

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

УДК 528:551.2

ВЫСОКОТОЧНЫЕ СПУТНИКОВЫЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

© 2024 г. Г. М. Стеблов^{1,2,*}, член-корреспондент РАН П. Н. Шебалин¹, Г. Э. Мельник^{1,2,3}

Поступило 15.03.2024 г.

После доработки 25.04.2024 г.

Принято к публикации 02.05.2024 г.

Рассматриваются аспекты геодинимических исследований на территории Северной Евразии за последние три десятилетия с акцентом на использование космических технологий в геодезии и геодинимике. Основное внимание уделяется системе ГНСС как наиболее распространённому и эффективному инструменту для геодинимических исследований благодаря компактности и относительной лёгкости монтажа наземной измерительной аппаратуры, а также возможности её автономной работы. Подчёркивается значимость высокоточных ГНСС-определений для мониторинга малых по величине геодинимических смещений земной поверхности, что требует миллиметровой точности измерений. Рассматриваются вопросы развития прецизионной координатной основы геодинимического назначения и поддержания её согласованности в долгосрочной перспективе с опорой на международную земную отсчётную основу ITRF, а также проблемы и перспективы высокоточных спутниковых геодезических измерений и геодинимических исследований в контексте текущего сокращения взаимодействия с международными центрами геодезических данных. Предложены пути решения возникших проблем на основе создания системы субконтинентального масштаба, реализующей уравнивание первичной измерительной информации ГНСС с учётом геодинимических явлений. Возможности используемой сети ГНСС для решения задач геодезии и геодинимики продемонстрированы на примере анализа тектонической жёсткости древних платформ Северной Евразии и воздействия движений смежных плит и вариаций этих движений в прошлые геологические эпохи на современную геодинимическую обстановку этих платформ.

Ключевые слова: ГНСС, ФАГС, геодинимика, космическая геодезия, деформации земной коры, координатное обеспечение

DOI: 10.31857/S2686739724090209

ВВЕДЕНИЕ

Координатное обеспечение развивается в современном виде на территории РФ в течение последних 3-х десятилетий различными ведомствами в соответствии с профильными задачами, стоящими перед каждым из них. Соответственно, в зависимости от ведомственных целей

и задач различаются требования по точности, целостности и оперативности, а также инструментальные средства. Подавляющая часть современных геодезических систем базируются на космических геодезических технологиях, из которых наибольшее распространение получила система ГНСС благодаря компактности и относительной лёгкости монтажа наземной измерительной аппаратуры, а также возможности её автономной работы. Общая концепция введения и реализации земной геоцентрической системы координат отражена в опубликованном в 2020 г. международном стандарте ISO 19161-1:2020 [1]. Данный стандарт разработан на базе положений, принятых Международным Союзом Геодезии и Геофизики (IUGG), и входящей в него

¹Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской Академии наук, Москва, Россия

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской Академии наук, Москва, Россия

³Публично-правовая компания «Роскадастр», Москва, Россия

*E-mail: steblov@mitp.ru

Международной Ассоциации 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 отсчёта (ITRF) на основе уравнивания многолетних глобальных наблюдений по четырём космическим геодезическим технологиям: ГНСС, РСДБ, ЛЛС, ДОРИС. Одновременно, в положениях стандарта отмечается, что классические методы наземной геодезии (линейно-угловые, нивелирные) могут быть использованы без накопления существенных ошибок для локальных геодезических привязок на ограниченных расстояниях до нескольких километров и не должны использоваться для региональных и локальных сгущений отсчётной основы во вторичных реализациях ITRS, согласованных с базовой реализацией ITRS. Введённая с помощью перечисленных выше космических технологий международная земная система отсчёта (ITRF), позволила в большинстве случаев решать геодезические и геодинамические задачи на новой основе, в геоцентрических координатах.

Одной из сфер применения космических геодезических технологий, где требования по точности наивысшие, является геодинамика. Это обусловлено интенсивностью проявления различных геодинамических процессов в виде

смещений земной поверхности величиной в несколько миллиметров или сантиметров в год, что, в свою очередь требует точности координатных определений на уровне миллиметров. С другой стороны, обеспечение высокоточной координатной основы для решения широкого круга научных и практических задач невозможно без учёта непрерывного взаимного смещения элементов земной поверхности вследствие геодинамических факторов. Таким образом, тесная взаимосвязь между задачами и инструментальными средствами, применяемыми в космической геодезии и в геодинамике, предопределяет общие подходы к решению вопросов высокоточного координатного обеспечения.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННОЙ КООРДИНАТНОЙ ОСНОВЫ

Развитие прецизионной отсчётной основы, применимой для решения разномасштабных геодезических и геодинамических задач, базируется на формировании распределённой сети пунктов, координаты которых согласованы между собой и с положением геоцентра. Государственная отсчётная основа создана и развивается подразделениями Росреестра с участием других отраслей и ведомств.

