

На правах рукописи

Терещенко Вячеслав Евгеньевич



Совершенствование методики связи глобальной координатной основы
с ее локальной реализацией пунктами сетей дифференциальных
геодезических станций

25.00.32 – Геодезия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Новосибирск – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ).

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Карпик Александр Петрович.

Официальные оппоненты:

Непоклонов Виктор Борисович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии», профессор кафедры высшей геодезии;

Соловицкий Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный университет», доцент кафедры геологии и географии.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный научно-технический центр геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных» (г. Москва).

Защита состоится 15 декабря 2020 г. в 13-00 на заседании диссертационного совета Д 212.251.02 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, Новосибирск, ул. Плеханова, 10, ауд. 402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»: <http://sgugit.ru/science-and-innovations/dissertation-councils/dissertations/tereshchenkovyacheslav-evgenevich/>

Автореферат разослан 26 октября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Аврунев Евгений Ильич

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 12.10.2020. Формат 60 × 84 1/16.

Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 130.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плеханова, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плеханова, 8.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) активно используются при решении комплекса прикладных и научных задач геодезии, важнейшие из которых – задачи координатно-временного и навигационного обеспечения (КВНО), задачи глобальной геодинамики/геотектоники, фундаментальные геодезические определения, геодезическое сопровождение строительных работ и другие. Для их решения с помощью технологий ГНСС создаются и расширяются сети дифференциальных геодезических станций (ДГС), являющиеся практической реализацией глобальной системы отсчета, основные параметры которой строго определены в пространстве и времени.

Сети ДГС активно развиваются в различных отраслях народного хозяйства для обеспечения нужд пользователей в навигационной информации. Координатная основа Российской Федерации также развивается с увеличением количества опорных пунктов фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС), являющейся высшим звеном в структуре формирования российской государственной геодезической системы координат (ГСК-2011).

При введении в эксплуатацию ГСК-2011 возник ряд проблем, описанных в различной научно-технической литературе. Среди прочих проблем существует проблема, связанная с установленными режимными ограничениями на ключи перехода к местным системам координат, которая заключается в невозможности корректного согласования в долгосрочной перспективе национальной системы координат ГСК-2011 с международной (глобальной) системой отсчета (англ. – International Terrestrial Reference System, ITRS) и практической реализацией глобальной системы отсчета (англ. – International Terrestrial Reference Frame, ITRF). Основной фактор, вносящий несоответствия в результаты позиционирования, заключается в различии в учете глобальных и региональных геодинамических процессов. Современные требования к точности определения

координат (также нормальных высот и значений силы тяжести) обуславливают необходимость учета временного фактора, поскольку определение координат, нормальных высот и значений силы тяжести связано с перманентным влиянием глобальных и региональных геодинамических процессов. Их учет стал краеугольным камнем при формировании системы КВНО как общемирового масштаба, так и масштабов отдельных государств или их объединений. Установление связи национальных (региональных) координатных основ с международными (глобальными) повысит эффективность применения технологий ГНСС при использовании различных методов позиционирования, а также обеспечит возможность достижения высокого уровня точности при проведении геодезических работ в системах, отличных от систем, используемых для определения эфемерид спутников ГНСС, особенно на территориях большой протяженности.

Вышесказанное свидетельствует о том, что необходимость поиска способа корректного согласования результатов ГНСС-измерений на территории России, полученных в системах с учетом временной эволюции (кинематических), с результатами измерений, полученными в системах без учета временной эволюции координат пунктов (статических), является *актуальной* темой исследований.

Совершенствование методики связи глобальной координатной основы и ее локальной статической реализации пунктами региональных сетей ДГС посредством определения параметров связи и скоростей их изменения позволит решать задачи учета временной эволюции. Это особенно *актуально* в России вследствие низкой плотности опорных пунктов государственной координатной основы, отсутствия обязательного интервала переопределения их координат, отсутствия установленных скоростей движения на многих пунктах государственной координатной основы и прочих специфических для России факторов.

Степень разработанности темы. С развитием технологий ГНСС, расширением и уплотнением сетей ДГС на поверхности Земли в последние 30 лет стали активно вестись работы по определению движения точек земной поверхности. Исследование вопросов глобальной геотектоники без использования

технологий ГНСС ведется с начала прошлого века. Значительный вклад в развитие данной тематики внесли следующие ученые: Молоденский М. С., Красовский Ф. Н., Федынский В. В., Гельмерт Ф. Р., Веннинг-Мейнес Ф. А., Лонгман И. М., Пеллинен Л. П. и др. Современными авторами работ на русском языке и переводов с английского, посвященных тематике движения земной поверхности с помощью методов космических геодезии, являются: Антонович К. М., Сурнин Ю. В., Побединский Г. Г., Вдовин В. С., Виноградов А. В., Горобец В. П., Майоров А. Н., Кафтан В. И., Карпик А. П., Герасимов А. П., Мазурова Е. М., Войтенко А. В., Дворкин В. В., Мазуров Б. Т., Демьянов Г. В. и др. Иностранные авторы, внесшие важную роль в развитие темы: Hofmann-Wellenhof В., Altamimi Z., Kouba J., Rainer J., Dong D., Collilieux X., Métivier L., Moritz H., Muller J., Grafarend E., Dermanis A. и др.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационного исследования является совершенствование методики определения связи глобальной кинематической координатной основы и ее локальной статической реализации пунктами сетей ДГС с учетом их движения вследствие геодинимических процессов.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие *задачи*:

– выполнить обзор существующих методов определения связи систем с предусмотренной и непредусмотренной временной эволюцией координат пунктов;

– уточнить принцип взаимосвязи глобальных кинематических и региональных статических реализаций общеземной координатной основы за счет добавления временной составляющей;

– усовершенствовать методику связи глобальной кинематической координатной основы с ее статической реализацией пунктами сетей ДГС за счет включения скоростей изменения параметров связи;

– определить скорости изменения параметров связи глобальной координатной основы (ITRF) с ее локальной реализацией пунктами сети ДГС Новосибирской области (ДГС НСО) и региональной реализацией пунктами ФАГС;

– провести апробацию усовершенствованной методики путем определения соответствия результатов высокоточного позиционирования, выполненного различными методами на пунктах региональных сетей ДГС Федерального бюро технической инвентаризации (ДГС БТИ), ДГС Республики Крым и ДГС НСО.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются пункты российской координатной основы ФАГС, пункты Международной ГНСС службы (МГС); пункты региональных сетей ДГС. *Предметом* исследования является усовершенствованная методика определения скоростей изменения параметров связи систем с предусмотренной и непредусмотренной временной эволюцией координат пунктов.

Научная новизна исследования состоит:

– в уточнении принципа взаимосвязи статических региональных реализаций общеземной координатной основы с глобальной кинематической координатной основой, за счет дополнительного определения кинематической составляющей в параметрах связи систем;

– усовершенствованной методике связи глобальной координатной основы с ее реализациями пунктами сетей ДГС, позволяющей получать результаты высокоточного позиционирования в глобальной системе отсчета с точностью, сопоставимой с точностью ITRF, без применения научного программного обеспечения (ПО) или дополнительной апостериорно уточненной информации;

– определенных скоростях изменения параметров связи глобальной кинематической реализации системы отсчета (ITRF-2014) и ее региональной статической реализации пунктами ФАГС (ГСК-2011).

Теоретическая значимость. Усовершенствованная методика позволяет теоретически обоснованно в долгосрочной перспективе согласовывать результаты высокоточного позиционирования в системах с предусмотренной временной эволюцией и системах, в которых она не предусмотрена.

Практическая значимость. Применение усовершенствованной методики позволит устранить проблему, связанную с тем, что результаты позициониро-

вания в режиме кинематики реального времени (англ. – Real Time Kinematic, RTK) или с помощью метода относительного позиционирования с использованием ГНСС-измерений региональных сетей ДГС расходятся с результатами, полученными по методу точного точечного позиционирования (англ. – Precise Point Positioning, PPP). Также усовершенствованная методика создает предпосылки к использованию метода PPP для высокоточного определения координат точек в системе ГСК-2011.

Методология и методы исследования. Методологическую базу исследований составили методы решения задач космической геодезии, методы математического моделирования, методы численного интегрирования и метод наименьших квадратов. Перечисленные методы реализованы в виде программных кодов и алгоритмов в специализированном ПО, применяемом в ходе проведения исследований и экспериментов в диссертационной работе.

Положения, выносимые на защиту:

– сети ДГС являются локальной или региональной статической реализацией глобальной координатной основы, так как координаты пунктов таких сетей определены методом пространственной засечки от спутников ГНСС или пунктов МГС, которые определены в глобальной кинематической системе отсчета, однако, координаты пунктов региональных сетей ДГС не меняются, несмотря на тектоническое движение, что приводит к рассогласованию систем, реализуемых соответствующими пунктами;

– усовершенствованная методика позволяет теоретически обоснованно в долгосрочной перспективе согласовывать результаты высокоточного позиционирования в разных системах, разными методами, на разные эпохи ГНСС-измерений, в частности, обеспечивает строгое согласование координатных решений, полученных по методу PPP, с результатами наиболее распространенного метода относительного позиционирования.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Тематика диссертации соответствует паспорту научной специальности 25.00.32 – Геоде-

зия, разработанному экспертным составом ВАК Минобрнауки России, по пункту: 3 – Геодезические (глобальные) навигационные спутниковые системы и технологии. Формирование активного координатно-временного пространства на основе навигационной инфраструктуры ГЛОНАСС и др. Геодезические системы наземного, морского и космического базирования для определения местоположения и навигации подвижных объектов геопространства, в том числе транспорта, военной техники, людей и животных.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Предложенная методика применена и проверена на реальных объектах – региональной сети ДГС БТИ, сети ДГС Республики Крым и сети ДГС НСО. В апробации участвовало 159 пунктов ДГС. Полученные решения сопоставлены с результатами по методу PPP и результатами, полученными с использованием общемировых моделей движения тектонических плит. Исходя из этого, сделаны положительные выводы об адекватности предложенного подхода. Таким образом, представленные результаты можно считать достаточно достоверными. Результаты исследований и основные положения диссертации обсуждались и были одобрены на Международных научных конгрессах «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017» (17–21 апреля 2017 г., Новосибирск), «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2018» (25–27 апреля 2018 г., Новосибирск).

Публикации по теме диссертации. Основные положения и результаты исследований отражены в *пяти* научных статьях, *четыре* из которых опубликованы в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

Структура и объем диссертации. Объем диссертации составляет 130 страниц машинописного текста. Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения и списка литературы, включающего 126 наименований. Работа содержит 16 таблиц, 14 рисунков, 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе диссертации приведены общие сведения о терминах «система координат», «системах отсчета» и их разграничении; понятиях «кинематическая» и «статическая» система координат; проблемах использования государственной системы координат и спутниковых геодезических сетей в России; ошибках позиционирования, возникающих вследствие влияния перманентных геодинамических процессов; методах оценки параметров связи систем.

