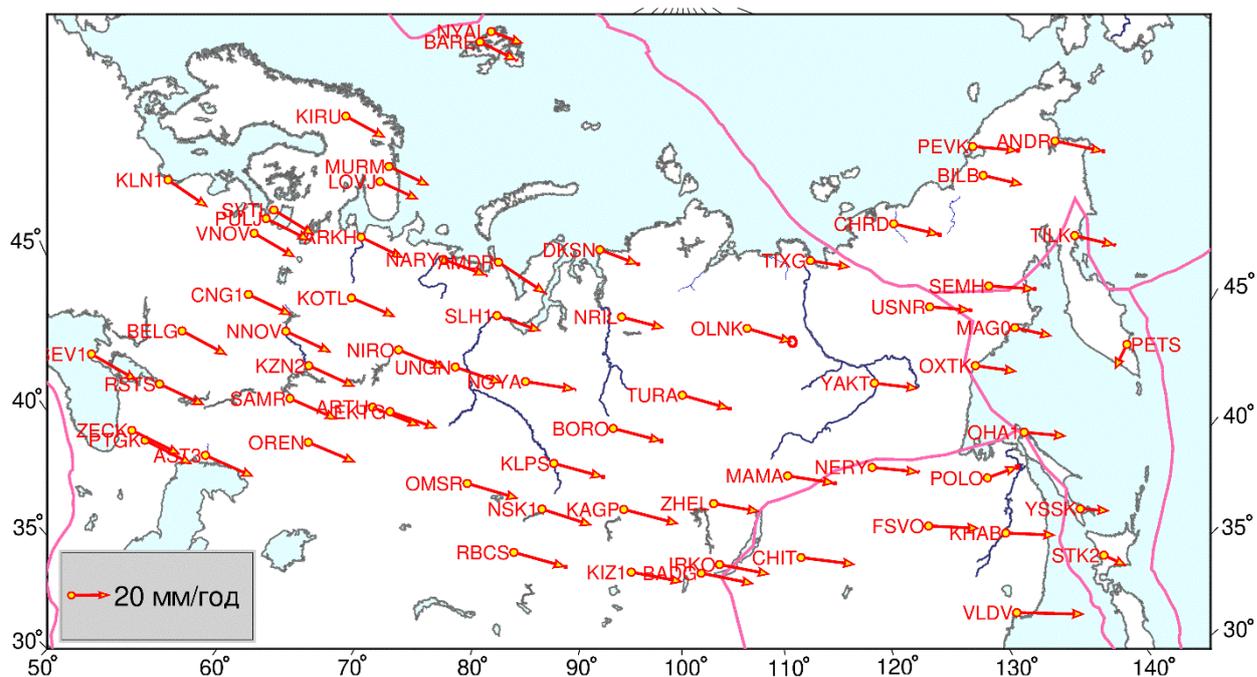


Рисунок 1.5. Горизонтальные скорости пунктов ФАГС (Росреестра) по данным ГНСС в общеземной геоцентрической системе координат ITRF2014 (Границы плит – как на рис.1.1)

В результате оптимизированной триангуляции с вершинами в наблюдательных пунктах было построено поле скорости плоской деформации (рис. 1.6).

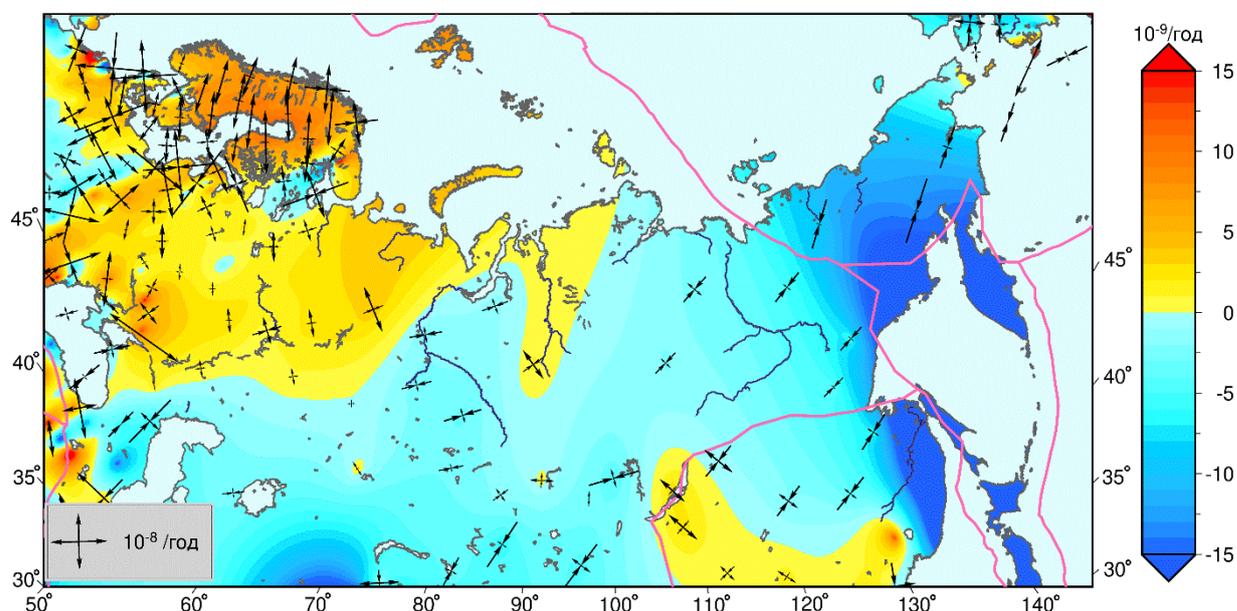


Рисунок 1.6. Стабильность Северной Евразии по данным ГНСС (Границы плит – как на рис.1.1)

Построенное распределение деформаций подтверждает тектоническую жесткость древних платформ, слагающих северную часть Евразии: Восточно-Европейской, Западно-Сибирской, Сибирской. Учитывая конфигурацию конвективных потоков земной мантии в