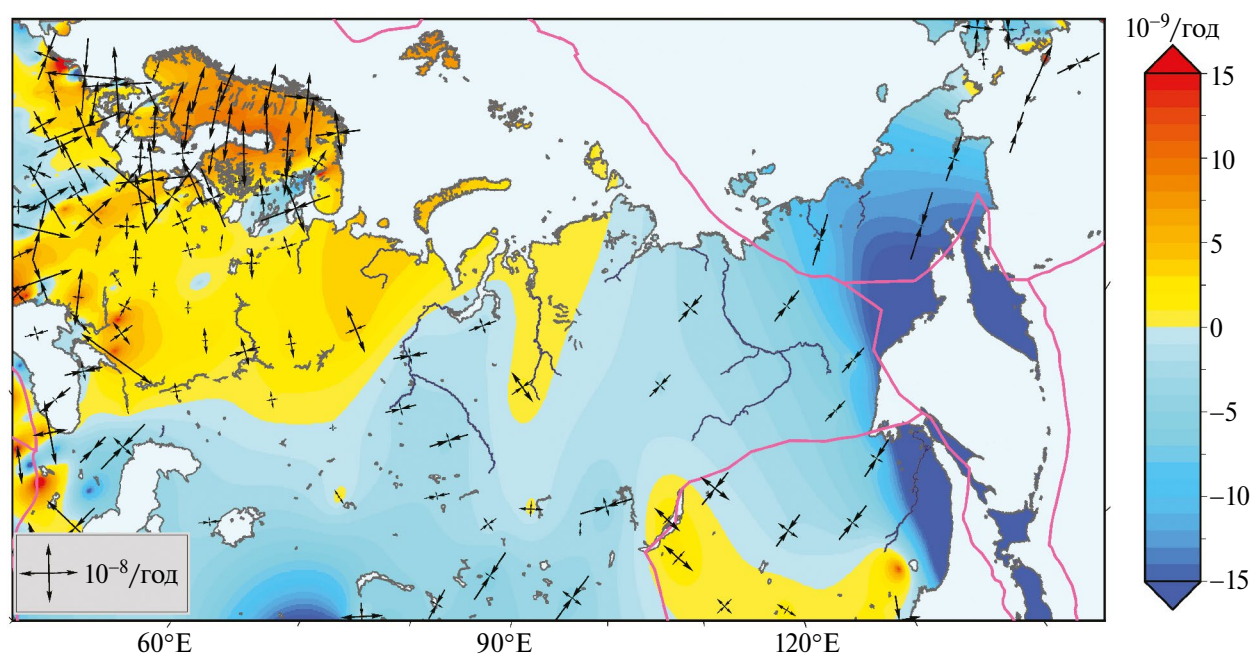


Рис. 1. Стабильность Северной Евразии по данным ГНСС (границы плит — MORVEL56 [2], проекция — коническая Ламберта).

Поддержание такой согласованности в длительной перспективе требует многолетних начальных наблюдений и выделения опорной сети, состоящей из пунктов со стабильной предсказуемой 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 (рис. 1, 2, описание построений см. ниже).

Плотность покрытия земной поверхности опорными пунктами должна обеспечивать возможность 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 отсчёты на определяемых и опорных пунктах с разностями координат этих пунктов. Такой подход реализует фильтрацию пространственно-коррелированных помех путём дифференциальной коррекции, что отличает методику ВОМО от методов высокоточных абсолютных местоопределений (ВАМО). Разработанные за последние 3 десятилетия специализированные зарубежные программные пакеты обеспечивают эффективную фильтрацию большей части помех, искажающих первичные спутниковые отсчёты:

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

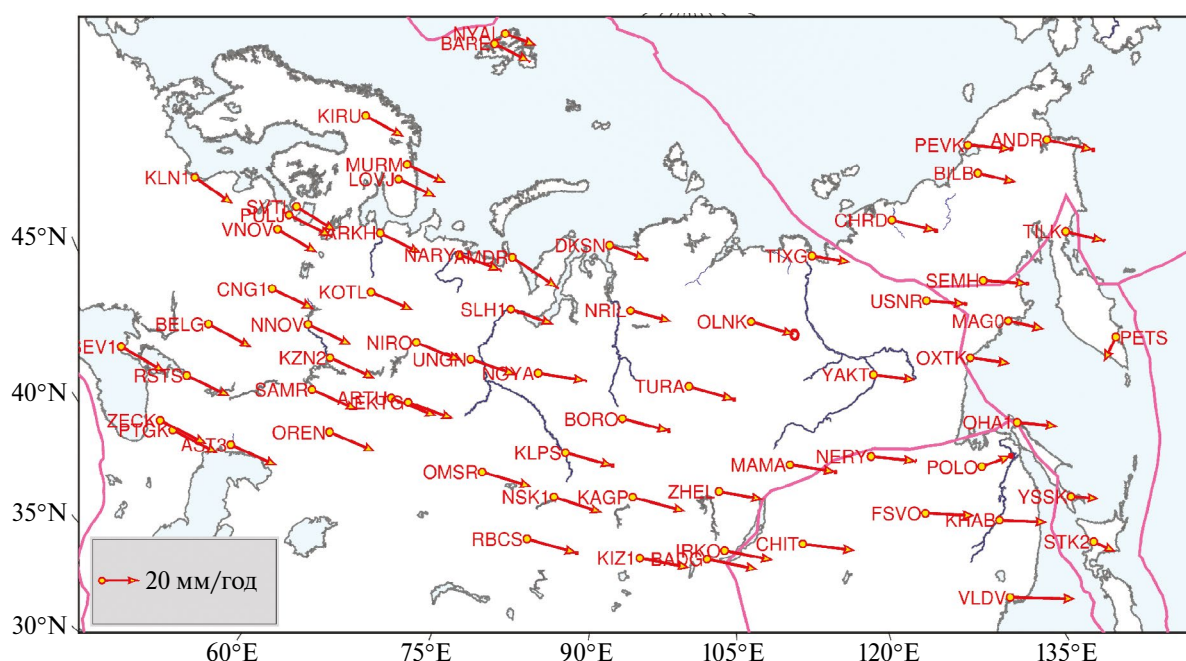


Рис. 2. Горизонтальные скорости пунктов ФАГС (Росреестра) по данным ГНСС в общеземной геоцентрической системе координат ITRF2014 (границы плит, проекция — как на рис. 1).

Методика фильтрации помех базируется на моделировании искажающих факторов с известными физическими свойствами, совместном уравнивании параметров искажений с определяемыми координатами, сглаживании несмещённых возмущений путём осреднения во временной области. Применение описанной выше дифференциальной коррекции позволяет дополнительно существенно снизить итоговую погрешность координатных определений и достичь миллиметрового уровня точности [3] методом длиннобазисных ВОМО при удалении определяемых пунктов от опорных станций в тысячи километров. При этом наиболее высокоточные из существующих программных пакетов выполняют все внутренние расчёты в декартовых геоцентрических координатах без необходимости привлечения каких-либо наземных гравиметрических, линейно-угловых, нивелирных измерений. В результате для решения большинства задач геодинимического мониторинга (тектонических и техногенных процессов) в северной части Евразии было достаточно сравнительно небольшого количества опорных станций, равномерно покрывающих всю её территорию, интегрированных в Международную службу ГНСС (IGS) (рис. 3). Количество таких станций на территории РФ составляло в разное время до 21.

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЕВРАЗИИ

В настоящее время, в условиях сложившихся в 2022 году ограничений во взаимодействии с международными центрами геодезических данных, стало невозможным использование большей части результатов обработки данных международных центров, что привело к существенному и постоянно прогрессирующему ухудшению точности координатных определений на территории РФ, в том числе, части базовых станций опорных сетей геодезического класса. В результатах глобального уравнивания исходных данных ГНСС, которые формируются в международных центрах (IGS), в настоящее время отсутствуют ежесуточные оценки координат опорных станций в северной части Евразии, а также коэффициенты корреляции между указанными оценками и уточнённой эфемеридно-временной информацией. Всё это в совокупности влияет на эффективность и качество субконтинентальных геодинимических исследований на территории РФ, при этом ситуация усугубляется из-за

отсутствия учёта смещений опорных станций вследствие тектонических факторов.