Переходя к рассмотрению необходимости наличия временной составляющей в системах координат, следует ввести пояснения в используемой терминологии для ее корректного применения. Зачастую при переводе научно-технической литературы с английского языка возникает двоякое толкование терминов. В геодезической практике России не всегда корректно используют понятия международной терминологии «Reference System» и «Reference Frame», «Coordinate System» и «Coordinate Frame».

Профессором Сурниным Ю. В. термин «Reference System» предлагается переводить как «система отсчета»; он означает теоретическое (декларативное) описание геометрии пространства и хронометрии. Термин «Reference Frame» предлагается переводить как «отсчетная основа», которая материализует систему отсчета (Reference System) через реальные объекты. Перевод термина «Coordinate System» – «система координат» – это одна из составных частей понятия «системы отсчета». Термин «Coordinate Frame» можно перевести как «координатная основа» – составная часть «отсчетной основы». На рисунке 1 представлена сводная схема применения международных терминов в геодезической практике России и их перевод на русский язык. Исходя из описанной логики необходимо пояснить, что, при добавлении временной составляющей в систему координат, термин «система координат» следует изменить на термин «система отсчета». Далее в работе данные термины применяются в соответствии с этими определениями.

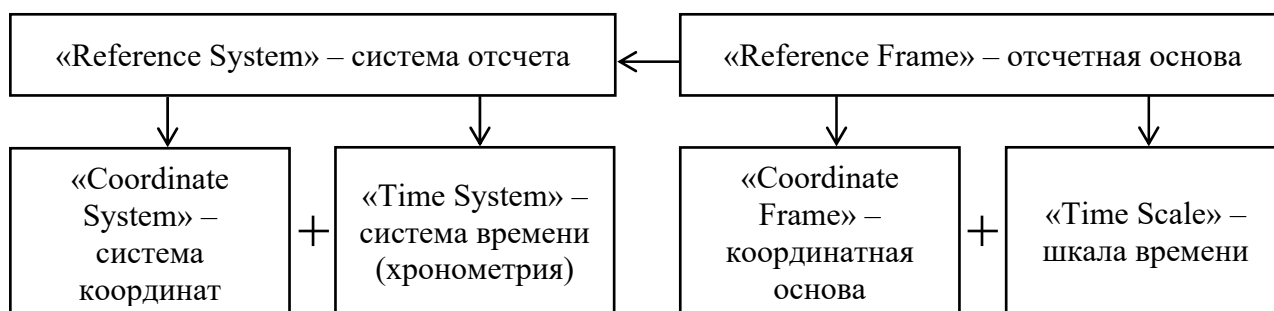


Рисунок 1 – Схема разделения понятий и их перевод

Кроме того, необходимо сказать о связанных с приведенными терминами Международной земной системе отсчета ITRS и Международной земной отсчетной основе ITRF. ITRS – это совокупность основополагающих принципов построения общеземной геоцентрической системы отсчета, принятых Международным астрономическим союзом, в которые входит определение начала центра системы, ориентация осей, параметры общеземного эллипсоида и гравитационного поля, фундаментальные геодезические постоянные и пр. Реализацией системы отсчета ITRS является отсчетная основа ITRF. Это совокупность опорных пунктов, на которых основана система ITRS, расположенных по всей территории земного шара, включающая пункты МГС.

Движения пунктов ITRF вследствие геодинимических процессов определены с точностью до 10^{-4} м/год. Чтобы положение и ориентировка координатной основы относительно истинной оси вращения Земли и экватора оставались неизменными, несмотря на тектонические процессы, скорости и направления движения пунктов, реализующих данную основу, должны быть учтены. В ITRF они учтены, что делает ее самой точной реализацией общеземной геоцентрической системы отсчета. Тектоническая активность не влияет на смещение и разворот координатных осей или смещение начала отсчета (геоцентра), так как основным условием определения и учета скоростей движения пунктов является принцип минимизации остаточных скоростей движения всех пунктов сети.

Системы, в которые происходит пересчет вычисленных геоцентрических координат для использования в прикладных геодезических целях (националь-

ные, региональные, местные), являются статическими системами координат, так как собственные движения опорных пунктов в данном случае не подразумеваются. Кинематическими системами называют системы, в которых предусмотрена временная эволюция пунктов, практически реализующих их. К ним относятся глобальные системы отсчета, в которых осуществляется определение координат, находящихся на орбите спутников, а сеть пунктов покрывает значительную часть земного шара и уравнена совместно.

Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.11.2016 № 1240 в качестве единой государственной системы координат для использования при осуществлении геодезических и картографических работ установлена геодезическая система координат ГСК-2011. Так как эта система предназначена для прикладного геодезического и картографического производства, координаты пунктов, реализующих данную систему, не должны быть зависимыми от времени, т. е. ГСК-2011 должна быть статической. Предложения по переходу на кинематическую версию ГСК-2011 по аналогии с ITRF не в полной мере состоятельны, поскольку:

- отсчетная основа ITRF не предназначена для ведения в ней прикладных геодезических работ и для этого не используется, а ГСК-2011, согласно нормативно-технической документации, предназначена именно для этого;

- пункты ITRF расположены по всему земному шару, а пункты ГСК-2011 максимум на 10 % его поверхности, что не позволяет судить о тектонических процессах общемирового масштаба, необходимых для соблюдения принципа минимизации остаточных скоростей движения всех пунктов сети;

- среднегодовая скорость движения пунктов на Евразийской тектонической плите различна, что при ведении высокоточных геодезических работ требует введения поправок, вычисление которых связано с разработкой национальной модели движения земной поверхности (ее разработка на сегодняшний день не возможна, в том числе по следующей причине);

– низкая плотность опорных пунктов с постоянно действующим оборудованием на территории страны не позволит привязать к ним новые пункты на большей части территории с точностью, достаточной для мониторинга, учета и прогнозирования геодинамических процессов.

