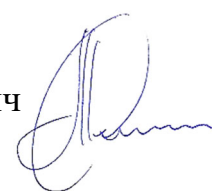


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ)

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор
Карпик Александр Петрович

Новосибирск – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ КООРДИНАТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ.....	10
1.1 Системы координат. Понятия, термины, классификация.....	10
1.2 Сети дифференциальных геодезических станций	18
1.3 Проблемы эксплуатации и развития государственной геодезической системы координат 2011 года	26
1.4 Проблемы эксплуатации и развития спутниковых геодезических сетей в России	31
1.5 Принцип взаимосвязи систем координат и систем отсчета	36
1.6 Обзор методов определения параметров связи геоцентрических систем.....	38
1.7 Выводы по первому разделу	49
2 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ СВЯЗИ ГЛОБАЛЬНОЙ КООРДИНАТНОЙ ОСНОВЫ С ЕЕ ЛОКАЛЬНОЙ РЕАЛИЗАЦИЕЙ ПУНКТАМИ СЕТЕЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ.....	50
2.1 Обзор и сравнение способов оценки скоростей движения точек земной поверхности вследствие геодинамических процессов	50
2.2 Уточнение принципа взаимосвязи систем отсчета и систем координат.....	67
2.3 Этапы реализации усовершенствованной методики согласно уточненному принципу связи систем координат и систем отсчета	70
2.4 Применение усовершенствованной методики на примере региональной сети дифференциальных геодезических станций Новосибирской области.....	77
2.5 Выводы по второму разделу	85

3 АПРОБАЦИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ МЕТОДИКИ НА ПРИМЕРЕ ПУНКТОВ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ АСТРОНОМО-ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЕТИ И ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ НА ПРАКТИКЕ	87
3.1 Постановка задачи эксперимента	87
3.2 Вычисление кинематических параметров связи системы ГСК-2011 с глобальной координатной основой ITRF-2014	88
3.3 Проверка опубликованных скоростей движения пунктов фундаментальной астрономо-геодезической сети России	98
3.4 Эксперимент по применению вычисленных параметров связи и скоростей их изменения на практике.....	100
3.5 Анализ результатов эксперимента	104
3.6 Выводы по третьему разделу	106
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	108
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	110
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) ФРАГМЕНТ КАРТЫ С ОПОРНЫМИ ПУНКТАМИ ФАГС И ОПРЕДЕЛЯЕМЫМИ ПУНКТАМИ	126
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное) РАЗНОСТИ КООРДИНАТ С ВНЕСЕНИЕМ И БЕЗ ВНЕСЕНИЯ ПОПРАВКИ ЗА ДВИЖЕНИЕ СИСТЕМ ОТНОСИТЕЛЬНО ДРУГ ДРУГА	127

ВВЕДЕНИЕ

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). Основным фактором, вносящим 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 зна-

чений 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., Фе-

дынский В. В., Гельмерт Ф. Р., Веннинг-Мейнес Ф. А., Лонгман И. М., Пеллин-нен 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. Иностран-ные 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 геодинамических 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 региональ-ных статических реализаций общеземной координатной основы за счет добавле-ния временной составляющей;
- усовершенствовать методику связи глобальной кинематической коорди-натной основы с ее статической реализацией пунктами сетей ДГС за счет включе-ния скоростей изменения параметров связи;
- определить скорости изменения параметров связи глобальной координат-ной основы (ITRF) с ее локальной реализацией пунктами сети ДГС Новосибир-ской области (ДГС НСО) и региональной реализацией пунктами ФАГС;
- провести апробацию усовершенствованной методики путем определения соответствия результатов высокоточного позиционирования, выполненного раз-

личными 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:

– 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 позиционирования 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 – Геодезия, разработанному экспертным составом ВАК Минобрнауки России, по пункту: 3 – Геодезические (глобальные) навигационные спутниковые системы и техноло-

гии. 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.

1 ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ КООРДИНАТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

1.1 Системы координат. Понятия, термины, классификация

Современному человеку в процессе жизнедеятельности приходится часто сталкиваться с решением задач высокоточного определения положения точки или объекта в пространстве и времени. Такие задачи встречаются в различных отраслях народного хозяйства: при составлении маршрута следования, в строительстве, в сельском хозяйстве, при разработке месторождений полезных ископаемых, при прокладке коммуникаций, при мониторинге окружающей среды, в космических исследованиях Земли и околоземного пространства, при решении фундаментальных задач небесной механики и во многих других сферах науки и экономики.

Решение такого рода задач достигается применением комплекса мер, обусловленных текущим состоянием геодезического и, в частности, координатного обеспечения на данном этапе технологического развития. Вопросам развития геодезического и координатного обеспечения уделено внимание специалистов в следующих научно-технических публикациях [1, 5, 6, 10, 39, 41, 42, 94].

С развитием глобальных навигационных спутниковых систем термин «координатное обеспечение» стал чаще замещаться термином «координатно-временное и навигационное обеспечение». Тем не менее эти термины означают совокупность операций, выполняемых в целях получения потребителем всех необходимых данных о пространственно-временных состояниях объектов и процессов, используемых или учитываемых при решении задач позиционирования точки в пространстве и времени [44]. Иными словами, это предоставление пользователям необходимой информации о параметрах системы координат и системы времени, навигационной информации, эфемеридах спутников и прочей информации, требующейся для решения задачи позиционирования в пространстве.

КВНО в работах [44, 87] условно разделяют на фундаментальное и прикладное. Фундаментальное КВНО определяет базовые координатно-временные

параметры для всех систем и обеспечивает единство, точность и взаимную согласованность всех координатно-временных измерений. В основе КВНО лежат современные научные представления о времени и пространстве, в соответствии с которыми время представляется одной из координат 4-мерного пространственно-временного континуума. Поэтому все вычисления выполняются с учетом общей теории относительности. Преобразование координат объектов и моментов наблюдения из земной геоцентрической координатной системы в небесную инерциальную систему отсчета (и обратно) является стержнем фундаментального сегмента КВНО. Для выполнения этого преобразования необходимо знать параметры вращения Земли – координаты полюса, всемирное время, положение оси вращения в инерциальном пространстве (прецессию и нутацию). Прикладное КВНО отвечает задачам проведения измерений текущих навигационных параметров – значений тех или иных функций, зависящих от параметров навигационных полей; определению текущего времени, привязанного к единому времени; обработке измерений с целью определения параметров пространственно-временного состояния объектов или привязки процессов; получению измерительной информации от «инерциальных» датчиков и других дополнительных источников.

С понятиями «координатное обеспечение» и КВНО тесно связаны базовые понятия «система координат», «система времени», «система отсчета», «отсчетная основа», «координатная основа».

Зачастую при переводе научно-технической литературы с английского языка возникает двоякое толкование терминов и, как следствие, путаница в понятиях. В геодезической практике России нет четкого разделения и применения понятий международной терминологии «Reference System» и «Reference Frame», «Coordinate System» и «Coordinate Frame». В литературе [71, 76, 77] авторами приводятся примеры коллизий, возникающих при использовании одинаковых терминов в различных областях науки, а также корректный перевод таких терминов и их строгие определения. 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». Исходя из описанной логики необходимо пояснить, что при добавлении временной составляющей в систему координат термин «система координат» следует изменить на термин «система отсчета». На рисунке 1 представлена сводная схема применения международных терминов в геодезической практике России и их перевод на русский язык. Далее в текущей работе данные термины применяются в соответствии с этими определениями.

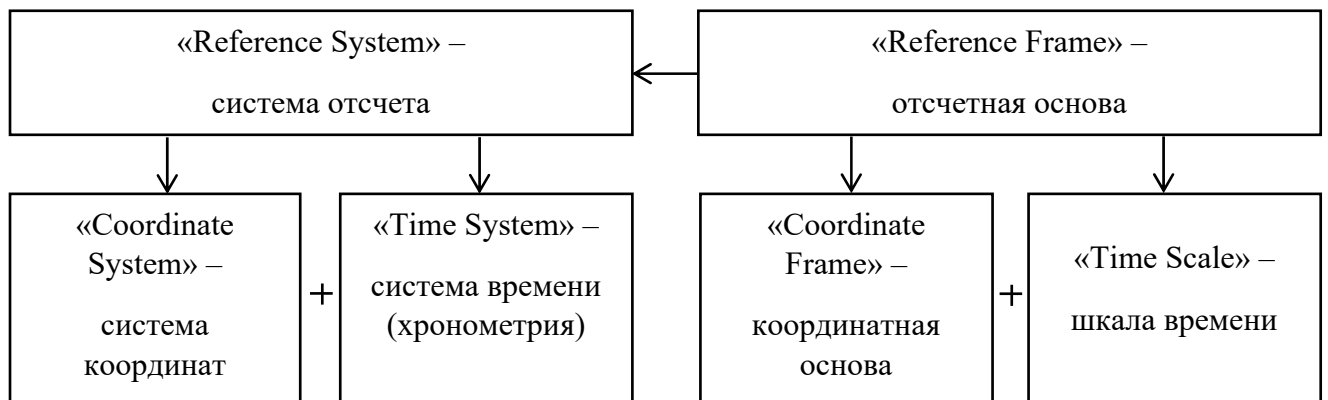


Рисунок 1 – Схема разделения понятий и их перевод

Кроме того, необходимо сказать о связанных с приведенными терминами Международной земной системе отсчета ITRS и Международной земной отсчетной основе ITRF. ITRS – это совокупность договоренностей и 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, инерциальность, фундаментальные геодезические постоянные и пр. Реализацией системы отсчета ITRS является отсчетная (координатная) осно-

ва ITRF. Это совокупность опорных пунктов, на которых основана система ITRS, расположенных по всей территории земного шара, включающая пункты МГС. На январь 2020 г. по данным [104] количество пунктов МГС в мире достигает 509, на территории России 22, из них 18 уникальных, т. е. расположенных отдельно от остальных. Количество пунктов, входящих в состав ITRF-2014, составляет 1 499, из которых 975 уникальных [105, 107].

Точность определения координат опорных пунктов отсчетной основы ITRF составляет 10^{-3} м. Движения пунктов ITRF вследствие геодинимических процессов определены с точностью до 10^{-4} м/год. Достижение высокой точности формирования системы обуславливает необходимость учета временного фактора, поскольку определение координат (также нормальных высот и значений силы тяжести [54]) связано с перманентным влиянием глобальных и региональных геодинимических процессов. Такие условия не позволяют использовать отсчетную основу ITRF в практических геодезических целях. В прикладной геодезической и картографической деятельности собственные движения опорных пунктов почти никогда не предусматриваются. Постоянное внесение изменений в координаты опорных пунктов сопряжено со значительными трудностями в процессе проведения геодезических работ. Поэтому системы отсчета, в которых предусмотрена временная эволюция координат пунктов, на производстве не используются, а применяются статические системы координат, в том числе местные.

В настоящее время в России в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 ноября 2016 г. № 1240 «Об установлении государственных систем координат, государственной системы высот и государственной гравиметрической системы» [56] в качестве единой государственной системы координат для использования при осуществлении геодезических и картографических работ на территории России установлена геодезическая система координат ГСК-2011, формируемая и распространяемая с использованием государственной геодезической сети.

Для геодезического обеспечения орбитальных полетов, решения навигационных задач и выполнения геодезических и картографических работ в интересах обороны установлена общеземная геоцентрическая система координат «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90.11), сформированная и распространяемая с использованием космической геодезической сети и государственной геодезической сети.

Согласно данному Постановлению [56] система геодезических координат 1995 года (СК-95), установленная Постановлением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2000 года № 568 «Об установлении единых государственных систем координат» в качестве единой государственной системы координат, и единая система геодезических координат 1942 года (СК-42), введенная Постановлением Совета Министров СССР от 7 апреля 1946 года № 760 «О введении единой системы геодезических координат и высот на территории СССР», применяются до 1 января 2021 г. при выполнении геодезических и картографических работ в отношении материалов (документов), созданных с их использованием.

Переход на новые системы координат для осуществления геодезической и картографической деятельности на территории России, в которых основной фактор построения, поддержания и развития – технологии ГНСС, имеет свои достоинства и недостатки.

К основным достоинствам можно отнести следующие:

– геоцентричность – начало отсчета новых систем в центре масс Земли позволяет более точно определять параметры земного эллипсоида и форму геоида, точнее определять геодезические и фундаментальные физические постоянные, гравитационное и магнитное поле Земли, позволяет решать задачи по исследованию геодинамических явлений и прочих научных и прикладных задач;

– оперативность – методы и технологии ГНСС в настоящее время обеспечивают субсантиметровую точность практически на всей территории земного шара в любое время и при любых погодных условиях, в то время как с помощью традиционных методов геодезических измерений такую точность можно обеспечить не всегда и не везде;

– производительность – снижение трудозатрат при определении координат точки, так как с применением методов спутниковой геодезии облегчается процесс позиционирования в пространстве, за исключением мест с наличием радиотени;

– актуальность – возможность согласования и сопоставления результатов геодезических измерений с результатами, полученными с помощью международных служб геодезического обеспечения.

Основные недостатки перехода к новым геоцентрическим системам:

– методология перехода – переход к новым системам координат требует значительного времени для разработки методологических основ корректного перевода имеющейся информационной базы на новую технологическую основу формирования систем;

– недостаточно подготовленная техническая база – недостаточное количество реализующих принятые системы пунктов с установленным постоянно действующим оборудованием для приема радионавигационных сигналов от спутников ГНСС;

– недостаточно подготовленная нормативно-правовая база – недостаточное регулирование в области определения структуры и содержания информации в каталогах координат пунктов ГГС, недостаточное регулирование в области создания и функционирования сетей ДГС, отсутствие требований к геодезическим и картографическим работам и их результатам [65];

– отсутствие информации о координатах, получаемых в проекции Гаусса – Крюгера в названном Постановлении Правительства [56] и последующих документах ничего не говорится о региональных системах координат Гаусса – Крюгера [9].

В мировой геодезической практике для различных видов геодезических работ применяются различные системы координат или системы отсчета. Их можно классифицировать по следующим критериям:

1) по форме координат (пространственные прямоугольные – координаты X, Y, Z в декартовой системе координат; эллипсоидальные/геодезические – координаты широты, долготы и высоты над отсчетным эллипсоидом – B, L, H ; плоские

прямоугольные – координаты x, y в проекции Гаусса – Крюгера или Меркатора; сферические – координаты θ, φ, r , заданные зенитным и азимутальным углами и, иногда, расстоянием);

2) по положению начала отсчета (геоцентрические – начало отсчета в центре масс Земли; квазигеоцентрические (референцные) – начало отсчета в центре эллипсоида; топоцентрические – начало отсчета на поверхности Земли в точке наблюдения; барицентрическая – начало отсчета в центре масс тел Солнечной системы);

3) по ориентировке основной координатной плоскости (эклиптические – плоскость XOY лежит в плоскости эклиптики; экваториальные – плоскость XOY лежит в плоскости экватора; горизонтальные – плоскость XOY лежит в плоскости наблюдаемого горизонта; орбитальные – за основную координатную плоскость принимается плоскость орбиты или плоскость, параллельная ей);

4) по ориентировке оси абсцисс (земные – ось абсцисс направлена в точку пересечения меридиана Гринвича с экватором; звездные – ось абсцисс направлена в точку весеннего равноденствия);

5) по отношению к движению Земли по орбите (инерциальные – независимые от вращения Земли; неинерциальные – вращение системы происходит вместе с Землей);

6) по зависимости от временной эволюции носителей координат (статические – носители координатной основы заданы тремя координатами геоцентрического вектора положения пункта; кинематические – носители координатной основы заданы тремя координатами геоцентрического вектора положения пункта, тремя компонентами его скорости и эпохой определения этих параметров; квазистатические – носители координатной основы заданы тремя координатами геоцентрического вектора положения пункта, но только на некоторых из них определены скорости движения на заданную эпоху).