Для преодоления сложившихся негативных тенденций необходимо реализовать замещение утраченной в настоящее время части возможностей использования международной кооперации в вопросах спутниковой геодезии на территории РФ. Для такого замещения необходима система, реализующая уравнивание первичной измерительной информации ГНСС с учётом геодинимических явлений, позволяющая потребителю достичь прежнего уровня точности без использования таких результатов из IGS. В этих целях, в том числе, для сохранения преемственности многолетних разномасштабных геодинимических исследований в Северной Евразии, система уравнивания исходных данных ГНСС должна обеспечивать отсчётную основу геодинимических исследований, согласованную с международной (геоцентрической) земной системой координат (ITRF) по 14 параметрам трансформации, определяющим взаимное смещение, вращение, масштаб и их эволюцию во времени. Кроме того, система должна обеспечивать на прежнем высоком уровне дифференциальную коррекцию для измерений на определяемых пунктах (см. выше). Исходя из этого, долговременная согласованность системы отсчёта может быть достигнута только с учётом геодинимических факторов подвижности земной поверхности. Для реализации такого согласования необходима систематизация всех имеющихся исходных данных, в том числе, ГНСС, которая позволит сформировать представительный набор наблюдательных пунктов с предсказуемой, надёжно установленной кинематикой.

Положительные факторы, позволяющие заместить международную кооперацию в области спутниковой геодезии, состоят в наличии на территории РФ наземных сетей опорных пунктов ГНСС различной ведомственной принадлежности, которые по качеству аппаратуры, методике её установки и эксплуатации, не уступают мировым стандартам, применяемым в IGS (рис. 4). 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 приведённых сетей насчитывает не менее нескольких десятков (при общем

наборе из 101 установленных пунктов ФАГС), что, в совокупности, образует значительно более плотное покрытие территории РФ, чем прежняя сеть станций IGS (рис. 3). Результаты анализа данных по этим сетям подтверждают их приемлемость для достижения обозначенных выше целей по обеспечению высокоточной информацией, необходимой для геодинамических исследований.

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ПОДВИЖНОСТИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Геодинамические процессы, определяющие подвижность твёрдой 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 приведённые 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).

В свете задач геодинамики, в основе концепции изучения тектонических процессов в литосфере с помощью геодезических наблюдений лежит моделирование разнообразных эндогенных процессов и их ожидаемых проявлений в виде смещений земной поверхности. Сравнение результатов моделирования с фактически наблюдаемыми смещениями позволяет проверить корректность самой модели и уточнить её параметры, решая соответствующую обратную задачу. С другой стороны, для задач геодезии изучение закономерностей и параметризация геодинамических процессов позволяет учесть их воздействие при построении самосогласованной отсчётной основы, применимой в течение многих лет.

К настоящему времени, часть наблюдательных пунктов, находящихся на территории Российской Федерации, проработала достаточно

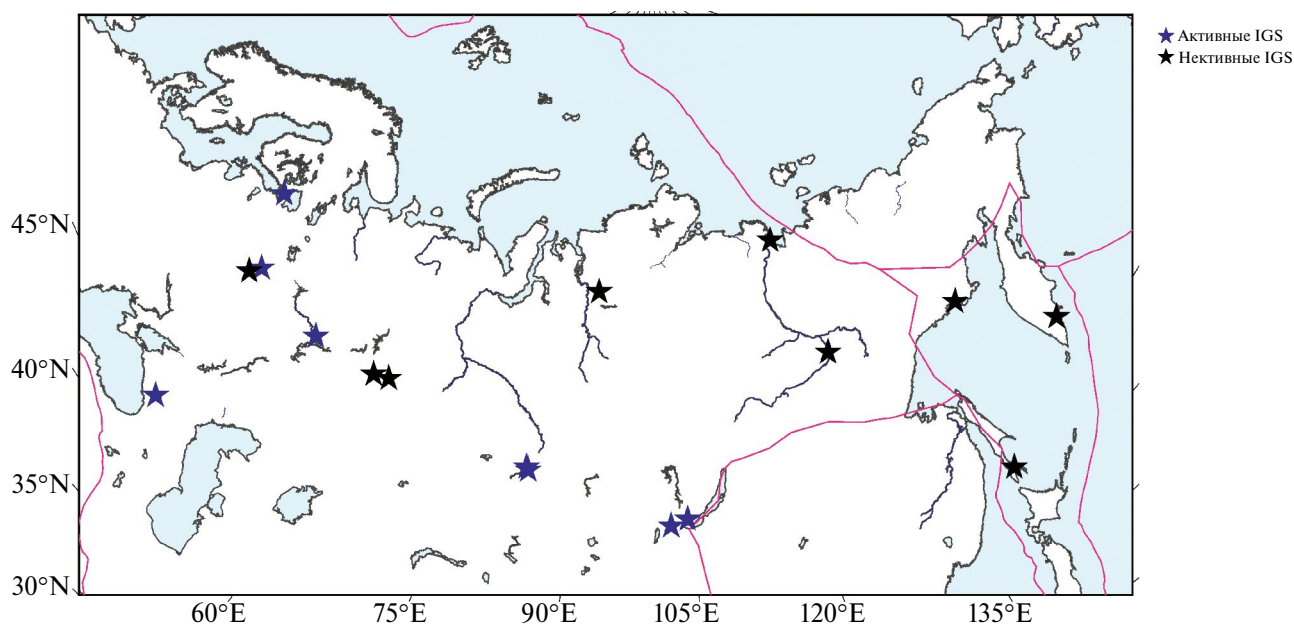


Рис. 3. Пункты IGS в северной части Евразии (границы плит, проекция — как на рис. 1).