Исходя из вышесказанного, ГСК-2011 де-факто является региональной реализацией глобальной координатной основы, созданной для ведения геодезических и картографических работ, реализованной набором пунктов ФАГС и др.

По ГНСС-измерениям пунктов ФАГС определены их собственные движения в ITRF и ГСК-2011. На эпоху 2011,0 статические параметры связи этих систем приведены в приказе Росреестра от 23.03.2016 № П/0134. Таким образом, установлена взаимосвязь ГСК-2011 и ITRF. Однако движение этих систем относительно друг друга происходит несинхронно, о чем эксперты неоднократно упоминали в различных публикациях. Это ведет к систематическому увеличению погрешностей при трансформации координат и прочим несоответствиям. Рост погрешности соответствует скорости движения тектонических плит, на которых расположены пункты ФАГС.

В этой связи не замечать проблему нарастания погрешностей в результатах высокоточного позиционирования уже нельзя. Она проявляется в следующем:

– при уравнивании сетей с опорой на пункты, реализующие глобальную координатную основу, возникают существенные погрешности и расхождения в результатах, полученных на одних и тех же пунктах, но в разное время;

– результаты высокоточного позиционирования по методу PPP не соответствуют результатам, полученным с применением наиболее распространенного метода относительного позиционирования от пунктов региональных сетей ДГС.

В ходе диссертационного исследования такие несоответствия установлены.

Данные проблемы можно решить введением поправки за смещение пунктов региональной сети ДГС. Но для ведения геодезических работ постоянное изменение координат пунктов создает значительные трудности и осложняет геодезическое производство. Однако из-за движения тектонических плит

накапливающиеся расхождения между глобальной реализацией системы отсчета и локальной могут достигать 30–40 см за 10 лет. При вычислении векторов базовых линий, использование координат объектов в локальных статических реализациях глобальных систем отсчета вместо координат, определенных в глобальной системе отсчета, эквивалентно внесению соответствующей погрешности в координаты базы. Это снижает точность вычисления векторов базовых линий и, для обширных сетей ДГС, приводит к развороту локальной реализации ITRF относительно актуальной.

Исходя из этого, необходимо усовершенствовать методику связи систем отсчета и систем координат, чтобы без внесения изменений в координаты опорных пунктов существовала возможность строгого согласования результатов, получаемых в глобальной системе отсчета и в ее локальных статических реализациях пунктами сетей ДГС в долгосрочной перспективе.

Во втором разделе диссертации оценена скорость движения пунктов сети ДГС НСО разными методами; уточнен принцип взаимосвязи глобальной кинематической координатной основы с ее локальными статическими реализациями; описана усовершенствованная методика связи систем, учитывающая смещение глобальной кинематической координатной основы относительно ее статической реализации пунктами локальных или региональных сетей ДГС.

В данном разделе рассмотрен принцип разделения глобальных реализаций общеземной системы отсчета (WGS-84, ITRF), представленных пунктами глобальных сетей ДГС и эфемеридами космических аппаратов, и региональных реализаций этой же системы, представленных небольшими по площади региональными сетями ДГС, зафиксированными на конкретный момент времени. Различия между такими реализациями заключаются в составе геодезических пунктов, на которых основаны данные системы, и в способах определения скоростей их движения. Скорости движения пунктов региональных сетей ДГС в России почти никогда не определяются. На практике связь систем устанавливают с помощью стандартной процедуры калибровки (или локализации), за-

ключающейся, как правило, в вычислении семи параметров трансформации на небольшой территории района работ на коротком промежутке времени.

Использование только статических параметров связи систем в долгосрочной перспективе не позволяет обеспечивать точность, сопоставимую с точностью, достижимой при использовании технологий ГНСС. Поэтому сформированный принцип необходимо уточнить, добавив зависимости от времени при определении параметров связи систем. Таким образом, связь систем следует устанавливать с помощью 14-параметрического преобразования (семь параметров трансформации и семь скоростей их измерения) на конкретный момент времени. На рисунке 2 приведена схема, отражающая уточненный принцип взаимосвязи глобальной системы отсчета с системами координат.



Рисунок 2 – Уточненная схема связи систем отсчета и систем координат

Стандартная связь двух систем отсчета (систем координат) – упрощенное уравнение Гельмерта – это евклидово сходство семи параметров: трех компонентов линейного смещения, трех углов поворота и масштабного коэффициента, обозначенных соответственно $T_x, T_y, T_z, R_x, R_y, R_z, D$. Преобразование координатного вектора $\mathbf{X}_1 = (x_1, y_1, z_1)^T$, выраженного в первой системе, в вектор $\mathbf{X}_2 = (x_2, y_2, z_2)^T$, выраженный во второй системе, дается уравнением:

$$\mathbf{X}_2 = \mathbf{X}_1 + \mathbf{T} + D\mathbf{X}_1 + R\mathbf{X}_1, \quad (1)$$

где

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix}; R = \begin{pmatrix} 1 & -R_z & R_y \\ R_z & 1 & -R_x \\ -R_y & R_x & 1 \end{pmatrix}; \mathbf{X}_1 = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}; \mathbf{X}_2 = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix},$$

где R_x, R_y, R_z – параметры разворота координатных осей первой системы относительно второй; $\mathbf{T} = (T_x, T_y, T_z)^T$ – вектор смещения центра первой системы относительно второй; D – масштабный коэффициент; \mathbf{X}_1 – вектор положения пункта, в первой системе координат; \mathbf{X}_2 – вектор положения пункта во второй системе координат.