В таблице 1 приведены наиболее распространенные системы координат, используемые в мировой геодезической практике, и их классификация по приведенным критериям.

Таблица 1 – Классификация наиболее популярных систем отсчета (систем координат), используемых в геодезии

Система	1	2	3	4	5	6
ICRS	Сферическая	Барицентрическая	Эклиптическая	Звездная	Инерциальная	Статическая
ITRS	Прямоугольная	Геоцентрическая	Экваториальная	Земная	Неинерциальная	Кинематическая
WGS-84	Прямоугольная	Геоцентрическая	Экваториальная	Земная	Неинерциальная	Кинематическая
ETRS	Прямоугольная	Геоцентрическая	Экваториальная	Земная	Неинерциальная	Кинематическая
NAD-83	Прямоугольная	Референцная	Экваториальная	Земная	Неинерциальная	Статическая
СК-95, СК-45	Прямоугольная	Референцная	Экваториальная	Земная	Неинерциальная	Статическая
ПЗ-90	Прямоугольная	Геоцентрическая	Экваториальная	Земная	Неинерциальная	Кинематическая
ГСК-2011	Прямоугольная	Геоцентрическая	Экваториальная	Земная	Неинерциальная	Квазикинематическая
Местная СК	Прямоугольная	Топоцентрическая	Экваториальная	Земная	Неинерциальная	Статическая

Анализируя приведенную классификацию, можно заметить, что кинематические системы отсчета обязательно являются общеземными – глобальными. Глобальными называют такие системы, в которых осуществляется определение координат, находящихся на орбите спутников, а сеть пунктов покрывает значительную часть земного шара и уравнена совместно. Для координат точек локальной системы нет необходимости вводить зависимость от времени, так как все точки данного участка не имеют движения относительно друг друга. С развитием технологий ГНСС появилась возможность абсолютного позиционирования, которое обеспечивает возможность учета скоростей движения относительно центра масс Земли. Для этого создаются и развиваются сети ДГС, а их протяженность играет ключевую роль, так как небольшие сети ДГС не позволяют определять геодинамические процессы общемирового масштаба [51]. Таким образом, расширение и уплотнение сетей ДГС, реализующих ту или иную систему отсчета, обеспечивает развитие этой системы и повышение ее точности.

1.2 Сети дифференциальных геодезических станций

Важным элементом системы координатного обеспечения являются спутниковые сети ДГС, де-факто реализующие земную систему отсчета. Согласно Федеральному закону № 431-ФЗ от 30.12.2015 [55] дифференциальная геодезическая станция – электронное устройство, размещенное на точке земной поверхности с определенными координатами, выполняющее прием и обработку сигналов спутниковых навигационных систем и обеспечивающее передачу информации, необходимой для повышения точности определения координат в результате выполнения геодезических работ с использованием спутниковых навигационных систем.

Сети ДГС пришли на смену традиционным геодезическим сетям, создаваемыми неземными методами триангуляции, трилатерации, полигонометрии. Основное преимущество сетей ДГС заключается в том, что они образуют единое трехмерное пространственное построение без разделения координатной основы на плановую и высотную составляющую [78]. Сети ДГС отличаются от традиционных геодезических сетей наличием постоянно работающего ГНСС-оборудования на пунктах. Непрерывный поток данных со станций поступает в вычислительные центры, в которых ведется обработка, архивирование, проверка качества данных, а также мониторинг целостности сети, контроль геодинамической ситуации, расчет на основе полученных данных функциональных дополнений в виде дифференциальных поправок, эфемерид спутников, параметров атмосферы, задержек часов, точных координат и других продуктов [8].

Характеристики сетей ДГС задают предел точности реализации земных систем отсчета, определяют доступность высокоточного позиционирования для потребителей при решении практических задач топографии, кадастра, инженерно-геодезических работ, создания и сопровождения геоинформационных систем, высокоточной навигации и т. д. [40].

Согласно ГОСТ Р 55024–2012 [28], а также работе [52] спутниковые геодезические сети по охвату территории принято подразделять на глобальные (обще-

земные), межгосударственные, национальные (государственные), региональные (часть одного государства), локальные (местные).

Области применения таких сетей в геодезической практике, в зависимости от их размеров, варьируются от обеспечения высокоточных инженерно-геодезических работ на стройплощадках до практической реализации общеземной геоцентрической системы отсчета с изучением гравитационного поля Земли и околоземного пространства. Поэтому далее приведены примеры сетей ДГС различного масштаба и их краткое описание.

Глобальные сети ДГС – это эксклюзивный инструмент для обеспечения общемировой координатно-временной основы. Эталонным представителем глобальной спутниковой сети ДГС является сеть Международной ГНСС-службы (International GNSS Service, IGS [104]), поскольку она имеет пункты в самых отдаленных точках земного шара и является наиболее точной и плотной в настоящее время по отношению к другим сетям, развивающимся в глобальном масштабе.

Основой МГС (по состоянию на начало 2020 г.) является глобальная сеть из 506 ДГС, принимающих сигналы от спутников GPS, 191 станция из которых предоставляет данные в режиме реального времени [104, 112, 113]. Для обеспечения непрерывного приема данных ГНСС-станции в МГС существует набор эксплуатационных стандартов, определенных в руководстве по развертыванию и поддержанию станций МГС. Аналитический центр МГС использует ГНСС-измерения, получаемые со станций, по наблюдениям которых вычисляются положения орбит спутников (эфемериды), поправки сдвигов шкал часов, параметры разных слоев атмосферы, параметры вращения Земли, параметры движения земной коры, точные координаты станции и прочие параметры. Таким образом, постоянный поток данных с объединенных пунктов сети МГС формирует и поддерживает глобальную международную земную систему отсчета ITRS [102]. Обязательные и рекомендуемые требования к пунктам, входящим в состав МГС, приведены в директиве [119]. Любые изменения в конфигурации станции должны быть

тщательно спланированы и задокументированы, чтобы минимизировать разрывы во временных рядах приема радиосигналов и обеспечить непрерывную передачу данных от каждой станции в глобальные и региональные дата-центры для анализа и архивирования [115].

Глобальные сети ДГС зачастую развиваются в рамках коммерческих проектов, предоставляющих доступ пользователям к различным видам геопространственных данных, собранным с различных точек экономически активной части земного шара. Глобальные коммерческие спутниковые сети предоставляют доступ к корректирующей информации, RTK-поправкам, высокоточным решениям с помощью онлайн-сервисов обработки спутниковых измерений, эфемеридам космических аппаратов и прочим сервисам предоставления геопространственных услуг. Примеры глобальных сетей ДГС с адресами web-сайтов, на которых приведена информация о них, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Примеры глобальных сетей ДГС

№ п/п	Наименование сети	Страна разработчик	Web-сайт
1	IGS Tracking Network	США	http://igs.org/network
2	Hexagon tracking network	США	https://hxgnsmartnet.com
3	UNAVCO Network	США	https://unavco.org/instrumentation/networks/status/all
4	Trimble Stations	США	https://trimble.com/trs/findtrs.asp
5	Topnet Live	США	http://topnetlive.com
6	SONEL	США	http://sonel.org/-GPS-.html

Глобальные сети ДГС являются высшим звеном в иерархии спутниковых геодезических сетей, поэтому удовлетворяют наивысшим стандартам качества приема радиосигналов. По данным сайта МГС [104], погрешность определения геоцентрических координат станций находится в пределах 3 мм по горизонтальной компоненте и 6 мм по вертикальной, а обновление каталога происходит еженедельно. Данные о точности положения пунктов других коммерческих глобальных спутниковых сетях в открытом доступе отсутствуют.

Межгосударственные (макрорегиональные) сети ДГС. Такие сети предназначены и развиваются для удовлетворения широкого спектра инженерно-технических потребностей и реализаций научно-исследовательских программ в рамках сотрудничества государств в области геодезического и геоинформационного обеспечения. В такие программы входит создание опорной координатной основы, изучение поверхности и гравитационного поля Земли и их изменений во времени, изучение геодинамических процессов на уровне современных и перспективных требований и прочие виды. В таблице 3 приведены примеры некоторых межгосударственных спутниковых геодезических сетей с адресами web-сайтов.

Таблица 3 – Примеры межгосударственных сетей ДГС

№ п/п	Наименование сети	Регион	Web-сайт
1	EPN	Европейский союз	http://epncb.oma.be/
2	SIRGAS-CON	Центральная и Южная Америка	http://sirgas.org/en/
3	NAREF	Северная Америка	–
4	AFREF	Африка	http://afrefdata.org/
5	APREF	Азиатско-Тихоокеанский регион	http://ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/geodesy/asia-pacific-reference-frame

В настоящее время разрабатывается план по созданию региональных сетей ДГС в Северо-Восточной Евразии NEEREF, а также в Антарктиде [110, 113].

Национальные (государственные) сети ДГС. Такие сети предназначены для построения координатной основы, распространения единой системы координат по территории страны, геодезического и картографирования обеспечения этой территории, изучения поверхности и гравитационного поля Земли и их изменений во времени, для решения различных видов научно-практических, экономических и технических задач [28]. В настоящее время национальные спутниковые сети ДГС развиваются в большинстве стран мира. Примеры наиболее известных и крупных национальных сетей приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Примеры национальных сетей ДГС

№ п/п	Наименование сети	Государство	Web-сайт
1	ФАГС	Россия	https://rgs-centre.ru/
2	The National CORS Network	США	https://www.ngs.noaa.gov/CORS/
3	Canadian Active Control System	Канада	https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/data-donnees/cacs-scca.php?locale=en
4	Australian Regional GPS Network	Австралия	http://www.ga.gov.au/geodesy/argn/
5	German National Survey Satellite Positioning Service SAPOS	Германия	https://www.sapos.de/
6	GeoNet	Новая Зеландия	https://www.geonet.org.nz/

Наиболее развитой и плотной национальной сетью ДГС считается Национальная сеть постоянно действующих базовых станций США – The National Continuously Operating Reference Station Network (CORS) [116]. Она развивалась параллельно с сетью МГС, поэтому некоторые пункты принадлежат обоим сетям, внося обоюдный вклад в поддержание систем отсчета, которые они реализуют. Сеть CORS соответствует сети МГС на уровне первых сантиметров. По данным Национальной геодезической службы США на конец 2019 г., в сеть включено 2 745 станций, что делает сеть самой многочисленной национальной сетью в мире по количеству пунктов.

Национальная сеть ДГС Российской Федерации входит в состав современной государственной геодезической сети (ГГС) России. В структуру ГГС, помимо совокупности пассивных геодезических пунктов, равномерно расположенных по территории и закрепленных специальными центрами, включены пункты с постоянно действующим оборудованием для приема радиосигналов различных ГНСС для обеспечения возможности определения точных координат в геоцентрической системе в режиме, близком к реальному времени.

Согласно Приказу Минэкономразвития России от 29 марта 2017 года № 138 «Об установлении структуры государственной геодезической сети и требований к созданию государственной геодезической сети, включая требования к геодезическим пунктам» [57], ГГС России структурно формируется в соответствии с принципом перехода от общего к частному и включает в себя построения различных

классов точности: фундаментальная астрономо-геодезическая сеть (ФАГС), высокоточная геодезическая сеть (ВГС), спутниковая геодезическая сеть 1-го класса (СГС-1). На рисунке 2 приведено расположение сети пунктов ФАГС и пунктов ВГС. В структуру государственной геодезической сети также входят ранее созданные геодезические сети: астрономо-геодезическая сеть 1-го и 2-го классов, геодезическая сеть сгущения 3-го и 4-го классов.

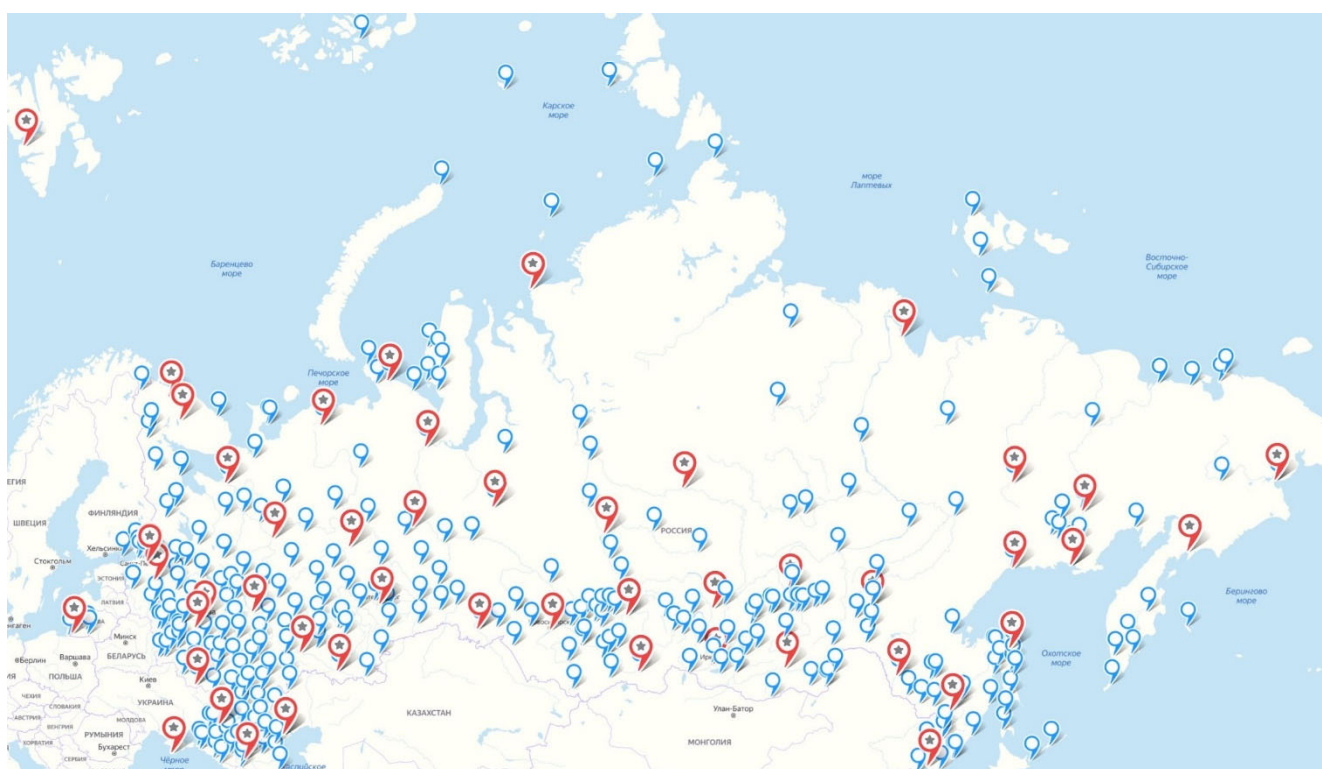


Рисунок 2 – Расположение пунктов ФАГС и ВГС

Фундаментальная астрономо-геодезическая сеть – это высшее звено в структуре координатного обеспечения России. Пункты ФАГС равномерно распределены по территории страны при средних расстояниях между ними 650–1 000 км. Взаимное положение смежных пунктов должно быть определено с погрешностью не грубее 2 см в плане и 3 см по высоте, а относительно центра масс Земли – не грубее

$$3 \text{ мм} \times R \times 10^{-8},$$

где R – средний радиус Земли в миллиметрах, что составляет около 20 см [31].