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 были вычислены скорости движения этих пунктов в общеземной геоцентрической системе отсчёта и полученное распределение скоростей проанализировано в совокупности со всеми данными, имеющимися по сопредельным территориям, т.е. практически по всей Евразии.

В результате оптимизированной триангуляции с вершинами в наблюдательных пунктах было построено поле скорости плоской деформации [4]. Приведённое выше на рис. 1 распределение стало результатом этих построений. На представленной карте видно, что при переходе с Восточно-Европейской платформы (ВЕП) на Западно-Сибирскую (ЗСП) наблюдается смена деформаций: обстановка растяжения сменяется обстановкой сжатия.

В качестве причин, которые могут объяснить построенное распределение следует рассмотреть вариации сил, действующих на литосферные плиты:

- направления и скорость верхнемантийных течений, вязкость астеносферы, мощность земной коры;

- современная конфигурация межплитовых границ по их простиранию и по геодинамической обстановке;

- прошлые движения платформ, слагающих северную часть Евразии.

Численное моделирование конвекции в мантии, предложенное в серии работ А. Баранова с соавторами [5, 6], показывает под кратонами отрицательную термическую аномалию (на 100 град). При этом не просматривается каких-либо контрастных вариаций в аномалиях температуры и, соответственно, вязкости верхней мантии в пределах платформ в Северной Евразии, коррелирующих с вариациями поверхностных деформаций, наблюдаемых там же по спутниковой геодезии. Таким образом, этот фактор не объясняет вариаций обстановки сжатия-растяжения в рассматриваемой части континента. Вариации мощности земной коры достаточно мозаичны и также не объясняют вариаций поверхностных деформаций по спутниковой геодезии [7].

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

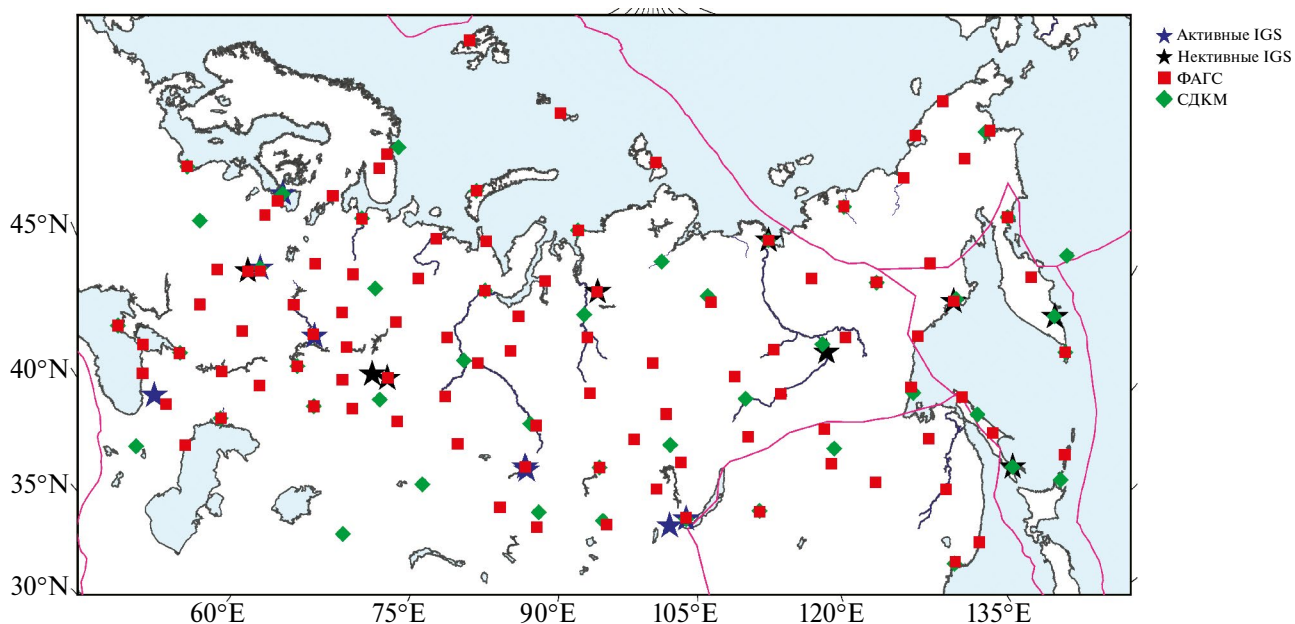


Рис. 4. Активные пункты ГНСС в северной части Евразии (границы плит, проекция — как на рис. 1).