качестве основного фактора, определяющего движения этих платформ, можно сделать вывод о пренебрежимо малых вариациях этих движений за обозримые периоды современных инструментальных наблюдений (3 десятилетия). При этом вариации конвективных потоков в прошлые геологические эпохи проявляются в виде малых, медленно меняющихся внутриплитных деформаций таких платформ, на фоне которых кинематика геодезических опорных пунктов, расположенных вдали от пограничных деформаций, остается стабильной и предсказуемой. Этот фактор делает их надежной составляющей для отсчетной основы геодинимического назначения в пределах Северной Евразии [Стеблов Г.М. и др, 2024]. Уравнивание всех таких пунктов, показанных на рис. 1.2, с глобально распределённой сетью пунктов ГНСС (рис. 1.7), выполненное с применением алгоритмов подавления указанных выше искажающих факторов исходных спутниковых отсчетов, включая дифференциальную коррекцию, подтверждает приемлемый уровень точности координатных определений для оценки как горизонтальных, так и вертикальных смещений наблюдательных пунктов ГНСС. Стабильность и предсказуемость кинематики опорных пунктов ФАГС подтверждается устойчивыми линейными трендами их горизонтальных и вертикальных смещений, которые можно видеть на примере одного из опорных пунктов OREN в г. Оренбург (рис. 1.8).

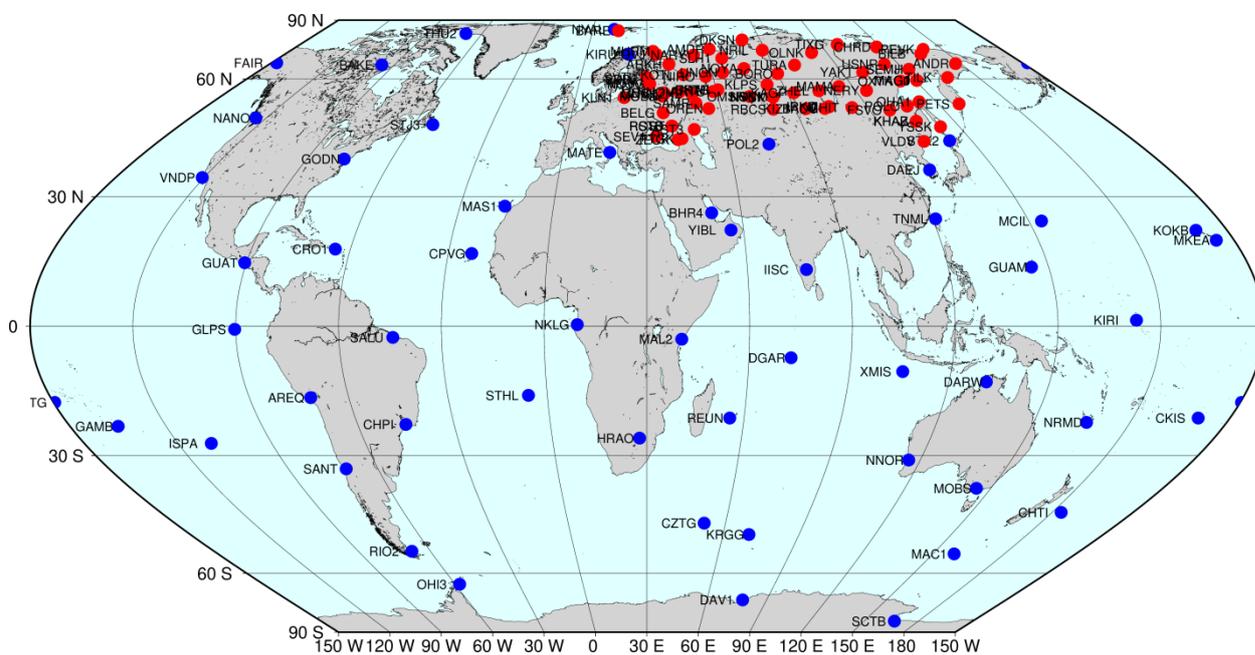


Рисунок 1.7. Глобально распределённая сеть пунктов ГНСС, включённых в формирование прототипа геоцентрической отсчетной основы