На сегодняшний день количество пунктов ФАГС с установленным постоянно действующим оборудованием достигает 53. Часть пунктов ФАГС является постоянно действующими геодинамическими обсерваториями. В их число включены три станции радиоинтерферометрического комплекса «Квазар», расположенные в п. Светлое (Ленинградская область), п. Бадары (г. Иркутск), п. Зеленчук (Северный Кавказ) [87, 88, 68], и четыре пункта Госстандарта, работающих по программе «Дельта» (в городах Менделеево, Новосибирск, Иркутск, Благовещенск) [21]. Пункты ФАГС включены в сеть высокоточного нивелирования. На всех пунктах ФАГС выполнены и регулярно повторяются абсолютные определения силы тяжести, что позволяет контролировать стабильность гравитационного поля на крупных территориях. Таким образом, на пункты ФАГС возложена дополнительная роль пунктов Государственной фундаментальной гравиметрической сети.

Количество пунктов ВГС по данным Росреестра составляет 308. Сеть пунктов ВГС сформирована с опорой на пункты ФАГС и также является однородным построением. Смежные расстояния между пунктами составляют 150–300 км [29].

Спутниковая геодезическая сеть 1-го класса – третий уровень сгущения ГГС. Исходная основа для построения СГС-1 – ближайшие пункты ФАГС и ВГС. СГС-1 создают по мере необходимости в регионах. Она предназначена для создания оптимальных условий перевода геодезического обеспечения территории страны на спутниковые методы определения координат. Средние расстояния между смежными пунктами 25–30 км, общее число пунктов в настоящее время около 12–15 тысяч. По специальным заказам министерств и ведомств на отдельных участках страны СГС-1 может создаваться с повышенной плотностью [30].

Региональные сети ДГС. Создание региональных сетей ДГС для обеспечения геодезических, маркшейдерских и кадастровых работ позволяет существенно сократить расходы на создание опорного обоснования (опорной межевой сети) и поддержании ее в рабочем состоянии. К региональным можно отнести сети ДГС, которые могут быть использованы для закрепления единой координатно-временной основы на территории государства или его части [40]. Региональные

сети ДГС также используются для формирования корректирующей информации и РТК-поправок для упрощения ведения геодезических работ с помощью технологий ГНСС.

Ярким примером региональных сетей ДГС являются сети, созданные в регионах России. К региональным сетям ДГС могут быть отнесены национальные сети, так как часто их протяженность сопоставима. В работе [113] приведен список региональных сетей ДГС, расположенных по всему миру. В таблице 5 приведены примеры некоторых региональных сетей ДГС, расположенных в России, и адреса web-сайтов с информацией о них.

Таблица 5 – Примеры российских региональных сетей ДГС

№ п/п	Наименование сети	Регион	Web-сайт
1	HIVE	Россия	https://hive.geosystems.aero/
2	EFT CORS	Россия	https://eft-cors.ru/
3	SmartNet	Россия	http://smartnet-ru.com/
4	GSI Network	Россия	http://topnet.gsi.ru
5	UGT Holding	Россия	http://ugt-holding.com/reference_stations_ugt-holding
6	PRINNET	Россия	http://prin.ru/seti_referencyh_stancij/prinnet/
7	RTKNET	Россия	http://rtknet.ru
8	Сеть ДГС БТИ	Россия	http://гнсс.рф
9	Сеть ДГС	Тюменская область	http://ggs72.ru
10	Сеть ДГС	Новосибирская область	http://cngt.nso.ru/page/25
11	Сеть ДГС	Республика Башкортостан	http://tncrb.ru/WebSPTN/
12	Сеть ДГС	Ленинградская область	http://geospider.ru/
13	Сеть ДГС	Республика Бурятия	http://geo-baikal.ru/spiderweb/frmIndex.aspx
14	Сеть ДГС	Красноярская область	https://krastehcentr.ru/
15	Сеть ДГС	Пермская область	http://ctipk.ru/sstp_access
16	Сеть ДГС	Курская область	https://rcny.ru/2/
17	Сеть ДГС	Томская область	http://admin.tomsk.ru/pgs/2rp
18	Сеть ДГС	Ямало-Ненецкий автономный округ	https://tbd.ru/osvtp/osvtp_index.php
19	Сеть ДГС	Республика Коми	http://gis.rkomi.ru/
20	Сеть ДГС	Калужская область	http://giskaluga.ru/projects/ripd/RSKVGGO/
21	Сеть ДГС	Кировская область	http://kirovgiprozem.ru/ftp/
22	Сеть ДГС	Республика Чувашия	http://rs.cap.ru/login.aspx
23	Сеть ДГС	Ханты-Мансийский автономный округ	https://cio-hmao.ru/референцные-станции/
24	Сеть ДГС	Республика Крым	http://internet-spider.rosinv.ru/SpiderWeb/frmIndex.aspx

Местные сети ДГС. Такие сети создаются на отдельных объектах, таких как месторождения полезных ископаемых, карьеры, строительные площадки, или на территориях некрупных городов. Зачастую оборудование для приема радионавигационной информации работает не постоянно, а только при формировании сети или во время проведения работ, в отличие от вышеперечисленных сетей, в которых, как правило, ГНСС-оборудование, установленное на пунктах, работает постоянно и бесперебойно. Математическую обработку измерений в таких сетях выполняют в местной или условной системе координат, в которой центр системы и ориентация осей отличны от соответствующих элементов, установленных для государственной геодезической системы координат. Такая система устанавливается на отдельные участки территорий площадью до 5 000 км² либо в пределах территории одного административного района или административно-территориальной единицы субъекта Российской Федерации. Также к местным спутниковым сетям можно отнести специальные геодезические сети на геодинамических полигонах.

1.3 Проблемы эксплуатации и развития государственной геодезической системы координат 2011 года

Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 ноября 2016 г. № 1240 [56] в качестве единой государственной системы координат для использования при осуществлении геодезических и картографических работ установлена геодезическая система координат ГСК-2011. При введении в эксплуатацию ГСК-2011 возник ряд проблем разнонаправленного характера, описанных в научно-технической литературе [2, 35, 60, 65, 69]. Авторы работ [61, 77] к недостаткам перед существующими зарубежными системами отсчета добавляют тот факт, что модель эволюции координат ГСК-2011 в основном статическая – в каталоге каждый пункт определяется тремя координатами X , Y , Z на фиксированную эпоху каталога T_0 . Не все пункты ГСК-2011 в настоящее время имеют кинематическую модель эволюции координат. Для сравнения: в системах ITRF и WGS-84 модель эволюции координат всех пунктов кинематическая, т. е. в каталоге каждый пункт

определяется семью параметрами $(X, Y, Z, R_x, R_y, R_z, T_0)$: тремя координатами X, Y, Z положения пункта, тремя компонентами его скорости R_x, R_y, R_z и эпохой каталога T_0 .

Расширение и уплотнение сети пунктов, реализующих российскую систему ГСК-2011, ведется с некоторым отставанием от передовых стран – лидеров в области формирования общемировой координатно-временной основы. Однако развитие российской государственной координатной основы ускоряется. За 2019 г., количество пунктов ФАГС, реализующих систему ГСК-2011, с установленным постоянно действующим оборудованием выросло с 45 до 53, включая развертывание новых пунктов за пределами границ России. В настоящее время к ГНСС-измерениям всех 53 пунктов ФАГС имеется свободный доступ на официальном сайте центра геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных (ЦГКиИПД) [86]. Это дает возможность непосредственного определения координат новых пунктов в системе ГСК-2011 через пункты ФАГС относительным методом, но со значительным понижением точности из-за возможного большого расстояния до определяемого пункта от опорных пунктов ФАГС.

Территория РФ располагается на четырех литосферных плитах и большом количестве платформ и блоков, скорости и направления движения которых отличаются. Поскольку параметры этих движений имеют нелинейный характер и изменяются в зависимости от множества факторов, должен быть установлен интервал между эпохами, на которые фиксируются координаты опорных пунктов государственной отсчетной основы. В настоящее время интервал между эпохами не установлен. С эпохи 2011,0, на которую были определены опорные пункты ГСК-2011, прошло более 9 лет. В это время для сети Международной земной отсчетной основы ITRF, в состав которой входят пункты МГС, интервал переопределения координат и скоростей движения пунктов составил 6 лет: ITRF-2008 была установлена на эпоху 2005,0, а следующая – ITRF-2014 – на эпоху 2010,0. При этом сеть ITRF формируют более устойчивые пункты, характеризующиеся стабильностью параметров движения.

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 движение тектонических плит, скорости и направления движения пунктов, реализующих данную основу, должны быть учтены. В ITRF они учтены, что делает эту систему самой точной общеземной геоцентрической системой [120, 123]. Тектоническая активность не влияет на смещение или 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 (национальные, региональные, местные), являются статическими системами координат, так как собственные движения опорных пунктов в данном случае не подразумеваются. Кинематическими системами называют системы отсчета, 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.

ГСК-2011 введена Постановлением Правительства РФ [56] для использования при осуществлении геодезических и картографических работ. Разработкой методологических основ применения на практике координатной основы ГСК-2011 занимаются многие эксперты, о чем докладывают в сборниках научных трудов и на различных конференциях. Работы [26, 32, 72] посвящены описанию построения ГСК-2011. Работы [12, 35, 65, 69] посвящены проблемам использования этой координатной основы в геодезической практике. 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 [27], 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 невозможна, в том числе по указанной ниже 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, созданная для ведения геодезических и картографических работ, реализованная набором пунктов ФАГС, ВСГ, СГС-1, де-факто является региональной реализацией глобальной системы отсчета.

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 марта 2016 г. № 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 [12, 34, 48]. Это ведет к систематическому увеличению погрешностей при трансформации координат и прочим несоответ-

ствиям. Рост погрешности соответствует скорости движения тектонических плит, на которых расположены пункты ФАГС.

Следовательно, не замечать проблему нарастания погрешностей в результатах высокоточного позиционирования уже нельзя. Она проявляется в следующем:

– при уравнивании сетей с опорой на пункты, реализующие глобальную систему отсчета, 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. Такие несоответствия будут рассмотрены во втором разделе диссертации.

Данные проблемы можно решить, вводя поправку за смещение пунктов региональной сети ДГС. Но для ведения геодезических работ постоянное изменение координат пунктов создает значительные трудности и осложняет геодезическое производство. Однако накапливающиеся расхождения между региональной или локальной реализацией глобальной системы отсчета и самой глобальной системой отсчета из-за движения тектонических плит может превышать 30 см за 10 лет. При вычислении векторов базовых линий использование координат объектов в таких 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 или региональной 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 или региональных статических реализациях пунктами сетей ДГС в долгосрочной перспективе. Такая методика описана во втором разделе диссертации.

1.4 Проблемы эксплуатации и развития спутниковых геодезических сетей в России

В последние десятилетия прогресс в развитии высокоточного координатного обеспечения во многом связан с применением технологий ГНСС. С помощью методов космической геодезии стали создаваться спутниковые сети ДГС, что привело к повышению точности КВНО как в общемировом масштабе, так и в масштабе отдельных государств. Количество сетей растет и уже покрывает значительную часть наиболее экономически активного пространства. Почти в каждом регионе функционирует сеть для удовлетворения потребностей геодезического сообщества в навигационно-измерительной информации.

На сегодняшний день в России существует ряд причин, по которым достижение уровня точности, сопоставимого с уровнем, достигнутым передовыми странами в области КВНО, является невыполнимой задачей, если не решать комплекс проблем разнонаправленного характера. Их детальное описание, а также предпринимаемые шаги для их устранения приведены в публикациях [3, 23, 34, 64, 66]. К ним относятся проблемы правового, организационно-экономического и технологического характера.

Поскольку в приведенных источниках проблемы эксплуатации и развития спутниковых сетей ДГС описаны детально, далее, в соответствии с тематикой исследования, кратко перечислены основные проблемы, связанные с отсутствием учета временного фактора при эксплуатации сетей ДГС.

1 Невозможность совместного использования сетей ДГС в масштабе единой государственной геодезической сети. В настоящее время в России функционирует порядка 1 600 ДГС, значительная часть из которых была создана в течение последних 20 лет в условиях недостаточно качественного нормативно-технического и правового регулирования со стороны государства. Сейчас вся совокупность сетей ДГС на территории России представляет собой подобие лоскутного одеяла, различные фрагменты которого создавались в разное время различными государственными и частными организациями без какого-либо контроля со стороны госу-

дарства. Особенно остро недостаточное регулирование отразилось на невозможности установления эпохи, на которую были определены координаты пунктов сетей ДГС. Зачастую она не известна, что значительно понижает точность ГНСС-решений при совместном использовании различных сетей ДГС [66]. Данный фактор должен быть учтен, так как геотектонические процессы значительно влияют на точность и определения актуального положения пунктов сети и их взаимное ориентирование в общеземной координатной системе отсчета.

2 Нерегламентированность учета скоростей движения пунктов создаваемых региональных сетей ДГС. Исключение существует только для пунктов, реализующих систему координат ПЗ-90.11. Учет их движения в настоящее время регламентирован только для координатного обеспечения орбитальных полетов спутников ГНСС и выполнения геодезических и картографических работ в интересах Министерства обороны РФ [4]. Специалист, выполняющий высокоточные спутниковые геодезические работы, вынужден пересчитывать координаты ITRF/WGS-84 с текущей эпохи на опорную эпоху ГСК-2011 (2011,0) в соответствии с собственными представлениями о скоростях и направлениях движений пунктов земной поверхности. Это связано с тем, что ни в каких нормативно-технических документах, регламентирующих процесс высокоточных спутниковых геодезических измерений, ничего об учете скоростей не сказано. Затем зачастую результаты работ пересчитываются в другие системы координат (СК-42, СК-95, СК-63 и МСК), что приводит к нарастающему кумулированию ошибок.

3 Отсутствие обязательного интервала переопределения координат. На практике не всегда необходимо вносить изменения в координаты опорных пунктов геодезических сетей. Однако спутниковые сети ДГС принимают измерения от спутников, координаты которых заданы в глобальной системе отсчета. Таким образом, вследствие движения тектонических плит пункты сетей ДГС меняют свое местоположение относительно системы отсчета, используемой для определения эфемерид спутников ГНСС. Движения пунктов сетей ДГС в глобальной системе отсчета имеют нелинейный характер, а точность реализации глобальной системы

отсчета постоянно повышается. Поэтому определение и учет скоростей движения пунктов необходимо контролировать и переопределять с определенной частотой. В настоящий момент в России ни частота обязательного переопределения координат, ни требования к определению скоростей движения пунктов не установлены. Несмотря на то, что скорость движения точек, например, на территории Новосибирской области составляет около 3 см в год, что эквивалентно точности ведения кадастровых работ. В работе [12] приведен краткий расчет и информация и о том, в сетях какого класса точности движением пунктов вследствие геодинимических процессов можно пренебречь и на каком временном интервале.