В таблице 1 приведено описание усовершенствованной методики связи систем отсчета и систем координат, заключающейся в реализации уточненного принципа, а именно – его части, приведенной на рисунке 2 во втором блоке сверху, по определению 14 параметров связи систем. Методика состоит из шести этапов.

Таблица 1 – Этапы реализации усовершенствованной методики связи систем

№ п/п	Операция	Пояснение
1	Определение координат пунктов локальной спутниковой геодезической сети методом РРР или относительным методом от пунктов МГС на начальную эпоху \mathbf{X}_{1i}	Начальной эпохой может быть момент, на который были уравнены и зафиксированы координаты пунктов сети. Если начальная эпоха неизвестна, то ею может быть момент, начиная с которого доступны измерения. В этом случае параметры связи систем будут определены на эту эпоху

Окончание таблицы 1

№ п/п	Операция	Пояснение
2	Определение координат пунктов локальной спутниковой геодезической сети методом PPP или относительным методом от пунктов МГС на текущую эпоху X_{2i}	Важным условием корректности вычислений является разность начальной и текущей эпох. Нежелательно проводить вычисления с разностью менее одного года, так как сумма ошибок позиционирования может превысить величину смещения пунктов, накопившуюся за разность эпох
3	Составление системы векторных уравнений (1)	Для решения системы векторных уравнений относительно параметров $T_x, T_y, T_z, R_x, R_y, R_z, D$ необходимы измерения минимум с трех пунктов. Обычно сети региональных ДГС состоят из большего числа пунктов, поэтому составленная система уравнений будет переопределенной, и наилучшим решением станет метод наименьших квадратов
4	Включение или игнорирование тех или иных компонентов в списке оцениваемых параметров	Масштабный коэффициент можно интерпретировать как сдвиг всей сети ДГС по высоте, что увеличивает длины базовых линий пропорционально масштабу. При необходимости сохранения пространственных длин базовых линий сети при трансформации координат должно применяться преобразование с игнорированием масштабного коэффициента. Если стоит задача максимально приблизить сеть ДГС, например, к референцной или местной системе координат, чтобы вычисленные расстояния между точками соответствовали расстояниям на топографических планах, необходимо использование масштабного коэффициента. Также следует определить, какие из остальных параметров в конкретном случае необходимо включать в число оцениваемых
5	Определение кинематической составляющей, характеризующей скорости изменения компонентов движения одной системы относительно другой	Для вычисления скоростей изменения компонентов движения достаточно определить частное полученных параметров трансформации и разности текущей и начальной эпох
6	Расчет и оценка остаточных невязок, полученных при вычислении параметров связи и скоростей их изменения	Остаточные невязки характеризуют объективный контроль качества результатов позиционирования. Включение в расчет параметров связи пунктов, на которых остаточная невязка значительно выше, чем на других, приведет к увеличению погрешности определения параметров связи и увеличению величины остаточных невязок других пунктов

В третьем разделе диссертации с помощью усовершенствованной методики определены скорости изменения параметров связи глобальной реализации (ITRF-2014) и региональной реализации (ГСК-2011) общеземной системы отсчета; выполнена апробация предложенного подхода по определению соответ-

ствия результатов высокоточного позиционирования методом PPP и методом относительного позиционирования на примере спутниковых сетей ДГС БТИ, ДГС Республики Крым и ДГС НСО.

Рассматривая ГСК-2011 как региональную реализацию глобальной координатной основы ITRF сетью опорных пунктов ФАГС и др., можно определить компоненты движения относительно ITRF, полагая, что ГСК-2011 неподвижна, а изменения положений пунктов происходят в ITRF. Пункты МГС, расположенные на территории России в зоне развернутой сети пунктов ФАГС, также отражают движение ITRF относительно ГСК-2011, как и пункты ФАГС, поэтому для расчета компонентов движения глобальной и региональной реализации системы отсчета дополнительно приняты в обработку 17 пунктов МГС. Количество принятых в обработку пунктов ФАГС – 22. Начальная и текущая эпохи – 2011,0 и 2020,14 соответственно. На рисунке 3 в топоцентрической системе приведены скорости и направления движения выбранных пунктов ФАГС и МГС, рассчитанные методом PPP на начальную и текущую эпохи измерений (см. первый, второй этап в таблице 1). Точность всех полученных результатов характеризуется среднеквадратической погрешностью (СКП) от 0,4 до 1,6 см в системе ITRF-2014. Оценка точности приведена из отчета об обработке ГНСС-измерений.