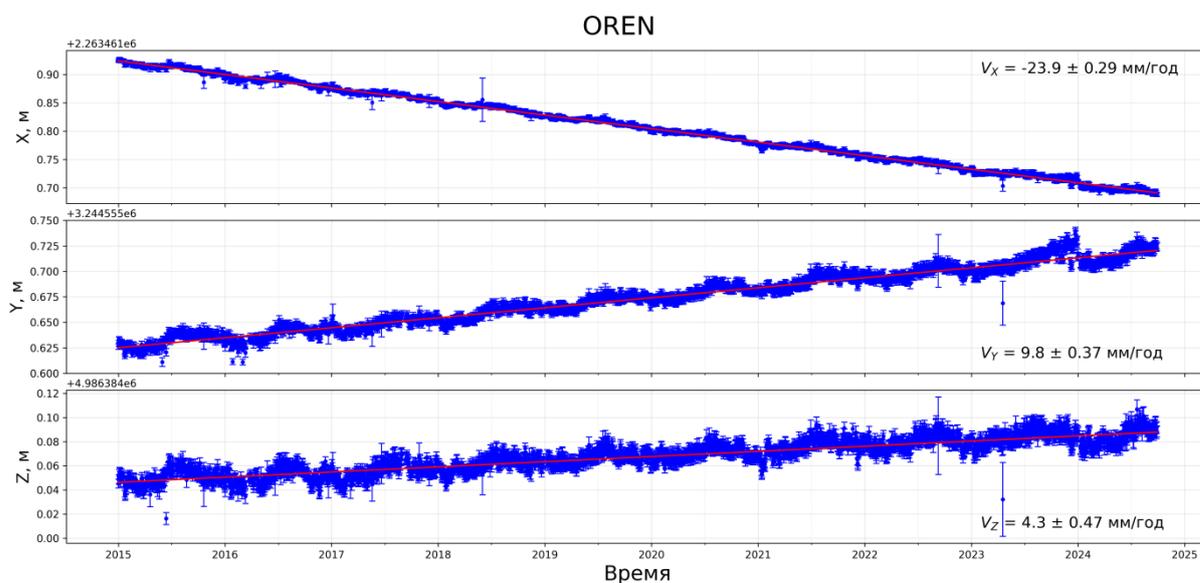
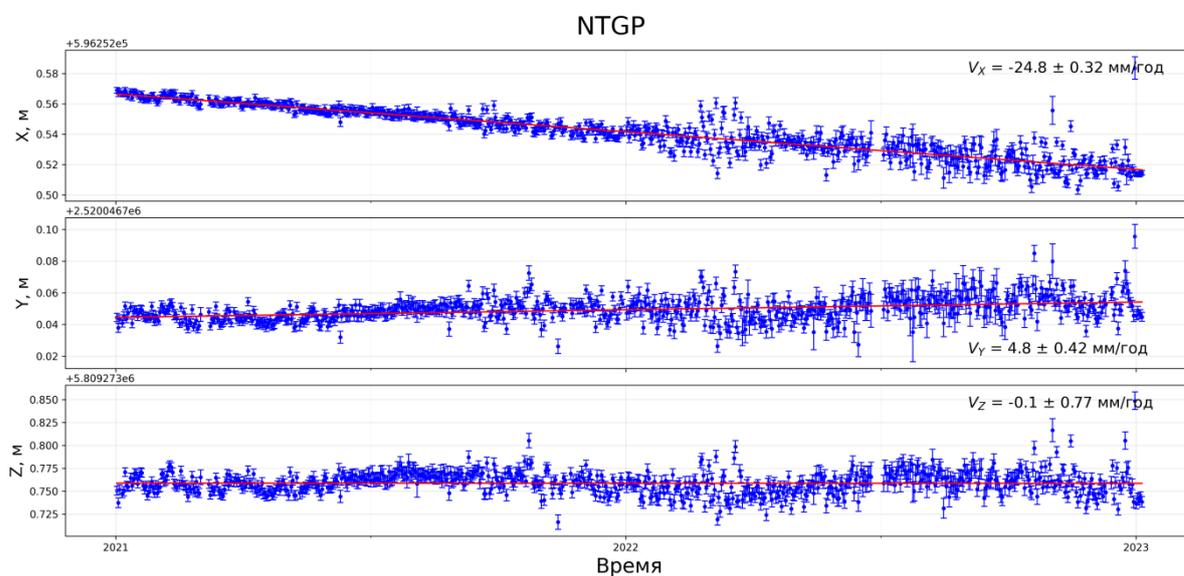


Рисунок 1.8. Временной ряд смещений пункта OREN сети ФАГС в г. Оренбург

Пример применения прототипа отсчетной основы, состоящей из опорных пунктов, показанных на рис. 1.7, для высокоточного относительного местоопределения наблюдательного пункта NTGP на одном из объектов геодинамического мониторинга показаны на рис. 1.9.

а)



б)

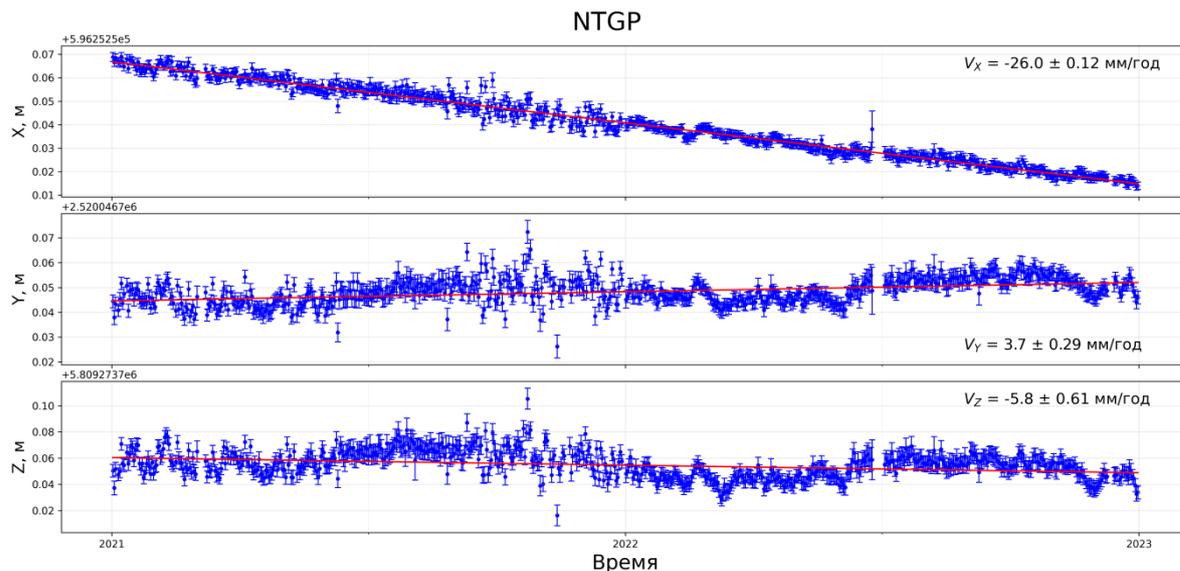


Рисунок 1.9. Временной ряд смещений пункта NTGP: (а) – с применением отсчетной основы, составленной пунктами IGS (рис. 1.1), (б) – с применением прототипа отсчетной основы, составленной пунктами ФАГС (рис. 1.2)