4 Отсутствие обязательных требований к развертыванию и эксплуатации сетей ДГС и требований к качеству принимаемых радионавигационных сигналов. В России в настоящее время не принято нормативно-технических документов, регламентирующих развертывание, уравнивание и применение сетей ДГС. Это позволяет различным геодезическим компаниям устанавливать пункты с постоянно действующим оборудованием удобным для себя способом, с приемлемой для собственных нужд точностью [47] и уравнивать сети пунктов в системах координат, зачастую отличных от государственных. Согласно ст. 9 Федерального закона № 431-ФЗ [55], задача разработки требований к специальным геодезическим сетям гражданского назначения, включая сети дифференциальных геодезических станций (ДГС), возложена на орган исполнительной власти, осуществляющий функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в сфере геодезии и картографии, т. е. на Минэкономразвития. В настоящее время такие требования еще не разработаны [66]. Такая ситуация может привести к тому, что качество принимаемых радионавигационных сигналов на разных станциях сети может существенно отличаться. В работе [80] приведена оценка качества принимаемых радиосигналов пунктами сетей ДГС различного уровня (глобальными, национальными, региональными) и проведено сравнение качества радиосигналов, принимаемых пунктами этих сетей. Отмеченный подход привел к тому, что на территориях многих городов стали

создаваться различными ведомственными организациями независимые геодезические сети, которые в целом ряде случаев базировались на разных, слабо согласованных друг с другом координатных системах, а также на различных исходных данных. В настоящее время еще существуют геодезические сети, в которых координаты пунктов определены в ранее принятых системах координат и высот с обеспечением связи с государственной системой координат СК 95 и Балтийской системой высот 1977 г. Поэтому преобразования координат пунктов из одной системы координат в другую – это одна из самых распространенных задачах спутниковой геодезии [45].

5 Отсутствие требований к хранению навигационно-измерительной информации, получаемой с пунктов региональных сетей ДГС. В настоящее время операторы сетей ДГС не обязаны хранить навигационно-измерительную информацию, получаемую ГНСС-оборудованием на пунктах. Зачастую полученные данные хранятся в лучшем случае за последний год. Это связано с дополнительными затратами на серверное оборудование и его обслуживание. В основном сети ДГС и полученные с них данные используются для формирования дифференциальных поправок – информации для повышения точности спутниковых геодезических измерений, выполняемых на объектах. Такая информация предназначена для продажи пользователям в режиме онлайн, после чего становится невостребованной. Однако непосредственные ГНСС-измерения с пунктов могут принести большую пользу научному сообществу, так как ценность опорных пунктов ДГС заключается в их истории. Спутниковые измерения на пунктах государственной геодезической сети в соответствии с ГОСТ Р 55024–2012 [28] должны сохраняться в «...специальных каталогах на машинных носителях...», но о продолжительности хранения такой информации не сказано. ГНСС-измерения на постоянно действующих пунктах ФАГС стали проводиться с 2011 г. Самые ранние измерения нескольких пунктов доступны на официальном сайте ЦГКиИПД [86] не ранее 2017 г. Сложившаяся ситуация не позволяет делать точные выводы о движении пунктов ДГС на территории России.

Вышеприведенный перечень проблем не является исчерпывающим. Он относится к вопросам, связанным с недостаточным регулированием в области

учета движений пунктов региональных сетей ДГС вследствие геодинамических процессов.

Пользователи технологий ГНСС решают такие проблемы путем определения статических параметров связи между глобальной кинематической системой отсчета и ее локальной статической реализацией на небольшой территории района работ или в местной системе координат на определенную временную эпоху.

На этом этапе возникает следующая проблема. Координаты, полученные от опорных станций региональной сети ДГС относительным методом или в режиме РТК, не соответствуют результатам, полученным с применением метода позиционирования PPP или с результатами, полученными относительным методом от станций МГС/ITRF (в координаты этих станций введены поправки за тектонические движения). Возникшие расхождения обусловлены тем, что координаты опорных пунктов региональной сети ДГС определены на эпоху, отличную от эпохи, на которую выполняются ГНСС-измерения.

В странах, имеющих собственные национальные системы координат (системы отсчета), решение таких проблем заключается следующим образом. Практическое выполнение геодезических работ ведется в статических или квазистатических государственных системах координат, связь которых с глобальными системами отсчета не является статической и установлена с помощью 14-параметрического преобразования Гельмерта (семь параметров трансформации и семь скоростей измерения параметров). Выходом из сложившейся ситуации для России может стать аналогичный подход. Однако однозначным определением параметров связи и скоростей их изменений для всей страны обойтись не удастся из-за обширных территорий и того факта, что Россия расположена на четырех тектонических плитах и некотором количестве внутриплитовых блоков с различными скоростями и направлениями движения. Поэтому такой подход необходимо дифференцировать по регионам, а результаты оценки скоростей изменения параметров связи, полученные в каждом регионе, нужно сопоставлять с общефедеральными значениями [13]. В третьем разделе диссертации сопоставлены между собой значения скоростей

изменения параметров связи для локальной реализации глобальной системы отсчета пунктами сети ДГС Новосибирской области и региональной реализации пунктами федеральной сети ФАГС.

1.5 Принцип взаимосвязи систем координат и систем отсчета

В работах [5, 21, 40] создаваемые региональные и другие сети ДГС рассматриваются как некая реализация глобальной системы отсчета, которая сформирована пунктами этих сетей на локальном участке земной поверхности. Таким образом, предполагается разделение глобальных реализаций систем отсчета (WGS-84/ITRF), представленных пунктами глобальных сетей ДГС и эфемеридами космических аппаратов, и региональных реализаций этой же системы отсчета, представленных небольшими по протяженности региональными сетями ДГС, зафиксированными на конкретный временной промежуток.

Связь между глобальной системой отсчета с ее локальной реализацией устанавливаются с помощью стандартной процедуры калибровки (или локализации), заключающейся, как правило, в вычислении семи параметров трансформации на небольшой территории района работ за короткий промежуток времени. Такой подход обеспечивает более строгое согласование систем, так как региональные реализации общеземных систем отсчета характеризуются не только постоянным смещением, обусловленным движением тектонических плит и погрешностями геодезической привязки, но и, помимо систематического смещения, разворотом относительно реализаций глобальных систем отсчета. В этом случае скорости движения пунктов региональных сетей ДГС почти никогда в расчет не принимают, так как параметры преобразования обеспечивают достижение требуемой точности на небольшом участке района геодезических работ на коротком временном интервале, в течение которого геодинамические процессы не внесут существенный вклад в снижение точности.

Интерпретация региональных сетей ДГС как локальной реализации глобальной системы отсчета укладывается в сформированный в геодезической прак-

тике принцип взаимосвязи глобальной системы отсчета и местных систем координат, который описан схемой, приведенной на рисунке 3.



Рисунок 3 – Схема взаимосвязи систем отсчета и систем координат

Стандартная связь двух 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:

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

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.

1.6 Обзор методов определения параметров связи геоцентрических систем

Методика определения параметров связи систем координат, основанная на классическом методе наименьших квадратов. В работе [75] приводится описание алгоритма оценки семи параметров связи переопределенной системы уравнений (1) с применением метода наименьших квадратов, который математически представляется как:

$$S(T, R, D) = \sum_{i=1}^n (\mathbf{X}_{2i} - (\mathbf{X}_{1i} + T + D\mathbf{X}_{1i} + R\mathbf{X}_{1i}))^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

где T, D, R – матрицы оцениваемых параметров.

Так как сумма в данном случае состоит из матриц разной размерности, то в соответствии с правилами умножения матриц функциональная зависимость будет иметь вид системы уравнений:

$$\begin{cases} S(T_x, R_y, R_z, D) = \sum_{i=1}^n (x_{2i} - (T_x + D(x_{1i} - R_z y_{1i} + R_y z_{1i})))^2, \\ S(T_y, R_x, R_z, D) = \sum_{i=1}^n (y_{2i} - (T_y + D(R_z x_{1i} + y_{1i} - R_x z_{1i})))^2, \\ S(T_z, R_x, R_y, D) = \sum_{i=1}^n (z_{2i} - (T_z + D(-R_y x_{1i} + R_x y_{1i} + z_{1i})))^2. \end{cases} \quad (3)$$

Принцип метода наименьших квадратов заключается в поиске минимума суммы квадратов разностей S при подстановке оцениваемых параметров. Мини-

мум достигается, когда частные производные от суммы S по оцениваемым параметрам равны нулю:

$$\delta S / \delta T_{(x,y,z)} = 0, \quad \delta S / \delta D = 0, \quad \delta S / \delta R_{(x,y,z)} = 0. \quad (4)$$

Таким образом, продифференцировав выражение по оцениваемым параметрам с учетом правил умножения матриц и приравняв производные к нулю, система уравнений принимает вид из 12 уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} DR_z \sum_{i=1}^n y_{1i} - DR_y \sum_{i=1}^n z_{1i} - D \sum_{i=1}^n x_{1i} - T_x = \sum_{i=1}^n x_{2i}, \\ DR_z \sum_{i=1}^n y_{1i} z_{1i} - DR_y \sum_{i=1}^n z_{1i}^2 - D \sum_{i=1}^n x_{1i} z_{1i} - T_x \sum_{i=1}^n z_i = \sum_{i=1}^n x_{2i} z_{1i}, \\ -DR_z \sum_{i=1}^n y_{1i}^2 + DR_y \sum_{i=1}^n y_{1i} z_{1i} + D \sum_{i=1}^n x_{1i} y_{1i} - T_x \sum_{i=1}^n y_i = \sum_{i=1}^n x_{2i} y_{1i}, \\ -R_z \sum_{i=1}^n y_{1i} + R_y \sum_{i=1}^n z_{1i} = \sum_{i=1}^n x_{1i}, \\ -DR_z \sum_{i=1}^n x_{1i} + DR_x \sum_{i=1}^n z_{1i} - D \sum_{i=1}^n y_{1i} - T_y = \sum_{i=1}^n y_{2i}, \\ DR_z \sum_{i=1}^n x_{1i} z_{1i} - DR_x \sum_{i=1}^n z_{1i}^2 + D \sum_{i=1}^n y_{1i} z_{1i} + T_y \sum_{i=1}^n z_{1i} = \sum_{i=1}^n y_{2i} z_{1i}, \\ -DR_z \sum_{i=1}^n x_{1i}^2 + DR_x \sum_{i=1}^n x_{1i} z_{1i} - D \sum_{i=1}^n x_{1i} y_{1i} - T_y \sum_{i=1}^n x_{1i} = \sum_{i=1}^n y_{2i} x_{1i}, \\ R_z \sum_{i=1}^n x_{1i} - R_x \sum_{i=1}^n z_{1i} = \sum_{i=1}^n y_{1i}, \\ -DR_x \sum_{i=1}^n y_{1i} + DR_y \sum_{i=1}^n x_{1i} - D \sum_{i=1}^n z_{1i} - T_z = \sum_{i=1}^n z_{2i}, \\ -DR_x \sum_{i=1}^n y_{1i}^2 + DR_y \sum_{i=1}^n x_{1i} y_{1i} - D \sum_{i=1}^n y_{1i} z_{1i} - T_z \sum_{i=1}^n y_{1i} = \sum_{i=1}^n z_{2i} y_{1i}, \\ DR_x \sum_{i=1}^n x_{1i} y_{1i} - DR_y \sum_{i=1}^n x_{1i}^2 + D \sum_{i=1}^n x_{1i} z_{1i} + T_z \sum_{i=1}^n x_{1i} = \sum_{i=1}^n z_{2i} x_{1i}, \\ R_x \sum_{i=1}^n y_{1i} - R_y \sum_{i=1}^n x_{1i} = \sum_{i=1}^n z_{1i}. \end{array} \right. \quad (5)$$

Семь параметров связи систем можно получить, решив полученную систему уравнений, например, методом подстановки.

Метод установления связи систем координат, основанный на итерационном процессе Ньютона. Описание данного метода приводится в работе [36]. В соответствии с общей формулой связи геоцентрических систем координат (1), оценка семи параметров из составленной переопределенной системы векторных уравнений может быть выполнена с применением метода, основанного на ньютоновском итерационном процессе. В данном методе матрица R представлена элементами ортогональной матрицы поворота, которые являются нелинейными функциями углов вращения вокруг соответствующих осей координат: ω_x , ω_y , ω_z . Сдвиг

начал и развороты осей первой и второй систем координат учитываются при помощи матрицы поворота P на три Эйлеровых угла:

$$P = \Omega_y \Omega_x \Omega_z, \quad (6)$$

где

$$\Omega_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega x & \sin \omega x \\ 0 & -\sin \omega x & \cos \omega x \end{pmatrix}, \quad \Omega_y = \begin{pmatrix} \cos \omega y & 0 & \sin \omega y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \omega y & 0 & \cos \omega y \end{pmatrix},$$

$$\Omega_z = \begin{pmatrix} \cos \omega z & \sin \omega z & 0 \\ -\sin \omega z & \cos \omega z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

В соответствии с правилами умножения матриц в указанном порядке получены элементы ортогональной матрицы P :

$$P = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Чтобы перейти от ортогональной матрицы поворота P к углам вращения вокруг координатных осей, используются формулы:

$$\operatorname{tg} \omega z = \frac{-a_{11}}{a_{22}}, \quad \sin \omega x = a_{23}, \quad \operatorname{tg} \omega y = \frac{-a_{13}}{a_{33}}. \quad (8)$$

Предположим, что известны некоторые априорные значения параметров связи систем $\omega_x^0, \omega_y^0, \omega_z^0, T_x^0, T_y^0, T_z^0, D^0$. С этими значениями линейризуем выражение (1). В результате получим для каждой точки, в которой определены координаты в первой и во второй системах координат, три уравнения поправок, которые в матричной форме имеют вид

$$\begin{pmatrix} A_x & B_x & C_x & E_x & 1 & 0 & 0 \\ A_y & B_y & C_y & E_y & 0 & 1 & 0 \\ A_z & B_z & C_z & E_z & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dD \\ d\omega_x \\ d\omega_y \\ d\omega_z \\ dT_x \\ dT_x \\ dT_x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где $A_x, A_y, A_z, B_x, \dots, E_z$ – частные производные по $D, \omega_x, \omega_y, \omega_z$ соответствующих координат, $\mathbf{L} = (l_x, l_y, l_z)^T$ – вектор свободных членов уравнения поправок:

$$l_x = x_2 - x_2^0, l_y = y_2 - y_2^0, l_z = z_2 - z_2^0, \quad (10)$$

где величины x_2, y_2, z_2 вычисляются по формуле (1) с априорными значениями параметров трансформации $\omega_x^0, \omega_y^0, \omega_z^0, T_x^0, T_y^0, T_z^0, D^0$;

$\mathbf{V} = (v_x, v_y, v_z)^T$ – вектор поправок координат точек во второй системе. Они определяются по методу наименьших квадратов, согласно условию:

$$\sum v^2 \rightarrow \min. \quad (11)$$

Объединяя уравнения поправок для n точек, получаем систему нормальных уравнений, которая решается по методу наименьших квадратов:

$$\Delta \mathbf{X} = (A^T A^{-1}) A^T L, \quad (12)$$

где $\Delta \mathbf{X}$ – вектор поправок к априорным значениям параметров связи систем (1), причем:

$$\Delta \mathbf{X}^T = (\Delta D \quad \Delta \omega_x \quad \Delta \omega_y \quad \Delta \omega_z \quad \Delta T_x \quad \Delta T_y \quad \Delta T_z). \quad (13)$$

Затем необходимо вычислить значения уточняемых параметров в первом приближении:

$$D^1 = D^0 + \Delta D, \omega_x^1 = \omega_x^0 + \Delta \omega_x, \omega_y^1 = \omega_y^0 + \Delta \omega_y, \omega_z^1 = \omega_z^0 + \Delta \omega_z, \quad (14)$$

$$T_x^1 = T_x^0 + \Delta T_x, T_y^1 = T_y^0 + \Delta T_y, T_z^1 = T_z^0 + \Delta T_z.$$

Далее следует принять полученные параметры в качестве исходных и повторить процесс (9)–(14) снова. В результате будут получены уточненные параметры связи систем во втором приближении: $\omega_x^2, \omega_y^2, \omega_z^2, T_x^2, T_y^2, T_z^2, D^2$.