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, отсутствие резких пространственных вариаций в ориентации этих осей (за исключением аномальной Байкальской рифтовой зоны), монотонное нарастание сжатия по величине в направлении Альпийско-Гималайского складчатого пояса. 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, формирующегося вследствие достаточно интенсивного дрейфа Аравийской плиты на север, в сторону Евразии, 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 [8]. Одной из таких детально изученных структур в Арктическом регионе является Евразийский бассейн, образованный двумя глубоководными котловинами: Амундсена и Нансена, разделённых хребтом Гаккеля (рис. 5). Данные по палеомагнитным аномалиям вдоль хребта Гаккеля показывают, что в Кайнозой скорость раскрытия Евразийского бассейна довольно заметно менялась, по крайней мере, за последние 50 млн лет, и в современную эпоху, на

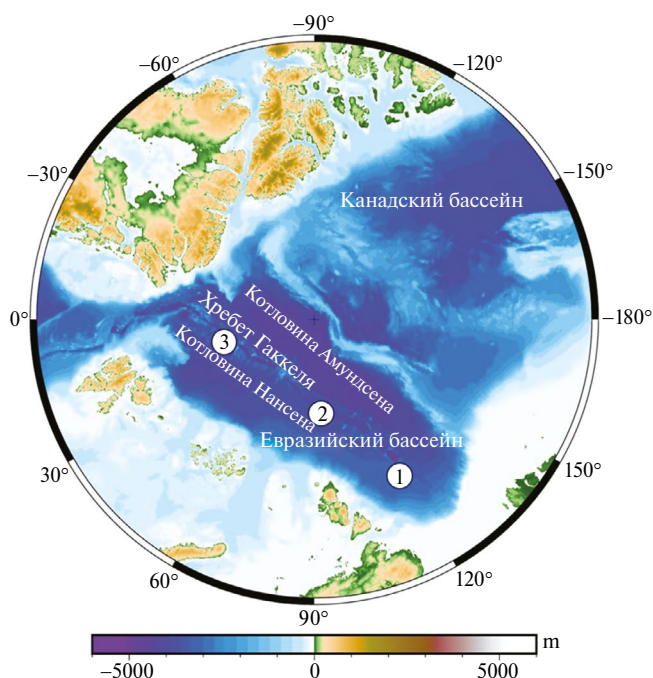


Рис. 5. Глубоководные бассейны Северного Ледовитого океана (сегменты хребта Гаккеля: 1 — восток, 2 — центр, 3 — запад).

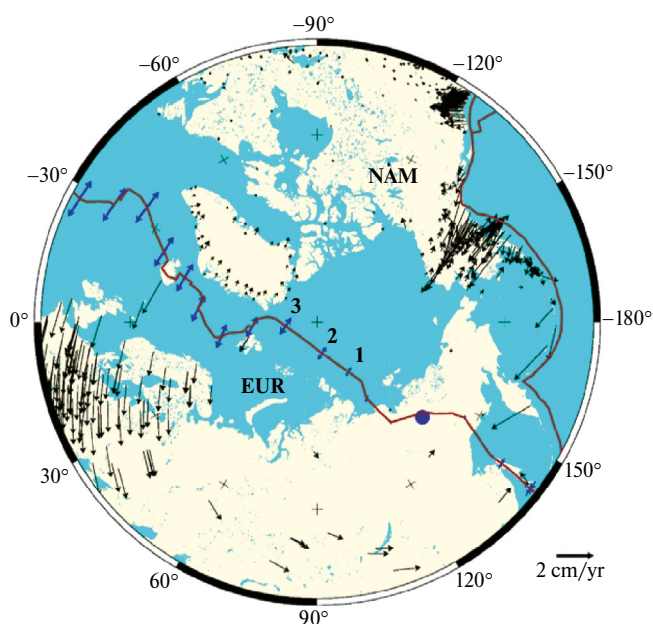


Рис. 6. Конфигурация крупных плит в зоне спрединга (EUR — Евразийская плита, NAM — Северо-Американская плита; 1, 2, 3 — сегменты хребта Гаккеля, как на рис. 5).