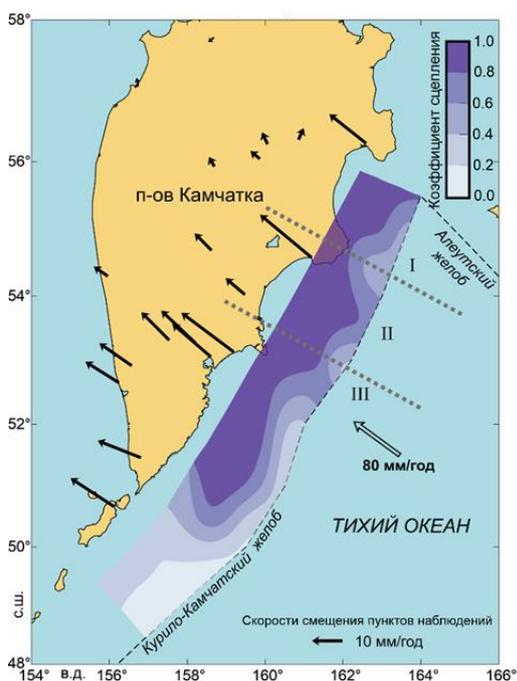
В отличие от предыдущих подходов к построению отсчетной основы с использованием в качестве опорного сегмента по Северной Евразии пунктов IGS на территории РФ (рис. 1.1), описанный подход с использованием всех установленных в настоящее время опорных пунктов ФАГС (рис. 1.2) не зависит от использования результатов обработки первичной измерительной информации ГНСС в международных центрах данных. Так заметное повышение разброса в оценках координат отмечается на графиках смещений наблюдательного пункта NTGP (рис. 1.9а) в 2022 г. после прекращения обработки большей части опорных пунктов IGS на территории РФ. В то же время, применение прототипа новой отсчетной основы, составленной пунктами ФАГС (рис. 1.2), показывает сохранение уровня разброса для данного пункта (рис. 1.9 б) вне зависимости от порядка обработки исходной измерительной информации в международных центрах данных. Тем самым подтверждается возможность построения отсчетной основы геодинимического назначения, составленной из пунктов ФАГС, применимой для мониторинга вулканической и сейсмической активности Камчатки.

2 Идентификация разномасштабных геодинимических процессов на Камчатке

Расположение Камчатки в зоне субдукции Тихоокеанской плиты определяет сочетание разномасштабных геодинимических процессов, проявляющихся в наблюдаемых движениях земной поверхности. По имеющимся архивным данным ГНСС по Камчатке можно сделать вывод об интенсивных деформациях, вызванных процессом погружения

Тихоокеанской плиты, проявляющихся как в горизонтальных, так и вертикальных смещениях поверхности полуострова (рис. 2.1).

а)



б)

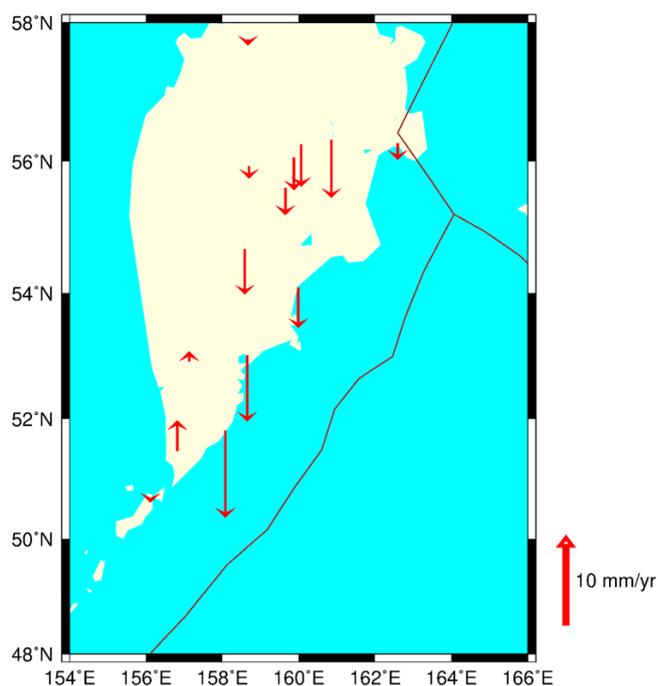


Рисунок 2.1. Горизонтальные (а) и вертикальные (б) смещения поверхности полуострова Камчатка, вызванные процессом погружения Тихоокеанской плиты

В свете задачи мониторинга вулканической активности наиболее важным является фактор вертикальных движений на Камчатке, из которого вытекает необходимость решения вопроса о разделении составляющих в этих движениях, связанных с субдукцией и с вулканизмом. Из рисунка. 2.1 можно видеть, что пространственное распределение смещений на полуострове, в целом, согласуется с модельным распределением движений, обусловленных межплитовым сцеплением на контакте погружающейся океанической литосферы с континентальной окраиной (рис. 2.2). Согласно модели, нисходящие движения вблизи Курило-Камчатского желоба сменяются восходящими движениями по мере удаления от желоба в направлении субдукции.

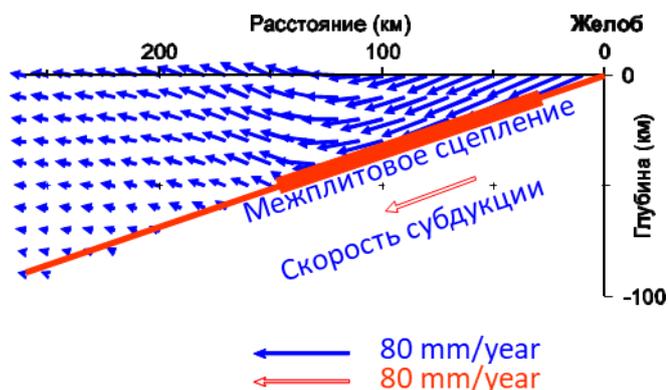


Рисунок 2.2. Модельные (расчетные) смещения поверхности полуострова Камчатка, вызванные процессом погружения Тихоокеанской плиты

В соответствии с этим направленные вниз вертикальные компоненты движений на восточном побережье Камчатки проявляют тенденцию к уменьшению и к смене на направление вверх при переходе к западному побережью полуострова. Таким образом, для выделения локальных компонент вертикальных движений в окрестности вулканической постройки, обусловленных продвижением магмы по подводящим каналам, необходимо оценить вертикальные компоненты движений земной поверхности, связанные с региональным фоном субдукционных движений. Один из возможных подходов к решению этого вопроса состоит в интерполяции вертикальных движений, измеренных по всему полуострову с помощью ГНСС (рис. 2.3 а) на пункты наблюдений ГНСС, планируемые к расстановке в окрестности Авачинской группы (рис. 2.3 б).