Процесс необходимо повторять до тех пор, пока не будет выполнено условие:

$$|\mathbf{X}^{k+1} - \mathbf{X}^k| < \varepsilon, \quad (15)$$

где $\mathbf{X}^k = (\omega_x^k, \omega_y^k, \omega_z^k, T_x^k, T_y^k, T_z^k, D^k)^T$ – вектор неизвестных, k – номер итерации, ε – вектор, характеризующий точность вычислений.

При организации итерационного процесса можно не исправлять элементы матрицы, входящей в уравнение (10), а принять их постоянными, вычисленными с априорными значениями определяемых параметров, принятых в начальном приближении. Процесс итераций в этом случае называется модифицированным методом. Он будет сходиться со скоростью арифметической прогрессии. Но удобнее исправлять элементы этой матрицы, тогда процесс будет быстрее сходиться со скоростью геометрической прогрессии.

После выполнения условий (15) необходимо перейти к оценке точности, для чего в заключительной итерации вычисляется вектор поправок \mathbf{V} :

$$\mathbf{V} = A\Delta\mathbf{X} - \mathbf{L}, \quad (16)$$

затем вычисляется ошибка единицы веса:

$$\mu^2 = \frac{\mathbf{V}^T \mathbf{V}}{n-1}, \quad (17)$$

и определяются средние квадратические погрешности параметров связи систем:

$$m_D = \mu\sqrt{Q_{11}}, m_{\omega_x} = \mu\sqrt{Q_{22}}, \dots, m_{T_Z} = \mu\sqrt{Q_{77}}, \quad (18)$$

где $Q_{11}, Q_{22}, \dots, Q_{77}$ – диагональные элементы обратной матрицы нормальных уравнений,

$$N = (A^T A)^{-1}. \quad (19)$$

Формулы для вычисления элементов матрицы уравнений поправок, которые определяются дифференцированием основного соотношения (1) по параметрам преобразования, имеют следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_x = \frac{\delta X_2}{\delta D} = a_{11}x_1 + a_{12}y_1 + a_{13}z_1, \\ B_x = \frac{\delta X_2}{\delta \omega x} = D \left(\frac{\delta a_{11}}{\delta \omega x} x_1 + \frac{\delta a_{12}}{\delta \omega x} y_1 + \frac{\delta a_{13}}{\delta \omega x} z_1 \right), \\ C_x = \frac{\delta X_2}{\delta \omega y} = D \left(\frac{\delta a_{11}}{\delta \omega y} x_1 + \frac{\delta a_{12}}{\delta \omega y} y_1 + \frac{\delta a_{13}}{\delta \omega y} z_1 \right), \\ E_x = \frac{\delta X_2}{\delta \omega z} = D \left(\frac{\delta a_{11}}{\delta \omega z} x_1 + \frac{\delta a_{12}}{\delta \omega z} y_1 + \frac{\delta a_{13}}{\delta \omega z} z_1 \right), \\ A_y = \frac{\delta Y_2}{\delta D} = a_{21}x_1 + a_{22}y_1 + a_{23}z_1, \\ B_y = \frac{\delta Y_2}{\delta \omega x} = D \left(\frac{\delta a_{21}}{\delta \omega x} x_1 + \frac{\delta a_{22}}{\delta \omega x} y_1 + \frac{\delta a_{23}}{\delta \omega x} z_1 \right), \\ C_y = \frac{\delta Y_2}{\delta \omega y} = D \left(\frac{\delta a_{21}}{\delta \omega y} x_1 + \frac{\delta a_{22}}{\delta \omega y} y_1 + \frac{\delta a_{23}}{\delta \omega y} z_1 \right), \\ E_y = \frac{\delta Y_2}{\delta \omega z} = D \left(\frac{\delta a_{21}}{\delta \omega z} x_1 + \frac{\delta a_{22}}{\delta \omega z} y_1 + \frac{\delta a_{23}}{\delta \omega z} z_1 \right), \\ A_z = \frac{\delta Z_2}{\delta D} = a_{31}x_1 + a_{32}y_1 + a_{33}z_1, \\ B_z = \frac{\delta Z_2}{\delta \omega x} = D \left(\frac{\delta a_{31}}{\delta \omega x} x_1 + \frac{\delta a_{32}}{\delta \omega x} y_1 + \frac{\delta a_{33}}{\delta \omega x} z_1 \right), \\ C_z = \frac{\delta Z_2}{\delta \omega y} = D \left(\frac{\delta a_{31}}{\delta \omega y} x_1 + \frac{\delta a_{32}}{\delta \omega y} y_1 + \frac{\delta a_{33}}{\delta \omega y} z_1 \right), \\ E_z = \frac{\delta Z_2}{\delta \omega z} = D \left(\frac{\delta a_{31}}{\delta \omega z} x_1 + \frac{\delta a_{32}}{\delta \omega z} y_1 + \frac{\delta a_{33}}{\delta \omega z} z_1 \right) \end{array} \right. \quad (20)$$

В эти формулы входят 27 производных каждого элемента ортогональной матрицы вращения, полученной в соответствии с правилами умножения матриц в установленном порядке, по параметрам вращения вокруг координатных осей.

Метод определения параметров связи систем координат, основанный на линейной процедуре. Авторами работ [53, 22] проводятся алгоритмы определения параметров связи систем координат в следующем виде. В уравнение (1) вносится

масштабный коэффициент в элементы ортогональной матрицы и формируются три системы линейных уравнений:

$$Q \begin{pmatrix} Da_{11} \\ Da_{12} \\ Da_{13} \\ T_x \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -x_{2i} \\ -x_{2(i+1)} \\ \dots \\ -x_{2n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{xi} \\ v_{x(i+1)} \\ \dots \\ v_{xn} \end{pmatrix}, \quad (21)$$

$$Q \begin{pmatrix} Da_{21} \\ Da_{22} \\ Da_{23} \\ T_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -y_{2i} \\ -y_{2(i+1)} \\ \dots \\ -y_{2n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{yi} \\ v_{y(i+1)} \\ \dots \\ v_{yn} \end{pmatrix}, \quad (22)$$

$$Q \begin{pmatrix} Da_{31} \\ Da_{32} \\ Da_{33} \\ T_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -z_{2i} \\ -z_{2(i+1)} \\ \dots \\ -z_{2n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{zi} \\ v_{z(i+1)} \\ \dots \\ v_{zn} \end{pmatrix}, \quad (23)$$

для которых общая матрица Q и имеет вид

$$Q = \begin{pmatrix} x_{1i} & y_{1i} & z_{1i} & 1 \\ x_{1(i+1)} & y_{1(i+1)} & z_{1(i+1)} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_n & y_n & z_n & 1 \end{pmatrix}, \quad (24)$$

где x_1, y_1, z_1 и x_2, y_2, z_2 – компоненты вектора координат пункта в первой и во второй системе координат соответственно, n – количество точек, принятых в обработку.

Введем обозначение для компонентов вектора свободных членов:

$$L_x = \begin{pmatrix} -x_{2i} \\ -x_{2(i+1)} \\ \dots \\ -x_{2n} \end{pmatrix}; \quad L_y = \begin{pmatrix} -y_{2i} \\ -y_{2(i+1)} \\ \dots \\ -y_{2n} \end{pmatrix}; \quad L_z = \begin{pmatrix} -z_{2i} \\ -z_{2(i+1)} \\ \dots \\ -z_{2n} \end{pmatrix}. \quad (25)$$

Из решения систем линейных уравнений поправок (21)–(23) по методу наименьших квадратов необходимо определить девять элементов неортогональной матрицы и составляющие сдвигов по осям координат T_x, T_y, T_z :

$$\begin{pmatrix} Da_{11} \\ Da_{12} \\ Da_{13} \\ T_x \end{pmatrix} = -(Q^T Q)^{-1} Q^T L_x, \quad (26)$$

$$\begin{pmatrix} Da_{21} \\ Da_{22} \\ Da_{23} \\ T_y \end{pmatrix} = -(Q^T Q)^{-1} Q^T L_y, \quad (27)$$

$$\begin{pmatrix} Da_{31} \\ Da_{32} \\ Da_{33} \\ T_z \end{pmatrix} = -(Q^T Q)^{-1} Q^T L_z. \quad (28)$$

В этом решении связь систем координат определяется двенадцатью параметрами – девятью элементами матрицы P ,

$$P = \begin{pmatrix} Da_{11} & Da_{12} & Da_{13} \\ Da_{21} & Da_{22} & Da_{23} \\ Da_{31} & Da_{32} & Da_{33} \end{pmatrix} \quad (29)$$

и параметрами сдвига T_x, T_y, T_z . Разномасштабность систем координат уже учтена в структуре матрицы P .

Такой метод необходимо применять, используя не координаты, а разности координат в старой системе координат ($\mathbf{X}_{1(i+1)} - \mathbf{X}_{1i}$) и в новой систем координат ($\mathbf{X}_{2(i+1)} - \mathbf{X}_{2i}$), которые будут иметь вид:

$$\Delta x_{1(i+1;i)} = x_{1(i+1)} - x_{1i}; \Delta y_{1i,(i+1)} = y_{1(i+1)} - y_{1i}; \Delta z_{1i,(i+1)} = z_{1(i+1)} - z_{1i}, \quad (30)$$

$$\Delta x_{2(i+1;i)} = x_{2(i+1)} - x_{2i}; \Delta y_{2i,(i+1)} = y_{2(i+1)} - y_{2i}; \Delta z_{2i,(i+1)} = z_{2(i+1)} - z_{2i}.$$

Образованные разности исключают из решений сдвиг центров систем (T_x, T_y, T_z). Далее выполняется определение элементов матрицы P . В этом случае будут сформированы три системы линейных уравнений поправок:

$$Da_{11}\Delta x_{1(i+1;i)} + Da_{12}\Delta y_{1(i+1;i)} + Da_{13}\Delta z_{1(i+1;i)} - \Delta x_{2(i+1;i)} = v_{xi}, \quad (31)$$

$$Da_{21}\Delta x_{1(i+1;i)} + Da_{22}\Delta y_{1(i+1;i)} + Da_{23}\Delta z_{1(i+1;i)} - \Delta y_{2(i+1;i)} = v_{yi}, \quad (32)$$

$$Da_{31}\Delta x_{1(i+1;i)} + Da_{32}\Delta y_{1(i+1;i)} + Da_{33}\Delta z_{1(i+1;i)} - \Delta z_{2(i+1;i)} = v_{zi}, \quad (33)$$

при $i = 1, 2, \dots, n$.

При решении этих систем уравнений по методу наименьших квадратов будут определены элементы матрицы, а также составляющие сдвига начала новой системы координат относительно начала старой T_x, T_y, T_z .

Для этого необходимо вычислить вспомогательные (без сдвигов) координаты $x^0_i, y^0_i, z^0_i, x^0_{i+1}, y^0_{i+1}, z^0_{i+1}, \dots, x^0_n, y^0_n, z^0_n$, при $i = 1, 2, \dots, n$, по формулам

$$\begin{pmatrix} x_i^0 \\ y_i^0 \\ z_i^0 \end{pmatrix} = P \begin{pmatrix} x_{1i} \\ y_{1i} \\ z_{1i} \end{pmatrix}, \quad (34)$$

затем

$$\begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} = (H^T H)^{-1} H^T L_\Delta, \quad (35)$$

где

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; L_\Delta = \begin{pmatrix} x_{2i} - x_i^0 \\ y_{2i} - y_i^0 \\ z_{2i} - z_i^0 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ x_{2n} - x_n^0 \\ y_{2n} - y_n^0 \\ z_{2n} - z_n^0 \end{pmatrix}. \quad (36)$$

Также существуют иные способы оценки параметров связи систем. Например, метод, основанный на применении алгебры кватернионов. Кватернионом называется гиперкомплексное число, реализуемое геометрически в четырехмер-

ном пространстве. Этот метод дает возможность установления априорных координат для дальнейшей реализации нелинейной процедуры, т. е. метода, основанного на итерационной процедуре Ньютона – Рафсона. В работах [11, 85, 93] такой метод детально описан.

Существует метод определения связи систем координат, основанный на десятипараметрическом преобразовании систем, в котором добавляется возможность выбора точки вращения системы координат. Его называют методом Молоденского – Бадекиса. Подобный подход требует дополнительного определения трех параметров x_c, y_c, z_c – координат точки вращения в исходной системе. Эта трансформация называется 10-параметрической. Такой метод описан в работе [99].

В работах [22, 43, 46] приведен альтернативный метод установления связи систем, в котором используются не прямоугольные системы координат, а эллипсоидальные (сферические). Общий вид их задан дифференциальными формулами преобразования, которые получаются с использованием усеченных разложений функций в ряды. В качестве его входных параметров используются те же семь параметров перехода $\omega_x, \omega_y, \omega_z, T_x, T_y, T_z, D$, а также геометрические параметры эллипсоидов исходной и конечной систем геодезических координат (значения эксцентриситетов e_a, e_b и больших полуосей a_a, a_b).

В работах [96, 107, 124] описан подход по определению связи геоцентрических систем с помощью 14-параметрического метода, который заключается не только в оценке параметров преобразования систем, но и в оценке скоростей изменения этих параметров. Практически точность параметров связи систем с применением данного метода может быть обеспечена выше, чем приведенными выше методами. Это особенно актуально в долгосрочной перспективе при установлении связи систем, в которых учет временной эволюции координат пунктов различен. Однако в России данному методу уделено недостаточно внимания, несмотря на ряд проблем, описанных в одном из предыдущих подразделов.

В данном подразделе рассмотрены методы определения параметров преобразования геоцентрических ортогональных систем координат, используемых в геодезии. К числу рассмотренных методов относятся:

- классический метод определения параметров связи систем, основанный на оценке параметров связи систем методом наименьших квадратов;
- итерационный ньютоновский метод строгого определения параметров по методу наименьших квадратов, который в общем случае требует знания предварительных значений уточняемых параметров;
- метод определения параметров связи систем координат, основанный на линейной процедуре, в процессе которого определяются двенадцать параметров – девять элементов неортогональной матрицы вращения, которая учитывает разномасштабность систем координат, и три составляющие сдвига начала новой системы координат относительно старой.

Также приведены иные методы установления связи между системами координат, которые в геодезической практике России применяются нечасто.

К достоинствам приведенных методов можно отнести то, что эти методы могут быть применены вне зависимости от величины параметров преобразования систем. Также не требуется проводить дополнительные расчеты для вычисления масштабного коэффициента.

К недостаткам приведенных методов можно отнести то, что они позволяют определить только статические параметры преобразования систем координат. Авторами работ, в которых приведены описываемые методы, за исключением [96, 107, 124], не подразумевается учет движения одной системы относительно другой в течение некоторого периода времени, что на сегодняшний день при использовании современных технологий ГНСС приводит к существенным погрешностям при определении связи систем или трансформации координат. Поэтому в следующих разделах диссертации уделено внимание именно такому методу, который обеспечивает учет движений точек земной поверхности вследствие геодинамических процессов при установлении связи между системами.

1.7 Выводы по первому разделу

Выполнен информационно-аналитический обзор текущего состояния координатного обеспечения в современной геодезии. Приведены понятия и термины, используемые в российской и международной геодезической практике. В ходе информационно-аналитического обзора определены и сформулированы проблемы эксплуатации и развития спутниковых геодезических сетей в России, а также проблемы эксплуатации и развития государственной геодезической системы координат 2011 г.

Ключевой проблемой эксплуатации ГСК-2011 и сетей ДГС в России является невозможность согласования результатов позиционирования, полученных от пунктов государственной геодезической координатной основы, а также пунктов региональных спутниковых геодезических сетей, с результатами, полученными в глобальной международной системе отсчета или от пунктов, реализующих ее. Сложившаяся ситуация привела к тому, что результаты координатных определений, полученные на одних и тех же пунктах в одно и то же время, не соответствуют друг другу, если отличаются методы позиционирования.