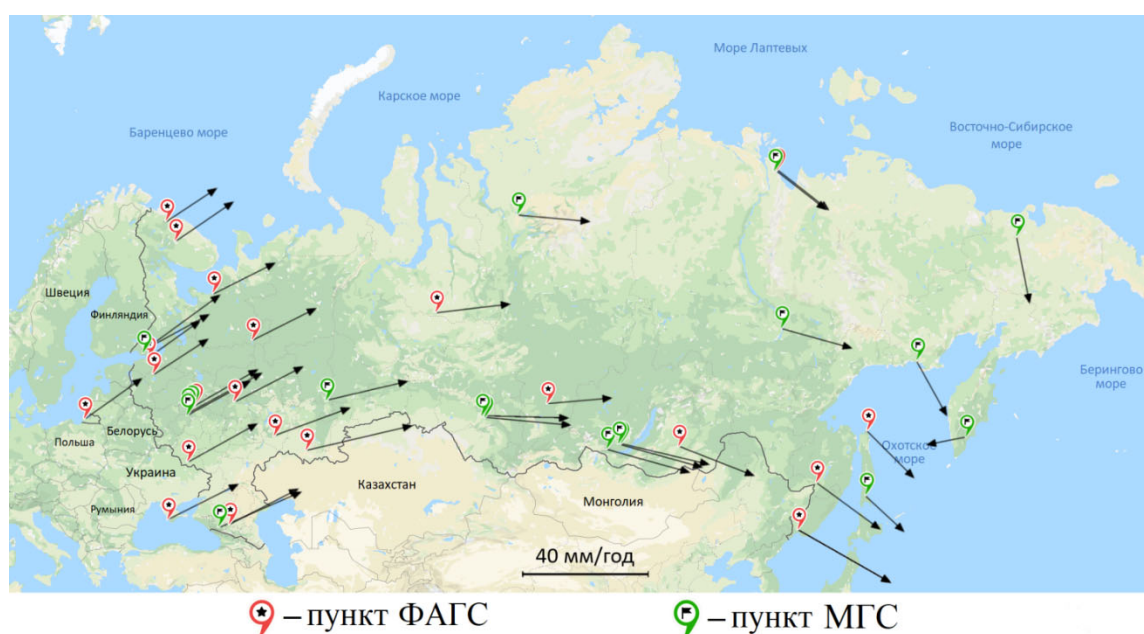


Рисунок 3 – Скорости и направления движения пунктов ФАГС и МГС

При составлении системы векторных уравнений (см. третий этап в таблице 1) в число оцениваемых параметров, согласно четвертому этапу, вошли только компоненты вращения вокруг координатных осей одной системы относительно другой (R_x, R_y, R_z). Масштабный коэффициент и компоненты сдвига центров систем в данном случае игнорированы, так как уровень точности, отсчетный эллипсоид, геоцентричность и принципы ориентации в теле Земли ITRF-2014 и ГСК-2011 согласно Приказу Росреестра от 23.03.2016 № П/0134 идентичны.

Однако часть пунктов ФАГС и МГС, расположенных на территории России, находится не на Евразийской тектонической плите. Их включение в совместную обработку с остальными сопровождалось существенным увеличением остаточных невязок на всех пунктах. Это связано с различиями в скоростях и направлениях движений тектонических плит. Поэтому, согласно шестому этапу, для вычисления параметров связи введен критерий отбраковки пунктов, на которых остаточные невязки выше допустимых. Критерий заключается в следующем: остаточная невязка на пункте по любой из координат не должна превышать среднеквадратическое отклонение (1σ), рассчитанное по всем пунктам по соответствующей координате. Таким образом, отбраковано девять пунктов (все пункты, находящиеся не на Евразийской тектонической плите, а также PULJ и OREN). Остаточные невязки, вычисленные для остальных тридцати пунктов, участвующих в определении движения ITRF-2014 относительно ГСК-2011, по каждой координате не превысили по модулю 0,011 м, при средней остаточной 3D-невязке по модулю 0,006 м. Это позволяет судить о вычисленных параметрах связи систем с погрешностью, не превышающей погрешность позиционирования при использовании метода PPP.

Так как движение ITRF-2014 относительно ГСК-2011 в основном характеризуется движением Евразийской тектонической плиты, то полученные результаты целесообразно сравнить с компонентами движения, определенными для общемировых моделей движения тектонических плит. Для сравнения выбраны

модели NUVEL-1A и ITRF2008, которые не имеют относительного вращения по отношению к какому-либо участку Земли (no-net-rotation), т. е. движение каждой плиты определено относительно средневзвешенного значения скоростей движения всех плит, что эквивалентно определению движения относительно приблизительного центра масс Земли.

При подготовке диссертации аналогичный перечень операций проведен в отношении локальной реализации глобальной координатной основы пунктами сети ДГС НСО. В число оцениваемых параметров также вошли только параметры разворота вокруг координатных осей.

В таблице 2 приведены следующие данные: вычисленная скорость движения ITRF-2014 относительно ГСК-2011 на эпоху 2011,0; вычисленная скорость движения ITRF-2014 относительно локальной реализации глобальной координатной основы пунктами сети ДГС НСО на эпоху 2010,5; скорости движения Евразийской тектонической плиты, определенные для общемировых моделей движения земной поверхности NUVEL-1A и ITRF2008.