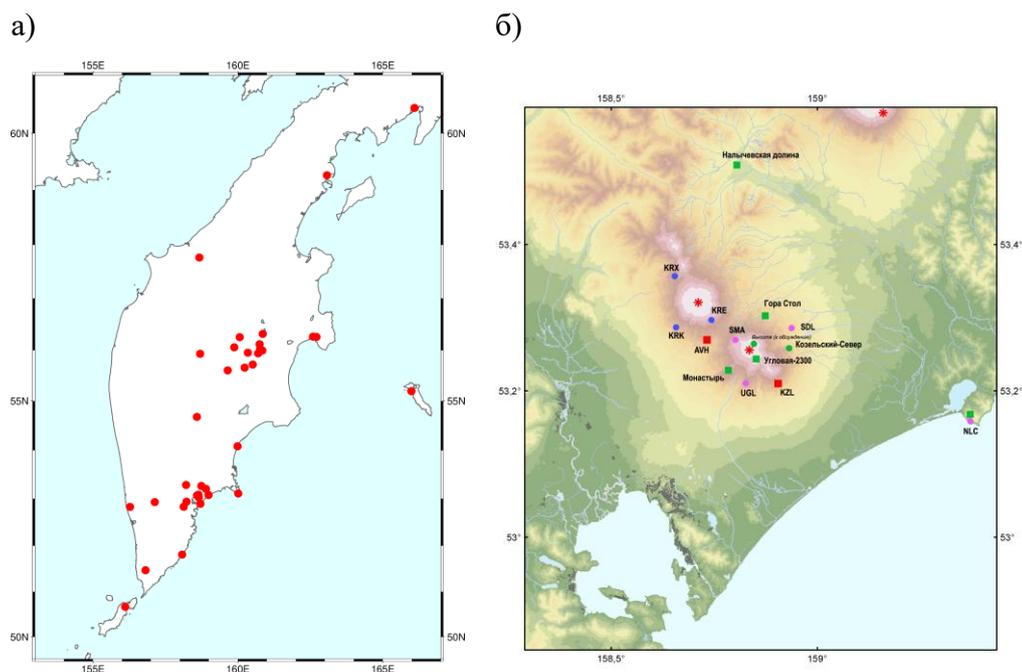


Рисунок 2.3. Существующие на Камчатке (а) и планируемые в окрестности Авачинской группы (б) пункты наблюдений ГНСС

Однако выбор пунктов, вертикальные движения которых не подвержены влиянию вулканических процессов, в значительной степени неоднозначен с учетом распространенности вулканов по территории полуострова, а также принимая во внимание возрастание неопределенности интерполяции по мере удаления от узлов сетки наблюдательных пунктов. Поэтому более обоснованным подходом представляется оценивание вертикальных движений, обусловленных субдукцией, путем моделирования самого процесса субдукции по измерениям, не подверженным влиянию вулканизма. Такими измерениями с достаточной мерой точности можно считать горизонтальные компоненты смещений наблюдательных пунктов ГНСС, отображенные на рисунке 2.1а. Тогда задача оценки субдукционной составляющей вертикальных движений пунктов ГНСС сводится к восстановлению движений на межплитовом контакте по наблюдаемым на земной поверхности горизонтальным составляющим движений пунктов ГНСС и вычислению из построенной модели вертикальных компонент смещений пунктов ГНСС, расположенных в окрестности вулканической постройки.

В общем случае для расчета кинематики разломно-блоковых структур существуют достаточно детально проработанные модели деформаций упругой (или вязкоупругой) среды, ограниченной свободной поверхностью, в условиях дислокаций, возникающей на фоне взаимного смещения смежных блоков как обратное смещением вследствие трения-сцепления на их контактной поверхности. Проявление заглубленных дислокаций в виде наблюдаемых смещений земной поверхности лежит в основе решения соответствующей обратной задачи, методы регуляризации которой зависят от плотности наблюдательной сети и необходимой детальности моделирования разломно-блоковой кинематики. Подробное описание теоретических основ спутникового геодезического мониторинга деформаций тектонически раздробленной среды содержится в [Steblov and Vladimirova, 2023].

В качестве количественной характеристики описания межплитовых деформаций в зонах субдукции, как правило, используется коэффициент межплитового сцепления φ , который для нормальной субдукции (скорость субдукции перпендикулярна простиранию межплитовой границы) определяется как отношение величины скорости смещения нижнего края нависающей плиты V_{lock} к величине скорости взаимного смещения плит V_{conv} :

$$\varphi = \frac{V_{lock}}{V_{conv}}, 0 \leq \varphi \leq 1, \quad (2.1)$$

причем φ стремится к нулю при свободном проскальзывании и достигает единицы при полном сцеплении. Результаты картирования распределенного межплитового

сцепления позволяют судить об интенсивности накопления упругих напряжений в контактной зоне.

Для численного моделирования движений измерительных пунктов воспользуемся подходом [Savage, 1983]. В рамках этой модели движение в зоне контакта плит определяется как суперпозиция стационарного скольжения со скоростью конвергенции плит V_{conv} и обратного смещения нижнего края нависающей континентальной плиты со скоростью V_{lock} , зависящей от степени межплитового сцепления (рис. 2.4).