Различия в учете временной эволюции координат пунктов, реализующих российскую государственную координатную основу, и пунктов, реализующих международную земную координатную основу, обуславливают необходимость поиска способа корректного согласования результатов высокоточных координатных определений, полученных на территории России в системах с предусмотренной и не предусмотренной временной эволюцией координат пунктов. Такой способ описан во втором разделе диссертации.

2 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ СВЯЗИ ГЛОБАЛЬНОЙ КООРДИНАТНОЙ ОСНОВЫ С ЕЕ ЛОКАЛЬНОЙ РЕАЛИЗАЦИЕЙ ПУНКТАМИ СЕТЕЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ

2.1 Обзор и сравнение способов оценки скоростей движения точек земной поверхности вследствие геодинамических процессов

При проведении геодезических работ на участках большой протяженности или работ, в которых требуется высокая точность, обеспечение которой возможно только с учетом временного фактора для компенсации погрешностей, вызванных геодинамическими процессами, сформированный принцип по определению статических параметров связи и приведенные методы определения таких параметров не позволяют обеспечить требуемую точность. Для этого применяются различные способы определения скоростей движения точек земной поверхности, описанные в данном подразделе. Такие способы основаны на разных принципах, и каждый обладает своими достоинствами и недостатками, поэтому в ходе диссертационного исследования проведено их сравнение. Способы определения скорости и направления движения точки земной поверхности соответствуют задаче определения вектора X_2 по известному вектору X_1 или наоборот.

На сегодняшний день существует несколько способов ее решения, например:

- с помощью скоростей движения, вычисленных с применением онлайн-сервисов высокоточного позиционирования [84];
- с помощью скоростей движения, вычисленных в научном или коммерческом программном обеспечении для обработки ГНСС-измерений [89, 109];
- с помощью моделей движения тектонических плит [126];
- с помощью метода, предложенного в работах [17, 18, 19], который заключается в определении функции азимута и длины геодезической линии между ее начальным и текущим положением от долготы и широты пункта;

– с использованием скоростей движения пунктов по данным ITRF [105].

В работе [84] проведен сравнительный анализ способов определения вектора X_2 по вектору X_1 и сделаны выводы о точности определения скоростей движения точек земной поверхности различными способами. Для проведения исследования были использованы пункты региональной сети ДГС НСО.

Первый способ – оценка скоростей движения с помощью онлайн-сервисов обработки ГНСС-измерений. Он заключается в определении координат ДГС НСО с помощью онлайн-сервисов высокоточного позиционирования. Программная реализация таких сервисов основана на алгоритмах научного ПО, используемого для обработки ГНСС-измерений, а процесс обработки максимально оптимизирован для простоты и быстроты использования [101]. Онлайн-сервисы реализованы на удаленном сервере, доступ к которому посредством сети интернет возможен неограниченному кругу пользователей. В процессе вычислений онлайн-сервисы работают в режиме постобработки и используют для этого продукты глобальных или региональных сетей ДГС.

Среди инструментов обработки ГНСС-измерений онлайн-сервисы можно вынести в отдельный сегмент, так как они имеют следующие преимущества перед другими методами обработки:

– свободный доступ к алгоритмам передового профессионального научного ПО для высокоточного позиционирования точки благодаря возможности учета множества факторов, влияющих на точность;

– не требуется установка специализированного программного обеспечения на рабочем компьютере;

– при работе с данными достаточно стандартного браузера;

– простой интерфейс и интуитивно понятный процесс работы;

– отсутствие проблемы совместимости между той или иной программой и операционной системой на компьютере пользователя;

– отсутствие необходимости отслеживания обновления, онлайн-сервис всегда содержит самую актуальную версию программы;

– онлайн-сервис доступен всегда и везде, где есть доступ к интернету, и не привязан к конкретному компьютеру;

– большая часть услуг, предоставляемая онлайн-сервисами, оказывается бесплатно, но существуют и коммерческие разработки.

К недостаткам онлайн-сервисов обработки ГНСС-измерений можно отнести то, что серверы, на которые отсылается навигационная информация, принимаемая приемниками на территории России, находятся за пределами страны. Это приводит к утечке информации, что может быть сопряжено с рисками, если ГНСС-измерения выполнены на объектах, доступ к которым ограничен.

По методике определения координат пунктов онлайн-сервисы обработки спутниковых измерений делятся на два типа:

- основанные на методе PPP;
- основанные на относительном методе.

Принципиальное отличие двух методик заключается в том, что в первом методе высокоточное определение координат происходит за счет применения апостериорно уточненной информации. Также методика PPP обеспечивает определение местоположения точки без непосредственной привязки к наземной координатной основе [49]. Вторая методика (основанная на относительном методе), напротив, привязана к наземной координатной основе. В этом случае определение координат выполняется с вычислением вектора базовой линии, построенным от опорной точки с известными точными координатами до определяемой точки.

Для проведения исследования были выбраны следующие онлайн-сервисы, основанные на методе PPP:

– CSRS-PPP (Canadian Spatial Reference System, Precise Point Positioning Service), – сервис точного позиционирования, основанный на методе PPP Министерства природных ресурсов Канады [100];

– Magic GNSS – сервис для обработки ГНСС-данных, поддерживаемый организацией Aerospace and Defense S.A.U. «GMV» в г. Мадриде [114];

– Trimble RTX (Trimble Center Point RTX™) – сервис глобального высокоточного позиционирования, разработанный и поддерживаемый компанией Trimble Navigation, США [125].

Также были выбраны онлайн-сервисы, основанные на относительном методе позиционирования:

– AUSPOS (Geoscience Australia Online GPS Processing Service) – онлайн-сервис обработки GPS-данных, Австралия [98];

– OPUS (Online Positioning User Service) – онлайн-сервис точного позиционирования, поддерживаемый Национальной геодезической службой США [117];

– SOPAC SCOUT (Scripps Coordinate Update Tool of Scripps Orbit and Permanent Array Center) – сервис вычисления точных координат станции на местности, разработанный и поддерживаемый институтом океанографии им. Скриппса в Калифорнии [121].

В таблице 6 приведены некоторые параметры и особенности онлайн-сервисов и программного обеспечения Trimble Business Centre (ПО ТБС), при которых выполняется обработка ГНСС-измерений.

Помимо вышеперечисленных онлайн-сервисов существуют другие аналогичные службы определения координат, в том числе работающие в пределах зоны действия национальных спутниковых геодезических сетей, например SAPOS – немецкая служба постобработки ГНСС-измерений; Position NZ-PP – служба постобработки данных ГНСС Новой Зеландии и пр.

В Российской Федерации предпринимаются шаги для создания собственного национального сервиса для постобработки данных спутниковых измерений. Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения (ИАЦ КВНО), г. Королев, запустил сервис уточнения координат, работающий на основе относительного метода с использованием алгоритмов обработки сверхдлинных базовых линий [37]. ОАО «Российские коммерческие системы» разработало систему высокоточного позиционирования [70] для определения координат пункта относительным методом с использованием системы ГЛОНАСС.

Таблица 6 – Параметры онлайн-сервисов и ПО ТВС для обработки ГНСС-измерений

Наименование параметров	Метод PPP			Относительный метод			
	CSRS-PPP	Magic GNSS	Trimble RTX	AUSPOS	OPUS	SOPAC	ПО ТВС
Поддерживающая организация, страна	Министерство природных ресурсов Канады	Оборонная и аэрокосмическая компания (GMV), Испания	Компания Trimble Navigation Ltd., США	Австралийское научное сообщество изучения Земли	Национальная геодезическая служба США (NGS)	Институт океанографии им. Скриппса, США	Компания Trimble Navigation Ltd.
Наименование используемого ПО	SPARK	Собственные программные коды	Собственные программные коды	Bernese	PAGES	GAMIT	TBC v. 4.0
GPS	С 2009 г.	С 01.01.2009	С 14.05.2011	С 01.01.1996	С 01.01.2010	Да	Да
ГЛОНАСС	С 2011 г.	С 01.01.2014	С 14.05.2011	Нет	Нет	Нет	Да
Beidou	Нет	Нет	С 04.06.2014	Нет	Нет	Нет	Да
Galileo	Нет	С 01.01.2014	С 01.01.2017	Нет	Нет	Нет	Да
SBAS	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Да
QZSS	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Да
Кинематический режим	Да	Да	Нет	Нет	Нет	Нет	Да
Выбор ГНСС при обработке	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Да
Поддержка RINEX 2.11 и сжатые форматы*	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да
Поддержка RINEX 3.0	Да	Да	Да	Нет	Нет	Нет	Да
Продолжительность сеанса	До 24 ч	До 24 ч	От 10 мин до 24 ч	От 1 ч до 7 суток	От 2 до 48 ч	От 1 до 24 ч	Нет
Дискретность измерений	Интерполяция, если чаще 1 Гц	1, 2, 5, 10, 15, 30, 60 и 300 с	10, 15, 30, 60 с	1, 2, 5, 10, 15, 30, 60, 120, 300 с	Автопроре- жение до 30 с	Автопроре- жение до 30 с	Нет
Ограничение размера	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	10 Мб	Нет
Регистрация	Да	Нет	Да	Нет	Нет	Нет	Лицензия

*Сжатые YYo.gz, YYd.gz, YYo.Z, YYd.Z, YYo.zip, YYo.pkzip, YYo.bz, YYo.bz2, UNIX, или Hatanaka форматы.

К сожалению, для проведения исследования и сравнения с другими онлайн-сервисами оказалось невозможным применить российские сервисы. При подаче запроса на обработку суточного сеанса одного пункта среднее время выполнения обработки составило более трех суток, а итоговый результат определения координат отличался от результатов сервисов, выбранных для исследования, более чем на 50 м в системе координат ITRF. Другой российский сервис высокоточного позиционирования также не удалось применить по причине сбоя в программе клиента для подачи файла измерений на сервер. В литературе [66] приводится ряд причин, по которым создание отечественных сервисов для обработки ГНСС-измерений на сегодняшний день представляется затруднительной задачей.

Для вычисления скоростей движения пунктов сети ДГС НСО обработка ГНСС-измерений проводилась вышеприведенными онлайн-сервисами высокоточного спутникового позиционирования. В обработке участвовали ГНСС-измерения 18 пунктов первой очереди развертывания сети ДГС НСО на начальную и текущую эпохи. Продолжительность измерений, полученных с каждого пункта, составляла четверо суток – четыре 24-часовых файла для каждого пункта на осредненную начальную эпоху 2013,005 (2013.01.02) и осредненную текущую эпоху 2017,164 (2017.03.01). Дискретность измерений – 30 с. ГНСС-измерения пунктов сети ДГС НСО были загружены на соответствующий удаленный сервер после процедуры регистрации (если требовалось). Рассчитанные результаты были отправлены в файле отчета об обработке автоматически ответным сообщением на указанный адрес электронной почты не позднее 15 минут после подачи запроса. Скорости движения пунктов сети ДГС НСО рассчитаны как частное между смещением пунктов и разностью начальной и текущей эпох.

Второй способ – оценка скоростей движения с помощью коммерческого программного обеспечения для обработки ГНСС-измерений ПО ТВС. Данное ПО реализует относительный метод спутникового позиционирования. Относи-

тельный метод позиционирования с помощью ПО ТВС на примере пунктов ДГС НСО реализован двумя методами: классическим методом и методом отдельной обработки.

Под классическим методом понимается общепринятая методика определения координат пунктов относительным методом позиционирования [47, 62, 63, 90, 91], которая реализована в виде обработки векторов базовых линий, построенных от исходного пункта до определяемого, с последующим уравниванием всего геодезического построения.

Данная методика применена для обработки тех же четырехсуточных ГНСС-измерений 18 пунктов сети ДГС НСО на эпохи 2013,005 (2013.01.02) и 2017,164 (2017.03.01), что были использованы при обработке онлайн-сервисами. На первом этапе были рассчитаны координаты пункта NSKW путем вычисления векторов базовых линий от опорных пунктов МГС, находящихся на расстоянии до 1 500 км (ARTU, BADG, NRIL, POL2, URUM). При обработке использовались данные точных эфемерид. На втором этапе пункт NSKW был зафиксирован как опорный. От него сетевым методом распространены базовые линии на остальные пункты региональной сети ДГС НСО. На третьем этапе производилось минимально ограниченное уравнивание сети с фиксацией в качестве опорного пункта NSKW. Значения, рассчитанные таким образом, приняты эталонными. Средняя квадратическая погрешность (СКП) определения координат не превысила 0,007 м по каждой станции. Оценка точности приведена ПО, используемым для вычислений. На рисунке 4 приведена общая схема сети при выполнении расчетов.

При обработке онлайн-сервисами общее уравнивание всей сети не производится, так как единовременно в обработке используются измерения только одной определяемой станции, в отличие от классической обработки с уравниванием сети. Вследствие этого сравнение с результатами, полученными онлайн-сервисами, будет не в полной мере объективно. Для более объективного сравнения результатов 24-часовые ГНСС-измерения дополнительно были обработаны методом «отдельной обработки» в ПО ТВС.