Таблица 1. Сопоставление скорости спрединга вдоль хребта Гаккеля по палеомагнитным данным и по ГНСС (обозначения сегментов — как на рис. 5, 6)

Сегменты хребта Гаккеля	Скорость по ГНСС, см/год	Скорость по палеомагнитным аномалиям, см/год
Восток (1)	0.2	0.8
Центр (2)	0.4	1.1
Запад (3)	0.5	1.2

протяжении 3 млн лет оценивается на уровне 1 см/год [9, 10].

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. С этой целью были вычислены значения полной скорости спрединга для того же сегмента границы между Евразийской и Северо-Американской плитами — для хребта Гаккеля, для которого приведены оценки в работах [8–10]: для восточной (1), центральной (2) и западной (3) частей (рис. 5, 6). Полная скорость расхождения плит в произвольной точке их общей границы вычислялась в виде [11]:

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

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 -й точки контакта Евразийской (EUR) и Северо-Американской (NAM) плит.

Вектор Эйлера $\bar{\Omega}_{EUR-NAM}$ вычислялся как разность векторов Эйлера $\bar{\Omega}_{EUR}$ и $\bar{\Omega}_{NAM}$ каждой из двух плит в общеземной геоцентрической системе координат:

$$\bar{\Omega}_{EUR-NAM} = \bar{\Omega}_{EUR} - \bar{\Omega}_{NAM}$$

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

$$|\bar{V}_j - \bar{\Omega}_{EUR} \times \bar{R}_j| \leq \delta, \quad |\bar{V}_k - \bar{\Omega}_{NAM} \times \bar{R}_k| \leq \delta,$$

где $\bar{V}_j$ и $\bar{R}_j$ — скорость и радиус-вектор j -й точки, расположенной на Евразийской плите, $\bar{V}_k$ и $\bar{R}_k$ — скорость и радиус-вектор k -й точки, расположенной на Северо-Американской плите,

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

Вычисленные таким образом значения современных скоростей полного спрединга вдоль хребта Гаккеля, приведённые в табл. 1 и на рис. 6, показывают, что, согласно современным оценкам по спутниковой геодезии за текущие 30 лет, полная скорость спрединга в Евразийском бассейне сократилась, в среднем, примерно в 3 раза по сравнению с палеомагнитными оценками за последние 3 млн лет, что говорит о заметном замедлении этого процесса, по крайней мере, в последние 3 млн лет.

Таким образом, вариации поля скорости плоской деформации платформенных областей в Северной Евразии можно объяснить конфигурацией границ окружающих литосферных плит, их геодинамическим режимом и вариациями этих режимов в прошлые геологические эпохи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании рассмотрены ключевые аспекты развития субконтинентальной сети ГНСС геодинамического назначения, с акцентом на внедрение космических геодезических технологий, конкретно системы ГНСС, которая доказала свою эффективность в решении широкого спектра геодезических и геодинамических задач. Особое внимание уделено необходимости достижения исключительной точности измерений, что обусловлено крайне малыми величинами смещений земной поверхности характерными для геодинамических процессов.

Значительное сокращение станций ГНСС, включённых в процесс регулярного глобального уравнивания исходных данных, из общего числа установленных на территории Российской Федерации, приводит к потере точности

геоцентрических координатных определений и к ухудшению оценок возмущений спутниковых орбитальных параметров над северной частью Евразии. В статье предложены направления действий для решения данной проблематики путём создания системы, реализующей фильтрацию и уравнивание исходных данных ГНСС по всем имеющимся станциям в Северной Евразии.

Созданная новая более плотная субконтинентальная сеть геодезических станций способствует сокращению среднего расстояния между всеми пунктами, задействованными в координатных определениях, как опорными, так и определяемыми, что, в свою очередь, повышает эффективность фильтрации пространственно-коррелированных помех при дифференциальной коррекции первичных радионавигационных измерений и, тем самым, снижает зависимость точности относительных координатных определений от точности спутниковых орбитальных параметров. В целом, более плотная сеть способствует повышению качества геодезических данных на всей территории РФ, увеличивая надёжность и точность местоопределения.