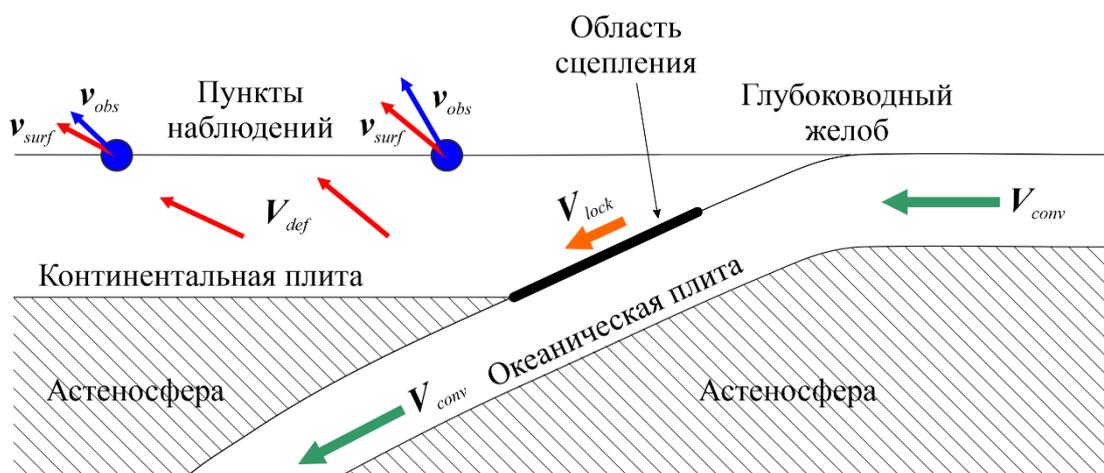


Рисунок 2.4. Схема тектонических движений и вызванных ими деформаций в зоне субдукции согласно модели [Savage, 1983]. Зеленые стрелки – скорость движения океанической плиты V_{conv} относительно континентальной, оранжевая стрелка – скорость обратного смещения V_{lock} нависающей континентальной плиты вдоль зоны контакта. Красные стрелки – модельные скорости деформаций V в нависающей литосферной плите и их поверхностная часть v_{surf} , синие стрелки – измеренные скорости v_{obs}

В данной модели скорость V смещений в нависающем крыле континентальной плиты связана со скоростью V_{lock} деформирования ее нижнего края сверткой с функцией Грина $G(r, r_s)$ вдоль контактной зоны S :

$$V(r) = \iint_S G(r, r_s) V_{lock}(r_s) dS \quad (2.2)$$

Измеренные методами спутниковой геодезии скорости смещений v_{obs} могут быть сопоставлены с модельными скоростями поверхностных смещений v_{surf} в тех же точках, что позволяет решить обратную задачу восстановления скорости V_{lock} и в дальнейшем отыскать распределение межплитового сцепления.

Искомое распределение коэффициента межплитового сцепления в зоне контакта плит является результатом решения обратной задачи:

$$\min_{V_{lock}(r_s)} \left\{ \sum_i \left| \iint_S G(r_i, r_s) V_{lock}(r_s) dS - v_{obs,i} \right|^2 + \lambda \|V_{lock}(r_s)\|^2 \right\} \quad (2.3)$$

Минимизируемый функционал в (2.3) выражает невязку смоделированных и наблюдаемых спутниковыми методами скоростей смещений и содержит

регуляризирующее слагаемое в виде нормы искомого решения. Здесь λ – положительный параметр регуляризации. Условиями получения устойчивого физически допустимого решения задачи (2.3) являются: 1) адекватный выбор параметра регуляризации λ из условия статистического согласия между итоговыми невязками и погрешностями исходных измерений; 2) разумная степень дискретизации расчетной области, соответствующая детальности измерений.

Существует несколько общеизвестных подходов к вычислению функции отклика среды $G(r_i, r_s)$. Так, в [Okada, 1985] представлены выражения для вычисления тензора деформации в однородном упругом изотропном полупространстве (рис. 2.5а) вследствие однородной заглубленной дислокации прямоугольной формы в конечном аналитическом виде. В работе [Pollitz, 1996] предложены теоретические основы для вычисления функции отклика в виде разложения по сферическим функциям для сферически-симметричной слоистой упругой среды (рис. 2.5б). Как показало численное моделирование, пренебрежение сферичностью и слоистостью Земли выражается в виде значительных погрешностей (20% и более) в оценке поверхностных смещений на больших расстояниях от источника дислокации [Стеблов и др., 2010]. Измерительные пункты, расположенные в пределах Курило-Камчатской гряды, отстоят от глубоководного желоба, являющегося верхней границей расчетной области, более чем на 150 км. Поэтому, во избежание неточностей вычислений свертки (2.2), для численного моделирования смещений земной поверхности используется второй подход, при этом радиально-неоднородное распределение упругих модулей в коре и верхней мантии задается моделью PREM [Dziewonski and Anderson, 1981]. Практическая реализация вычисления функции отклика $G(r_i, r_s)$ для упругой равновесной сферической среды осуществлена в программном пакете STATIC1D [URL: <https://www.usgs.gov/node/279409>].

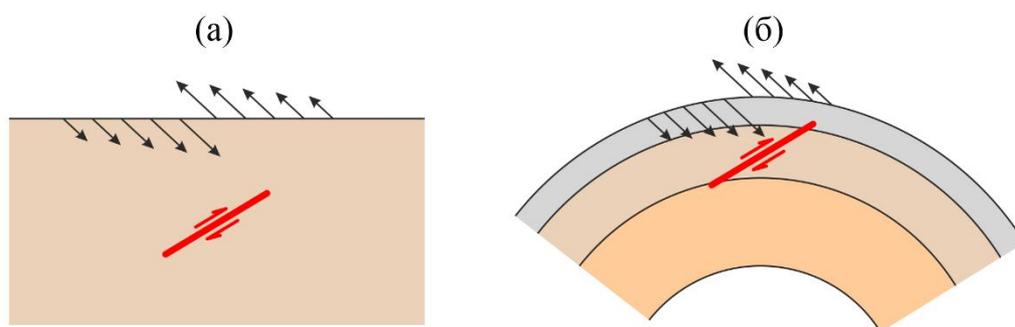


Рисунок 2.5. Модели среды для расчета деформаций вследствие заглубленной дислокации: а) однородное упругое полупространство б) слоистое упругое сферическое пространство

Решение обратной задачи (2.3) для участка Курило-Камчатской субдукционной зоны, ограниченного Камчатским мысом на севере и островом Парамушир на юге, по

имеющимся спутниковым геодезическим измерениям представлено на рис. 2.1а. Согласно результатам моделирования, области наиболее сильного межплитового сцепления и, прослеживаются практически вдоль всей протяженности побережья Камчатки, начиная с глубин 20–30 км. Такой результат вполне закономерен, т.к. для зон субдукции в целом характерно наличие в самой верхней их части узкой, шириной в несколько километров, полосы, насыщенной гидратированными осадками [Сорохтин и Лобковский, 1976].