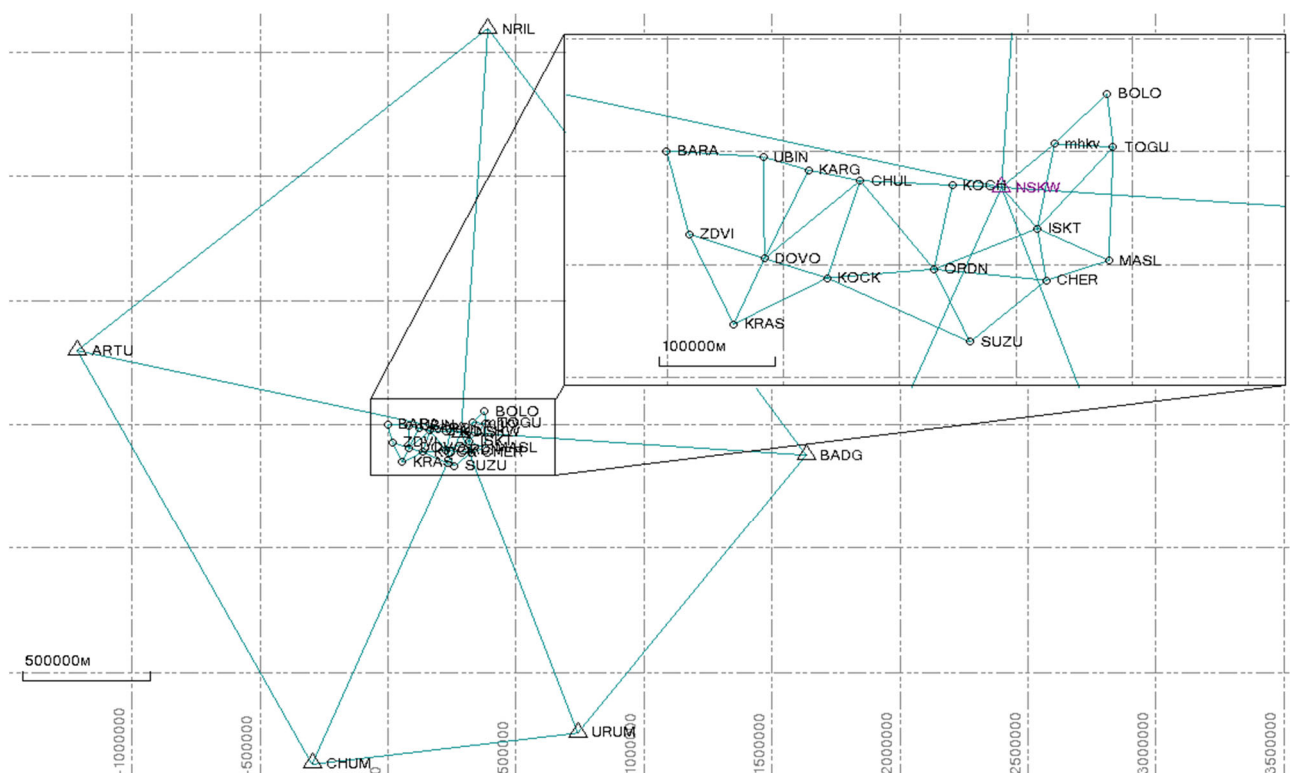
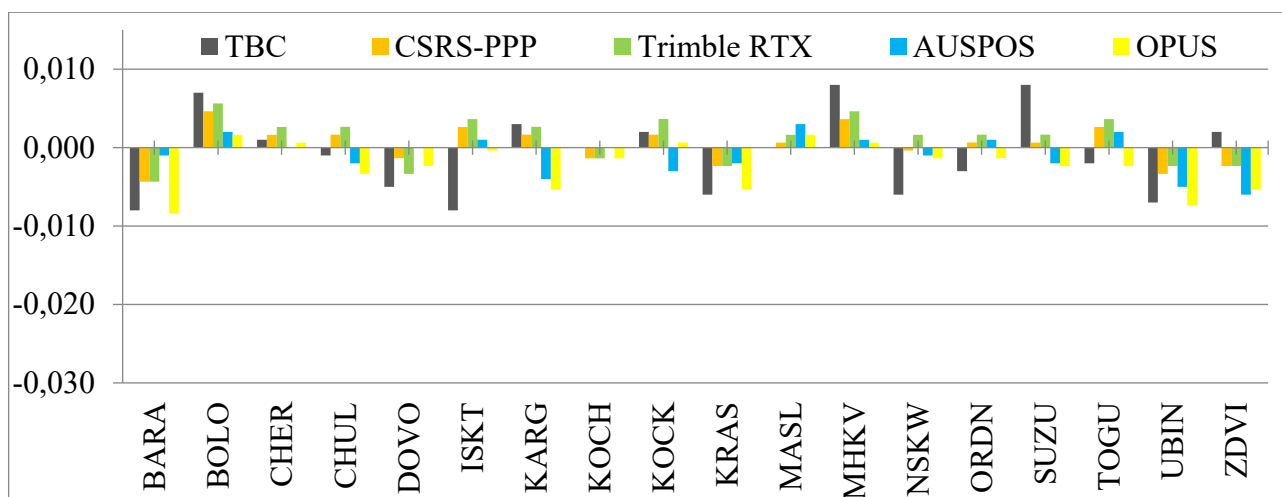


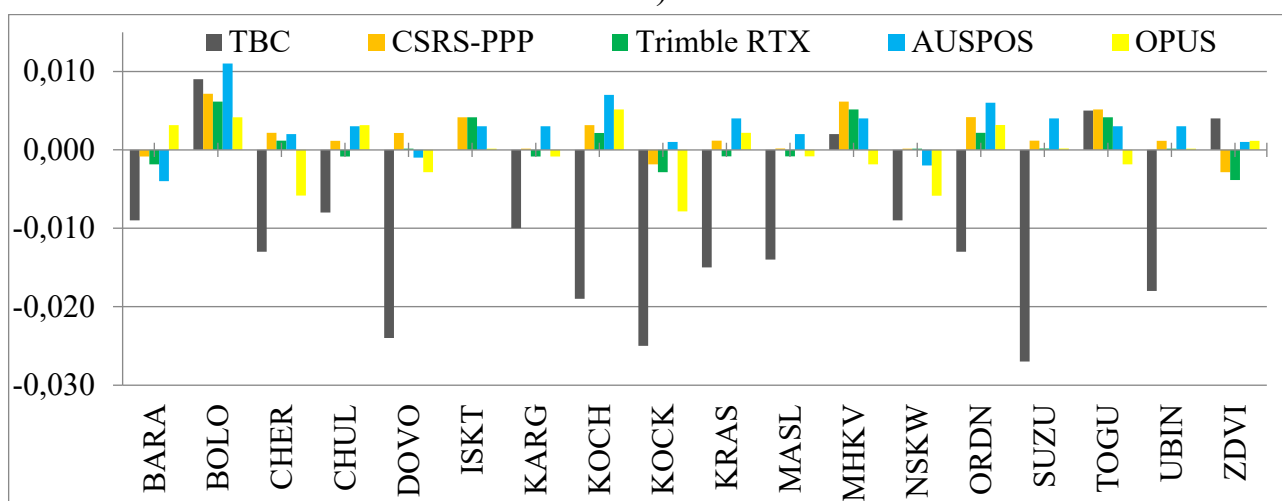
Рисунок 4 – Схема региональной сети ДГС НСО при обработке ГНСС-измерений классическим методом в ПО ТВС

Такой метод заключается в оценке измерений каждого пункта сети ДГС НСО отдельно, т. е. самостоятельно относительно пунктов МГС, без связи с другими пунктами сети ДГС НСО. Уравнивание производилось отдельно каждого пункта с опорой на пункты МГС. На рисунке 5 приведена схема сети при позиционировании методом отдельной обработки.

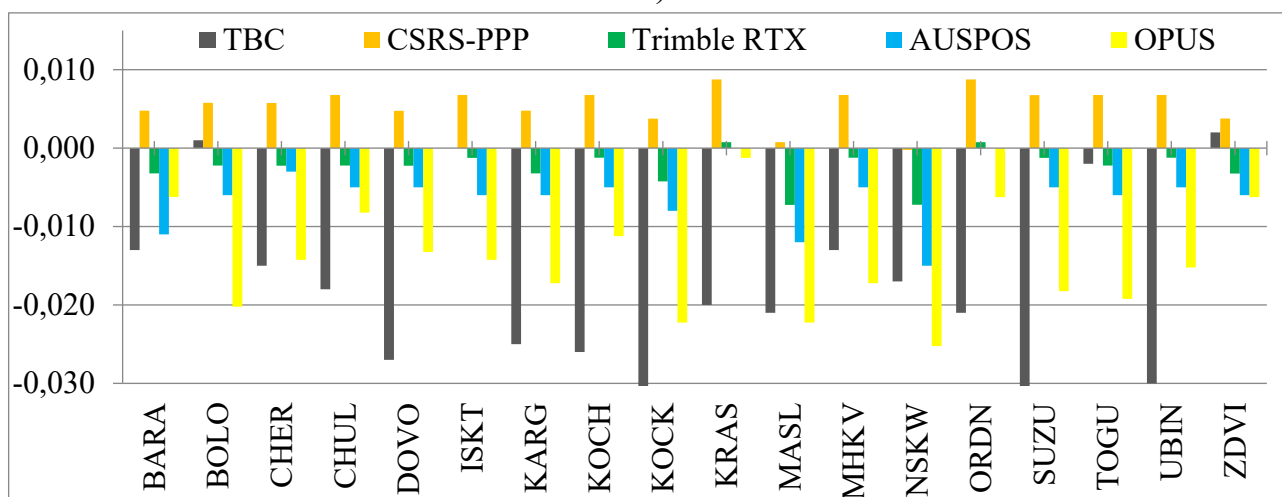
Сравнение результатов обработки ГНСС-измерений пунктов сети ДГС НСО разными способами представлено на рисунке 6 в виде разностей координат. Цветные линии характеризуют разности, полученные при классической обработке в ПО ТВС с последующим уравниванием сети и обработке измерений с помощью онлайн-сервисов. Серые линии характеризуют разности координат, полученных при классической обработке и по методике отдельной обработки измерений каждого пункта. Разности результатов классической и отдельной обработки на графиках условно обозначены «ТВС». Сравнение результатов обработки приведено на эпоху 2013,005 (2013.01.02). Значения разностей координат представлены по вер-



a)



б)



в)

Рисунок 6 – Разности координат, полученных с применением онлайн-сервисов и по методике отдельной обработки в ПО ТВС, и координат, полученных классическим методом обработки:

a) по координате X ; б) по координате Y ; в) по координате Z

Результаты, полученные сервисами Magic GNSS и SOPAC SCOUT, не включены в графики, так как имеют систематическую погрешность в вычислениях, достигающую 15,4 см, а в отдельных случаях – десятков сантиметров, например, на пункте TOGU (Тогучин). СКП координат, вычисленных сервисом SOPAC SCOUT, достигают 5,1 см по каждой из координат. Сервис Magic GNSS в отчете не предоставляет информацию о СКП вычисленных координат пункта.

СКП решений, полученных методом отдельной обработки каждого пункта ДГС НСО относительным методом от станций МГС в ПО ТВС по каждой координате, не превышают 3,4 см.

СКП уравнированных координат пунктов сети с фиксацией в качестве опорного пункта NSKW (эталонные решения) не превышают 0,7 см.

Полученные результаты позволяют констатировать, что точность определения координат онлайн-сервисами для суточных сеансов ГНСС-измерений сопоставима с точностью, достигаемой классическим методом определения координат, и превосходит точность метода отдельной обработки каждого пункта сети, несмотря на то, что онлайн-сервисы реализуют аналогичный метод отдельной обработки каждого пункта. Это позволяет судить о том, что в алгоритмах онлайн-сервисов применяются более адекватные модели прогнозирования различной уточняющей информации, а также используется большее количество моделируемых процессов (лунно-солнечные приливы, неравномерность оси вращения Земли, приливы в твердом теле Земли, океаническая нагрузка и др.), недоступных в коммерческом ПО.

Точность позиционирования не зависит от метода определения координат. Сервисы, использующие метод PPP, и сервисы, работающие по методике относительного позиционирования, при обработке суточных измерений, выполненных на территории Новосибирской области, в точности определения координат пунктов преимуществ друг перед другом не имеют, несмотря на совершенно разный подход в обработке.

Третий способ – оценка скоростей движения с помощью моделей движения тектонических плит. В 1980-х гг. с развитием метода радиоинтерферометрии

со сверхдлинными базами (РСДБ) в радиоастрономии стало возможным определять взаимные смещения точек земной поверхности, находящихся на разных континентах. Таким образом, появился материал для разработки математических моделей движения литосферных плит. На сегодняшний день для определения параметров движения тектонических плит используются технологии ГНСС. Получить параметры движения или смоделировать их на определенную эпоху можно на специализированных сайтах в сети интернет. Например, такую возможность предоставляет сервис UNAVCO (University NAVSTAR Consortium) – некоммерческая корпорация организаций, расположенных по всему миру, которые используют геодезические методы в геофизических исследованиях [126]. Одним из ее членов является Геофизическая служба Российской академии наук.

На сайте UNAVCO возможен расчет компонентов движения тектонических плит согласно следующим расположенным в хронологическом порядке по дате разработки моделям: GSRM v2.1 (2014), ITRF2014, ITRF2008, NNR-MORVEL56 (2011), MORVEL (2010), GEODVEL (2010), APKIM2005, GSRM v1.2 (2004), CGPS (2004), REVEL 2000, ITRF2000 (2002), HS3-NUVEL 1A (2002), APKIM2000 (2002), ITRF2000 (2001), HS3-NUVEL 1 (1994), NUVEL 1A (1994), NUVELL 1 (1991).

В ходе анализа зарубежных и отечественных источников [14, 92, 106, 118, 122] наиболее часто применяющимися в геодезической практике являются следующие модели:

– GSRM v2.1 (2014) – глобальная модель скоростей деформации (Global Strain Rate Model), в которой скорость деформации моделируется с применением метода Хейнса и Холта (Haines and Holt method), где используются сплайны для получения интерполированного поля тензора градиента скорости;

– ITRF2014 (ITRF2008, ITRF2000) – модели, описывающие движение тектонических плит в Международной земной системе отсчета ITRS;

– MORVEL (2010) – модель разработана учеными Висконсинского университета в г. Мадисон и Университета Райса в г. Хьюстон, США; основана на морских геологических, сейсмологических и геодезических измерениях;

– NUVELL 1A (1994) – модель получена основе геофизических измерений и данных профилографов систем глубоководных промеров в зонах спрединга вдоль срединно-океанических хребтов, вблизи трансформных разломов и эпицентров землетрясений;

– GEODVEL (2010) (GEODesy VELocity) – модель построена на основе данных, полученных с помощью GPS, европейской сети РСДБ, сети пунктов спутниковой лазерной дальнометрии, доплеровской радиопозиционной интегрированной спутниковой системы (DORIS).

Модели движения тектонических плит по технологии моделирования движения точек земной поверхности можно разделить на два типа. Первый базируется на теореме Эйлера [79], согласно которой движение твердого тела по поверхности сферы можно описать его вращением относительно установленной оси, проходящей через полюса Эйлера [17]. Второй тип – это модели, которые не имеют относительного вращения по отношению к какому-либо участку Земли (no-net-rotation). Движение каждой плиты определено относительно средневзвешенного значения скоростей движения всех плит, что позволяет представить движение земной поверхности относительно приблизительного центра Земли. Однако к недостаткам использования моделей движения тектонических плит можно отнести то, что они не предоставляют информацию о вертикальных движениях точек земной поверхности, которая необходима, например, на геодинамических полигонах или при освоении месторождений полезных ископаемых [38, 73, 74].

Четвертый способ – оценка скоростей движения точки земной поверхности с помощью установленной зависимости азимута направления движения пункта от долготы его расположения и скорости движения пункта от широты его расположения. Автором Войтенко А. В. в работах [17, 18, 19] установлена такая зависимость для пунктов, находящихся на Евразийской тектонической плите. В этих работах детально описан способ установления таких зависимостей и выведены соответствующие функции:

$$A = 0,5886 L^{\circ} + 42,27^{\circ}, \quad (37)$$

$$S = -0,0001494 B + 0,03414, \quad (38)$$

где A – азимут траектории движения пункта, градусы; L – долгота расположения пункта, градусы; S – скорость движения пункта, м/год; B – широта расположения пункта.

На рисунке 7 приведен график зависимости азимута направления движения пункта от долготы расположения ДГС, на рисунке 8 – график зависимости скорости движения пунктов от широты.