Таблица 2 – Компоненты движения ФАГС и ДГС НСО относительно ITRF-2014 и компоненты движения NUVEL 1A и ITRF2008 для Евразийской тектонической плиты

Относительное движение и движение по моделям	Разворот вокруг оси X (с/год)	Разворот вокруг оси Y (с/год)	Разворот вокруг оси Z (с/год)
ГСК-2011 → ITRF-2014	-0,000073	-0,000518	0,000684
ДГС НСО → ITRF-2014	-0,000072	-0,000451	0,000827
По модели NUVEL 1A	-0,000202	-0,000494	0,000650
По модели ITRF2008	-0,000083	-0,000534	0,000750

Практическая часть предложенного подхода заключается в возможности строгого согласования результатов позиционирования, выполняемого методом PPP и относительным методом. Для апробации предложенного подхода проведен эксперимент, в ходе которого сравнены разницы координат определяемых пунктов, вычисленные между координатами, полученными методом PPP и относительным методом, и разницы, полученные методом PPP и относительным

методом с внесением поправки за движение систем относительно друг друга (см. таблицу 2). Определяемыми пунктами являются 122 пункта сети ДГС БТИ; 7 пунктов сети ДГС Республики Крым; 30 пунктов сети ДГС НСО. На рисунке 4 представлен фрагмент карты с определяемыми пунктами и пунктами ФАГС.



Рисунок 4 – Фрагмент карты с опорными и определяемыми пунктами

Координаты определяемых пунктов получены в результате обработки базовых линий, образованных между группой ближних определяемых пунктов с ближайшими 3–5 пунктами ФАГС, расстояние до которых не превышало 1 000 км, с последующим уравниванием образованного построения с опорой на пункты ФАГС. Максимальная СКП – 0,021 м, средняя – 0,010 м. Оценка точности получена программным обеспечением, использованным для вычислений.

Далее результаты, полученные относительным методом позиционирования, были редуцированы на текущую эпоху с помощью вычисленных компонентов движения ITRF-2014 относительно ГСК-2011 (см. таблицу 2) по уточненной формуле (1) с добавлением скоростей изменения параметров связи:

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_x + \dot{T}_x(t - t_0) \\ T_y + \dot{T}_y(t - t_0) \\ T_z + \dot{T}_z(t - t_0) \end{pmatrix} + \\ + \begin{pmatrix} 1 + D + \dot{D}(t - t_0) & R_z + \dot{R}_z(t - t_0) & -R_y - \dot{R}_y(t - t_0) \\ -R_z - \dot{R}_z(t - t_0) & 1 + D + \dot{D}(t - t_0) & R_x + \dot{R}_x(t - t_0) \\ R_y + \dot{R}_y(t - t_0) & -R_x - \dot{R}_x(t - t_0) & 1 + D + \dot{D}(t - t_0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Таким образом, разность вычисленных координат методом PPP и относительным методом значительно сокращается, несмотря на то, что разность начальной и текущей эпох составляет 9,13 лет. На рисунке 5 по всем 159 пунктам приведены «разности решений», полученных методом PPP и методом относительного позиционирования без внесения поправки за движение систем относительно друг друга (синий цвет); а также разности, полученные методом PPP и относительным методом с внесением поправки (красный цвет). «Разности решений» – это разности квадратных корней из суммы квадратов значений координат X, Y, Z – $3D$ -вектор. Значения горизонтальной шкалы даны в метрах.

Средняя разность результатов ($3D$ -вектор) высокоточного позиционирования методом PPP и относительным методом из анализа результатов 159 пунктов ДГС составляет 0,242 м, при максимальной и минимальной разностях – 0,255 и 0,223 м соответственно. В то же время средняя разность результатов позиционирования методом PPP и относительным методом с внесением поправки за движение ITRF-2014 относительно ГСК-2011 составляет 0,019 м, при максимальной и минимальной разностях – 0,049 и 0,007 м соответственно. Таким образом, полученные результаты позволяют констатировать, что введение поправок за движение систем относительно друг друга обеспечивает согласованность результатов высокоточного позиционирования, выполняемого разными методами, в разных системах координат и на разные эпохи измерений, на большей части территории страны с точностью, соответствующей современной точности спутникового позиционирования.

■ Разности координат без внесения поправки за движение систем относительно друг друга

■ Разности координат с внесением поправки за движение систем относительно друг друга