Кроме того, в данной работе были проведены оценки тектонической жёсткости платформ северной Евразии, а также исследована стабильность их кинематики на протяжении геологических временных интервалов, охватывающих миллионы лет. В ходе анализа была идентифицирована обстановка растяжения в пределах Восточно-Европейской платформы, что может быть объяснено вариациями скорости спрединга срединно-океанического хребта в северной части Атлантического океана. Выводы о замедлении полной скорости спрединга сделаны на основе сопоставления палеомагнитных данных, отражающих скорости спрединга за прошедшие миллионы лет, с современными данными, фиксирующими скорости спрединга за последние три десятилетия. 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, остаётся стабильной и предсказуемой. Это обстоятельство делает их надёжной отсчётной основой для высокоточного координатного обеспечения в пределах Северной Евразии.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы отмечают высокое качество исходных измерений ГНСС сети ФАГС, и выражают благодарность ППК “Роскадастр” за обеспечение возможности их использования в настоящем исследовании.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в рамках госзадач ИТПЗ РАН, ИФЗ РАН и ППК “Роскадастр”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международный стандарт ISO 19161-1:2020 “Geographic information. Geodetic references. Part 1: International terrestrial reference system (ITRS)”.
2. *Argus D. F., Gordon R. G., DeMets C.* Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2011. V. 12. № 11.
3. *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. No 4. P. 759–808.
4. *Мельник Г. Э., Стеблов Г. М.* Стабильность Северной Евразии по данным спутниковой геодезии // *Физика Земли*. 2024. № 2. С. 3–15.
5. *Чуваев А. В., Баранов А. А., Бобров А. М.* Численное моделирование конвекции в мантии Земли с использованием облачных технологий // *Вычислительные технологии*. 2020. Т. 25. № 2. С. 103–117.
6. *Баранов А. А., Лобковский Л. И., Бобров А. М.* Глобальная геодинамическая модель современной Земли и ее приложение для Антарктиды // *Доклады РАН. Науки о Земле*. 2023. Т. 512. № 1. С. 100–105.
7. Национальный атлас России. Том 2. Природа и экология. 2007. Геологическое строение и ресурсы недр. Мощность земной коры. Масштаб 1:30 000 000. Отв. ред. Г.Ф. Кравченко, редкол. А.В. Бородко (пред.) и др. / ПКО «Картография» под общ. рук. М-ва транспорта Российской Федерации и Роскартографии. 2007. С. 63.
8. *Кулаков И. Ю., Гайна К., Добрецов Н. Л., Василевский А. Н., Бушенкова Н. А.* Реконструкции пере-

- мещений плит в Арктическом регионе на основе комплексного анализа гравитационных, магнитных и сейсмических аномалий // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 8. С. 1108–1125.
9. Глебовский В. Ю., Каминский В. Д., Минаков А. Н., Меркурьев С. А., Чилдерс В. А., Брозина Д. М. История формирования Евразийского бассейна Северного Ледовитого океана по результатам геосторического анализа аномального магнитного поля // Геотектоника. 2006. № 4. С. 21–42.
 10. Кононов М. В., Лобковский Л. И. Влияние верхнемантийной конвективной ячейки и связанной с ней субдукции Тихоокеанской плиты на тектонику Арктики в позднем Мелу-Кайнозойе // Геотектоника. 2019. № 6. С. 27–45.
 11. 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).

PRECISE SATELLITE GEODETIC MEASUREMENTS AND GEODYNAMIC RESEARCH IN NORTHERN EURASIA: STATE AND PROSPECTS

G. M. Steblov^{a,b,#}, Corresponding Member of the RAS P. N. Shebalin^a, G. E. Melnik^{a,b,c}

^a*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics,
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation*

^c*Public law company "Roskadastr", Moscow, Russian Federation*

[#]*E-mail: steblov@mitp.ru*

The paper addresses the issues of geodynamic research in Northern Eurasia over the past three decades with emphasis on the use of space technologies in geodesy and geodynamics. The main focus is on the GNSS system as the most widespread and effective tool for geodynamic research due to the compactness and relative ease of installation of ground-based tracking equipment, as well as the possibility of its autonomous operation. The importance of precise GNSS positioning for monitoring small-scale geodynamic displacements of the earth's surface, which requires millimeter-scale measurement accuracy, is emphasized. The issues of development of a precise reference frame for geodynamics and maintaining its long-term consistency based on the International Terrestrial Reference Frame (ITRF) are considered, as well as the problems and prospects of precise satellite geodetic measurements and geodynamic research in the context of the current reduction in interaction with international geodetic data centers. To solve the problems that have arisen, ways are proposed based on the arranging a subcontinental-scale system for equalization of raw GNSS measurements. The capabilities of the used GNSS network for solving problems of geodesy and geodynamics are demonstrated by the example of the analysis of the tectonic rigidity of cratons of Northern Eurasia and the impact of motion of adjacent tectonic plates and variations of these motion in the past geological eras on the contemporary geodynamic setting of these cratons.

Keywords: GNSS, FAGN, geodynamics, space geodesy, crustal deformations, positioning system