Таким образом, предложенный подход к моделированию субдукционной составляющей вертикальных движений пунктов ГНСС позволяет вычесть их из наблюдаемых вертикальных движений, оставив для анализа составляющие, обусловленные вулканизмом.

Предложенный подход подразумевает использование горизонтальных компонент смещений пунктов ГНСС для моделирования субдукционных процессов. При этом следует иметь в виду, скорости смещений пунктов ГНСС в геоцентрической системе координат, реализуемой глобальной отсчетной основой, содержат не только компоненты, обусловленные субдукционными процессами деформирования континентальной окраины, но и блоковую составляющую движения литосферной плиты (рис. 2.6), которую необходимо вычесть для выделения деформационной составляющей в наблюдаемых скоростях смещений пунктов ГНСС.



Рисунок 2.6. Наблюдения ГНСС в зоне субдукции: региональные деформации и фоновая блоковая кинематика контактирующих литосферных плит

Полная скорость взаимного движения плит в произвольной точке их общей границы вычислялась в виде [Kogan and Steblov, 2008]:

$$\bar{V}_i = \bar{\Omega}_{1,2} \times \bar{R}_i,$$

где $\bar{\Omega}_{1,2}$ — 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 обеих плит.

Вектор Эйлера $\bar{\Omega}_{1,2}$ вычисляется как разность векторов Эйлера $\bar{\Omega}_1$ и $\bar{\Omega}_2$ каждой из двух плит в общеземной геоцентрической системе координат:

$$\bar{\Omega}_{1,2} = \bar{\Omega}_1 - \bar{\Omega}_2.$$

В свою очередь, векторы $\bar{\Omega}_1$ и $\bar{\Omega}_2$ вычисляются для каждой из плит по кластерам скоростей расположенных на них пунктов ГНСС, удовлетворяющих условию взаимной согласованности:

$$|\bar{V}_j - \bar{\Omega}_1 \times \bar{R}_j| \leq \delta, |\bar{V}_k - \bar{\Omega}_2 \times \bar{R}_k| \leq \delta,$$

где \bar{V}_j и \bar{R}_j — скорость и радиус-вектор j -той точки, расположенной на плите 1,

\bar{V}_k и \bar{R}_k — скорость и радиус-вектор k -той точки, расположенной на плите 2,

δ — пороговая невязка, включающая допустимое отклонение скоростей движения от блоковой кинематики недеформируемой плиты и погрешность измерений.

Таким образом, в данном разделе предложен подход к разделению геодинамических процессов различных масштабов, от локального до глобального, проявляющихся на Камчатке с целью выделения локальных деформационных составляющих, связанных с вулканизмом.

3 Организация системы спутникового геодезического мониторинга вулканической и сейсмической активности на Камчатке

В рамках проработки методических и практических вопросов развития Камчатского регионального наблюдательного полигона на основе спутниковых геодезических систем рассматривались вопросы организации системы регулярной обработки исходных измерений ГНСС с помощью специализированного программного обеспечения (GAMIT/GLOBK, [Herring et al., 2018]). Основные компоненты системы включают:

- сеть пунктов формирования исходных данных (ПФИД), состоящую из наблюдательных пунктов, оснащенных аппаратурой ГНСС и каналами управления и передачи измерительной информации;
- региональный (Камчатский) центр сбора, архивирования и обработки исходных данных;

- континентальный центр формирования отсчетной основы и обработки (уравнивания) исходных данных;
- каналы обмена исходной измерительной информацией и результатами ее обработки.

Функциональная схема взаимодействия центров сбора и обработки данных представлена на рис. 3.1.



Рисунок 3.1. Функциональная схема взаимодействия центров сбора и обработки данных

Основное предназначение центров данных, входящих в систему обработки данных ГНСС:

1. Региональный информационно-обработывающий центр (на базе Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН):

- а) сбор и архивирование региональных исходных данных ГНСС с пунктов формирования исходных данных;
- б) передача управляющих команд на пункты формирования исходных данных ГНСС;
- в) первичная обработка исходных данных ГНСС;
- г) конечная прецизионная обработка (уравнивание) результатов первичного уравнивания с применением прецизионной отсчетной основы.

2. Континентальный информационно-обработывающий центр (на базе ИТПЗ РАН):

- а) формирование прецизионной отсчетной основы для высокоточного относительного местоопределения по данным ГНСС;
- б) сбор и архивирование исходных данных ГНСС из регионального информационно-обработывающего центра;
- в) уравнивание региональных исходных данных ГНСС с применением прецизионной отсчетной основы, вычисление прецизионных координат региональных пунктов формирования исходных данных ГНСС;
- г) передача прецизионных координат региональных пунктов формирования исходных данных ГНСС в региональный информационно-обработывающий центр;
- д) анализ и интерпретация временных рядов координат пунктов формирования исходных данных ГНСС (выделение проявлений вулканической и сейсмотектонической активности региона наблюдений).

За отчетный период 2024 г. на базе вычислительных ресурсов ИТПЗ РАН реализованы основные составляющие системы обработки исходных измерений ГНСС:

- проведены тестовые расчеты для имеющегося набора архивных данных ГНСС с целью проверки возможности повышения точности координатных определений на Камчатке и достижимости показателей, необходимых для геодинамической интерпретации; при расчетах применялись элементы концепции построения высокоточной отсчетной основы геодинамического назначения, результаты тестовых вычислений показывают возможность и перспективность создания системно функционирующей высокоточной отсчетной основы геодинамического назначения;
- организованы двухсторонние каналы обмена данными между ИТПЗ РАН и Камчатским филиалом ФИЦ ЕГС РАН по стандартным протоколам передачи информации (ftp) между серверами обеих организаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования, проводимые по теме НИР в 2024 г., включали: разработку теоретических основ изучения тектонической активности Камчатки, а также проработку методических и практических вопросов развития Камчатского регионального наблюдательного полигона на основе спутниковых геодезических систем.