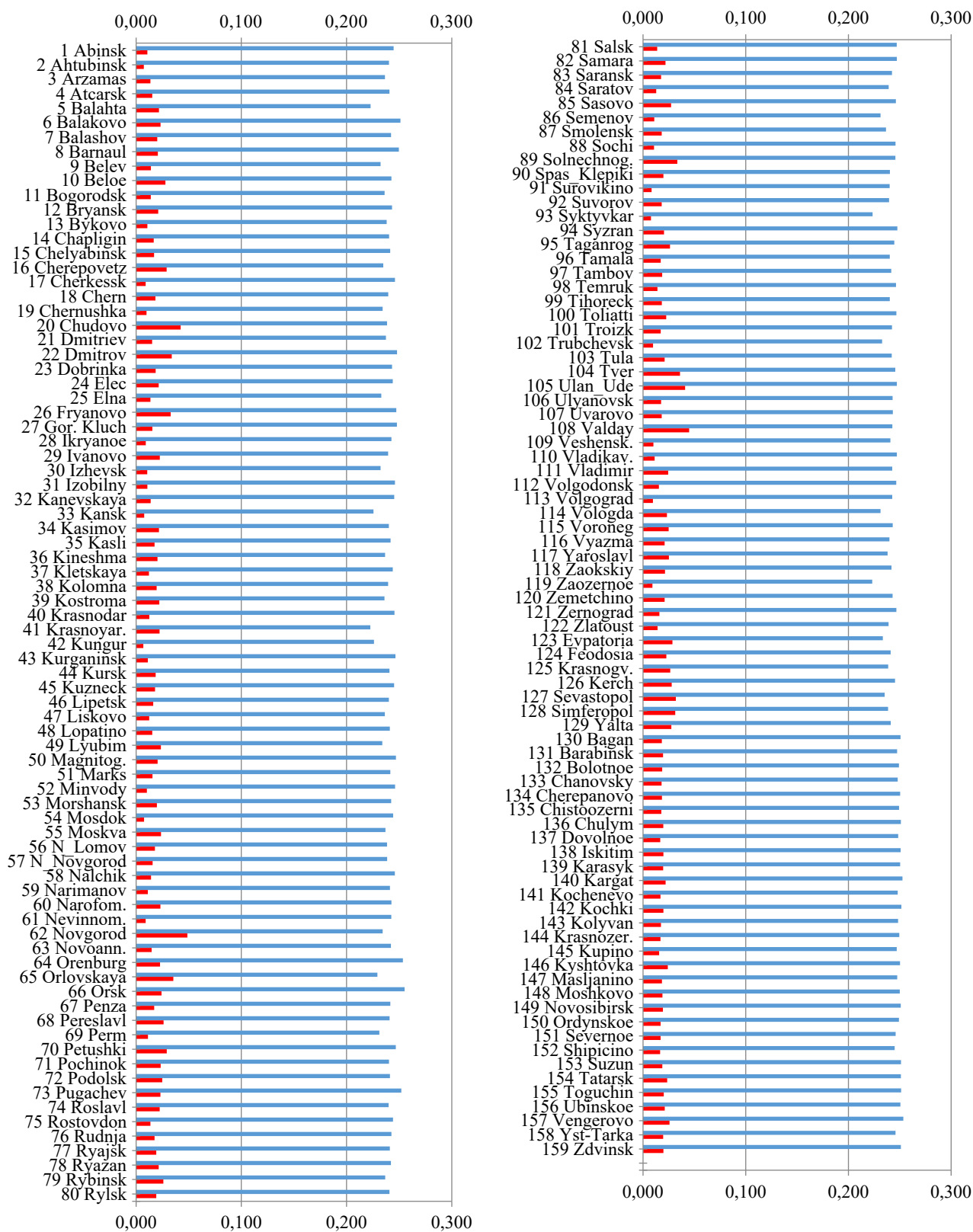


Рисунок 5 – Разности координат с внесением и без внесения поправки за движение систем относительно друг друга

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования достигнута цель и решены поставленные задачи. Получены следующие основные результаты:

– выполнен обзор существующих методов определения связи систем, в ходе которого установлено, что применяемые в российской геодезической практике методы не обеспечивают корректное согласование систем с предусмотренной и непредусмотренной временной эволюцией координат пунктов;

– уточнен принцип взаимосвязи глобальной кинематической реализации общеземной системы отсчета, представленной пунктами общеземных сетей ДГС и эфемеридами космических аппаратов, и ее статических реализаций, представленных локальными или региональными сетями ДГС, что обеспечивает соответствие результатов позиционирования разными методами;

– усовершенствована методика связи глобальной кинематической координатной основы с ее статической реализацией пунктами сетей ДГС за счет включения скоростей изменения параметров связи, что позволяет согласовывать результаты позиционирования, выполненного разными методами, в разных системах, на разные эпохи измерений;

– определены скорости изменения параметров связи глобальной координатной основы (ITRF) с ее локальной реализацией пунктами ДГС НСО и региональной реализацией пунктами ФАГС вследствие геодинамических процессов;

– усовершенствована методика апробирована на реальных объектах (пунктах региональных сетей ДГС БТИ, ДГС Республики Крым и ДГС НСО) путем сравнения результатов, полученных разными методами позиционирования. Согласование результатов из анализа 159 пунктов ДГС улучшено в среднем в 12 раз (с 0,242 до 0,019 м) и стало соответствовать точности современного спутникового позиционирования.

Результаты диссертационного исследования рекомендуется использовать для решения задач координатного обеспечения работ на территориях большой протяженности, которые региональные сети ДГС полностью не покрывают.

Перспективы исследований в данной области зависят от увеличения плотности пунктов государственной координатной основы и накопленной измерительной информации с уже имеющихся. Это создаст предпосылки для более углубленных исследований геодинамических процессов и обеспечит возможность совершенствования всей структуры координатного обеспечения России.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Терещенко, В. Е. Сравнение относительных смещений пунктов сети ПДБС НСО, полученных с использованием различных онлайн-сервисов обработки спутниковых измерений [Текст] / В. Е. Терещенко, Е. К. Лагутина // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 2. – С. 76–95.

2 Терещенко, В. Е. Методика связи глобальной системы отсчета с ее локальной реализацией пунктами сетей дифференциальных геодезических станций [Текст] / В. Е. Терещенко // Геодезия и картография. – 2020. – Т. 81. – № 8. – С. 24–37. doi: 10.22389/0016-7126-2020-962-8-24-37.

3 Терещенко, В. Е. Анализ качества спутниковых наблюдений сети постоянно действующих базовых станций Новосибирской области с помощью программного продукта Тeqc [Текст] / В. Е. Терещенко // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 3. – С. 72–88.

4 Терещенко, В. Е. Глобальная система отсчета и ее локальная реализация – государственная система координат 2011 года [Текст] / В. Е. Терещенко, А. В. Радченко, В. А. Мелкий // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 3. – С. 89–106.

5 Терещенко, В. Е. Определение актуальных координат сети постоянно действующих базовых станций новосибирской области на эпоху 2017.01 [Текст] / В. Е. Терещенко // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 1. – С. 125–129.