В рамках разработки теоретических вопросов изучения тектонической активности Камчатки проанализирована взаимосвязь глобальных, континентальных и региональных геодинамических процессов и их проявлений при моделировании движений земной поверхности. В свете задач мониторинга вулканической активности предложен подход для разделения вертикальных движений, обусловленных суммарным проявлением вулканизма и субдукции. Предлагаемый подход состоит в моделировании субдукционных движений по измерениям горизонтальных смещений пунктов ГНСС, которые можно считать неподверженными проявлениям вулканизма, с последующим вычитанием модельной вертикальной субдукционной составляющей из наблюдаемых движений. Кроме того, отмечена необходимость выделения в наблюдаемых горизонтальных смещениях пунктов ГНСС региональной деформационной составляющей на фоне блоковых движений контактирующих литосферных плит. Для этой цели предложено использовать модели блоковой кинематики литосферных плит, которые получаются из анализа движений пунктов ФАГС, расположенных в стабильных платформенных областях Северной Евразии, совместно с глобальными моделями движений литосферных плит и, соответственно, пунктов ГНСС мировой сети. Возможность такого моделирования проверена на тестовых вычислениях, направленных на построение прототипа отсчетной основы, составленной из пунктов ФАГС, которые показали применимость такого прототипа для решения геодинамических задач различного масштаба, включая глобальный, региональный и локальный. Кроме того, проведенные расчёты показали возможность и перспективность построения отсчетной основы геодинамического назначения вне зависимости от порядка обработки исходной измерительной информации в международных центрах данных.

В рамках решения методических и практических вопросов развития Камчатского регионального наблюдательного полигона на основе спутниковых геодезических систем рассмотрены вопросы сгущения существующей наблюдательной сети на Камчатке и организации системы регулярной обработки исходных измерений ГНСС. Для этой цели организованы двухсторонние каналы обмена данными между ИТПЗ РАН и Камчатским филиалом ФИЦ ЕГС РАН по стандартным протоколам передачи информации (ftp) между

серверами обеих организаций, и налажена система обработки исходной измерительной информации ГНСС, поступающей из Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН, на сервере ИТПЗ РАН.

В целом, проведённые на этапе 2024 г. работы позволяют перейти на последующих этапах к автоматизированной регулярной обработке данных ГНСС Камчатки и их геодинамической интерпретации во взаимодействии с Камчатским филиалом ФИЦ ЕГС РАН.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лобковский Л.И., Баранов А. А., Бобров, А.М. Чуваев А. В. Глобальная геодинамическая модель современной Земли и ее приложение для Арктического региона // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2024. Т. 514. № 2. С. 293-299. DOI: 10.31857/S2686739724020125.
2. Международный стандарт ISO 19161-1:2020 «Географическая информация — Геодезические привязки — Часть 1: Международная земная система отсчёта (МЗСО)».
3. Мельник Г.Э., Стеблов Г.М. Стабильность Северной Евразии по данным спутниковой геодезии // Физика Земли. 2024. № 2. С. 85-97. DOI: 10.31857/S0002333724020074.
4. Сорохтин О.Г., Лобковский Л.И. Механизм затягивания океанических осадков в зону подвига литосферных плит // Физика Земли. 1976. № 5. С. 3–10.
5. Стеблов Г.М., Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Фролов Д.И., Грекова Т.А. Динамика Курило-Камчатской зоны субдукции по данным GPS // Физика Земли. 2010. № 5. С. 77–82.
6. Стеблов Г.М., 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. DOI: 10.1134/s1028334x24602487.
7. Dziewonski A.M., Anderson D.L. Preliminary reference Earth model // Phys. Earth Planet. Inter. 1981. V. 25. P. 297–356.
8. Herring T.A., King R.W., Floyd M.A., McClusky S.C. Introduction to GAMIT/GLOBK. Release 10.7 Cambridge: Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology. 2018. 54 p.
9. Herring T.A., Melbourne T.I., Murray M.H., Floyd M.A., Szeliga W.M., King R.W., Phillips D.A., Puskas C.M., Santillan M., Wang L. Plate Boundary Observatory and related networks: GPS data analysis methods and geodetic products // Reviews of Geophysics. 2016. V.54. N.4. P. 759–808.
10. Kogan M.G., Steblov G.M. Current global plate kinematics from GPS (1995-2007) with the plate-consistent reference frame // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2008. V. 113. № 4. P. B04416(1-17).
11. Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half space // Bull. of Seism. Soc. Amer. 1985. V. 75. N. 4. P. 1135–1154.

12. Pollitz F.F. Coseismic deformation from earthquake faulting on a layered spherical Earth // *Geophys. J. Int.* 1996. V. 125. P. 1–14.

13. Savage J. C. A dislocation model of strain accumulation and release at a subduction zone. // *J. Geophys. Res.* 1983. V. 88. N. B6. P. 4984–4996.

14. STATIC1D [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.usgs.gov/node/279409> (02.10.2024).

15. Steblov Grigory M., Vladimirova Irina S. Geodetic Inversions and Applications in Geodynamics // *Applications of Data Assimilation and Inverse Problems in the Earth – Cambridge University Press (United Kingdom).* — 2023. — P. 278-292. DOI: 10.1017/9781009180412.019 URL: <https://www.cambridge.org/core/books/abs/applications-of-data-assimilation-and-inverse-problems-in-the-earth-sciences/geodetic-inversions-and-applications-in-geodynamics/D2A8AC8349556390FD64659D5F08A2F3>

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Публикации по теме НИР в российских и международных журналах, входящих в Web of Science, Scopus, ядро РИНЦ

1. Стеблов Г.М., 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. DOI: 10.1134/s1028334x24602487.

2. Лобковский Л.И., Баранов А. А., Бобров, А.М. Чуваев А. В. Глобальная геодинамическая модель современной Земли и ее приложение для Арктического региона // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2024. Т. 514. № 2. С. 293-299. DOI: 10.31857/S2686739724020125.

3. Мельник Г.Э., Стеблов Г.М. Стабильность Северной Евразии по данным спутниковой геодезии // Физика Земли. 2024. № 2. С. 85-97. DOI: 10.31857/S0002333724020074.