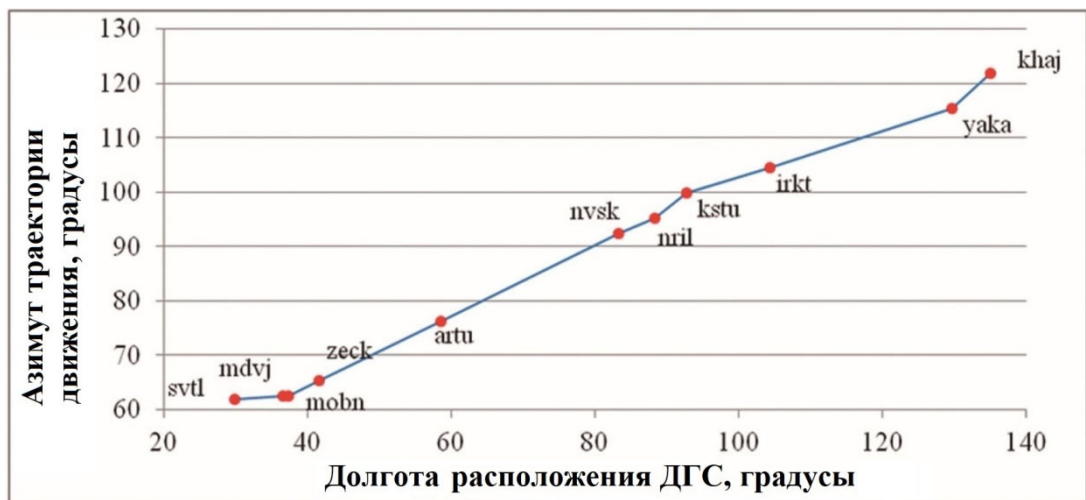


Рисунок 7 – График зависимости азимута траектории движения от долготы места расположения ДГС

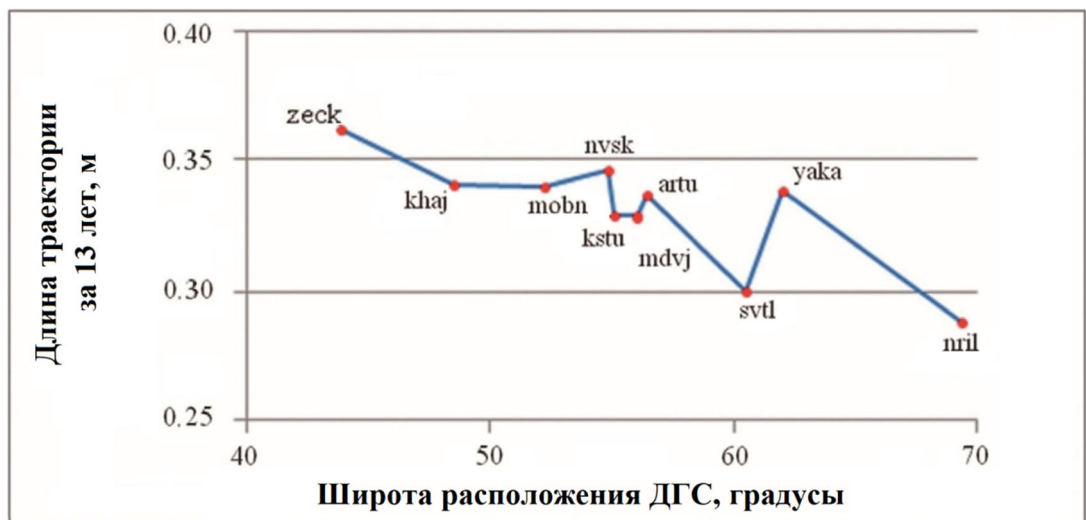


Рисунок 8 – График зависимости скорости движения от широты места расположения ДГС

Пятый способ – оценка скоростей движения по опубликованным решениям ITRF. Определение скоростей движения заданной точки земной поверхности заключается в интерполяции скоростей движения от ближайших пунктов ITRF. На сайте ITRF [105] доступны скорости движения пунктов ITRF. Для нахождения скорости движения пункта с заданными координатами используются векторы движения ближайших к нему пунктов ITRF. Для определения скорости движения точки земной поверхности, находящейся вблизи нескольких пунктов ITRF, применяется метод билинейной интерполяции двумерных векторных полей.

Помимо интерполяции скалярного двумерного поля, т. е. функции двух переменных (координат), билинейная интерполяция также применяется для интерполяции двумерных векторных полей. При такой интерполяции интерполируются обе компоненты векторного поля – проекции вектора в точках на оси координат. Результат интерполяции двух скалярных функций (компонентов вектора) порождает интерполированный вектор – вектор движения пункта. Этот подход применяется также в метеорологии для построения интерполированной карты ветров в прямоугольной области по измеренным данным значений векторов ветра в опорных точках, принадлежащих вершинам прямоугольника [20].

Однако данный способ невозможно применять в местах, в которых до ближайших пунктов ITRF значительное расстояние. Например, на территории России с учетом количества пунктов ITRF или МГС данный способ применять невозможно.

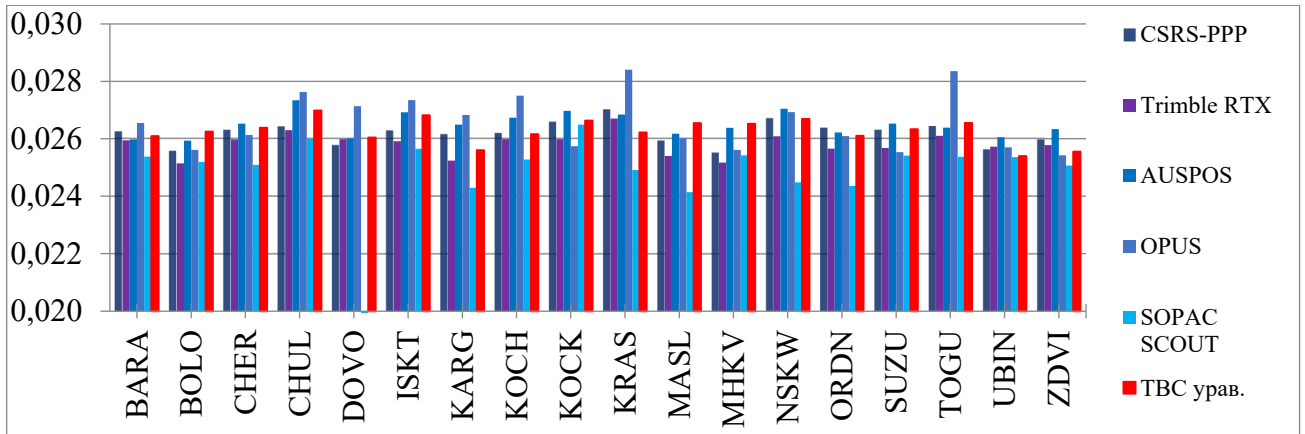
Сравнение описанных методов определения скоростей смещения пунктов земной поверхности. В ходе проведения диссертационных исследований и в работе [84] для определения движения и скоростей движения пунктов вышеприведенными способами были выбраны две эпохи, на которые были доступны ГНСС-измерения пунктов региональной сети ДГС НСО: начальная 2013,005 (2013.01.02) и текущая 2017,164 (2017.03.01). Обработка проводилась с помощью онлайн-сервисов высокоточного позиционирования, с помощью ПО ТВС с последующим уравниванием геодезического построения, с помощью

моделей движения тектонических плит и с помощью выявленных в работах [17, 18, 19] зависимостей.

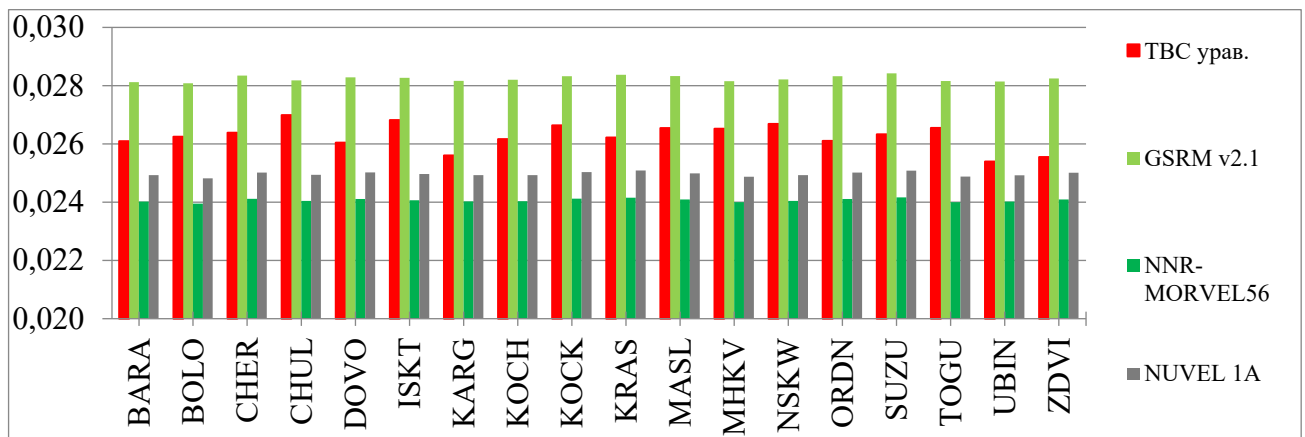
Разность между значениями, полученными на начальную и текущую эпохи, является смещением пункта за период. Полученные значения пересчитаны с учетом прошедшего времени и представлены на рисунке 9 в виде скоростей смещений пунктов ДГС НСО по вертикальной шкале, выраженные в миллиметрах в год (мм/год). Синим оттенкам на графике соответствуют скорости, полученные из обработки разными онлайн-сервисами высокоточного позиционирования. Красному цвету – скорости, полученные в ходе обработки в ПО ТВС с последующим уравниванием всей сети (ТВС урав.). Зеленым оттенкам соответствуют скорости, установленные для различных моделей движения тектонических плит. Желтому цвету – скорости, вычисленные с помощью предложенной в работах [17, 18, 19] функциональной зависимости. Все результаты обработки измерений получены в пространственных прямоугольных координатах в системе координат ITRF-2014 на соответствующую эпоху.

Максимальная СКП вычисленных координат на каждую эпоху для сервисов CSRS-PPP, Trimble RTX, AUSPOS, OPUS не превысила 2,5 см по каждой координате, для сервиса SOPAC SCOUT – 5,3 см. Результаты, полученные с применением сервиса Magic GNSS, на графиках не приведены, так как присутствует систематическое отклонение от результатов прочих сервисов и результатов моделирования более чем на 3–4 см/год.

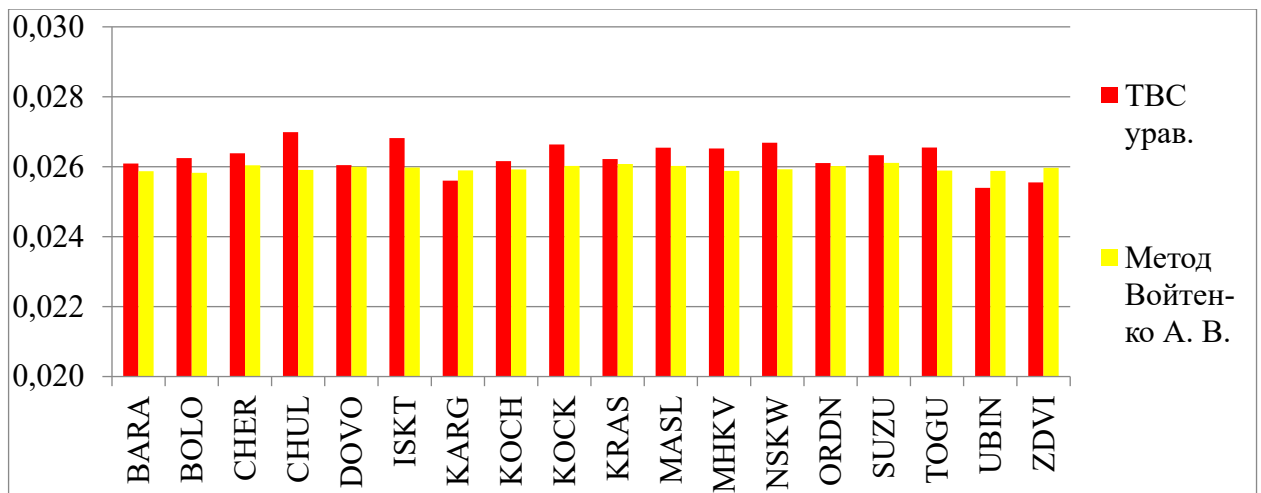
Из приведенных графиков следует, что вычисленные онлайн-сервисами скорости движения пунктов сети ДГС НСО согласуются с результатами моделирования движений тектонических плит примерно на уровне расхождений между значениями скоростей, полученными с помощью различных моделей. Результаты скоростей, полученных из обработки ГНСС-измерений классическим методом с последующим уравниванием всей сети (ТВС урав.), соответствуют результатам моделирования при СКП определения каждого пункта сети ДГС НСО на каждую эпоху измерений, не превышающей 0,7 см.



а)



б)



в)

Рисунок 9 – Сравнение скоростей движения пунктов сети ДГС НСО, вычисленных разными способами:

- а) с применением онлайн-сервисов и в ПО ТВС; б) установленные для различных моделей движения тектонических плит и вычисленные из обработки в ПО ТВС; в) с помощью предложенной функциональной зависимости и в ПО ТВС

Погрешность моделирования скоростей движения пунктов на ресурсе не приводится. Результаты скоростей, полученные методом функциональной зависимости [18, 17, 19] соответствуют скоростям из обработки в ПО ТВС с последующим уравниванием.

2.2 Уточнение принципа взаимосвязи систем отсчета и систем координат

Приведенные и проанализированные способы определения скоростей движения точек земной поверхности позволяют довольно точно решать задачи определения скоростей и направлений движения точек. Однако приведенные способы не могут в полной мере являться инструментом по установлению взаимосвязи глобальной системы отсчета с ее локальной реализацией пунктами региональных сетей ДГС. Следовательно, проблему несоответствия результатов высокоточного позиционирования различными методами в различных системах приведенные способы не решают. Данные способы можно считать упрощенным вариантом определения скоростей движения точки на поверхности Земли, так как они обладают принципиальными недостатками. Например, способы определения движений онлайн-сервисами или в коммерческом ПО ТВС представляют только линейные движения точки, а модели движения тектонических плит не отражают вертикальные смещения.

Определение взаимосвязи между локальной реализацией глобальной системы отсчета и глобальной системы отсчета на разные эпохи спутниковых измерений позволит вычислить скорости изменения параметров связи, характеризующиеся движением тектонической плиты, на которой развернута региональная сеть ДГС.

С развитием технологий ГНСС и повышением точности позиционирования использование статических параметров связи между системами отсчета и системами координат не позволит обеспечить точность, достижимую при использовании современных технологий ГНСС. Это приводит к несоответствиям результатов высокоточного позиционирования, полученных различными методами, в различных системах и на различные эпохи ГНСС измерений. Поэтому сформирован-

ный принцип (см. рисунок 3) 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 10 приведена схема, отражающая уточненный принцип взаимосвязи глобальной системы отсчета с системами координат. Уточнение введено во втором блоке сверху.



Рисунок 10 – Уточненная схема связи систем отсчета и систем координат

Определяемые параметры связи и скорости их изменения между глобальной системой отсчета и ее локальной реализацией пунктами региональной сети ДГС успешно укладываются в перспективную структуру опорной геодезической сети России, предложенную в работах [40, 50]. В этих работах предлагается структура

единой геодезической координатной основы, создание которой достигается путем объединения и уравнивания существующих сетей ДГС, пунктов ФАГС, ВГС, различных наземных навигационных систем. Для реализации единой геодезической координатной основы в этих публикациях предлагается создание двухуровневой структуры опорной геодезической сети, представленной на рисунке 11 (в работах [40, 50] вместо термина «дифференциальная геодезическая станция» использован термин «постоянно действующая базовая станция» (ПДБС)).



Рисунок 11 – Опорные геодезические сети в структуре объединенной координатной основы России [40, 50]

Первый уровень должен обеспечивать решение задач КВНО и геофизических наблюдений с наивысшей точностью и максимальной оперативностью путем объединения следующих элементов:

- фундаментальная астрономо-геодезическая сеть;
- высокоточная геодезическая сеть;
- сертифицированные региональные сети референчных станций (ДГС-1);

– наземные навигационные системы (ННС-1) типа Locata.

Второй уровень опорной геодезической сети является, в большей степени, вспомогательным и обеспечивает дублирование функций сети первого уровня для повышения надежности формирования единой системы КВНО. Этот уровень включает:

- спутниковую геодезическую сеть 1-го класса (СГС-1);
- классическую астрономо-геодезическую сеть 1–4-го класса (АГС);
- ДГС, не прошедшие сертификацию (ДГС-2 – «станции-кандидаты»);
- наземные навигационные системы типа eLoran (ННС-2).

В перспективе такой подход позволит создать в России современную высокоточную координатную основу и значительно повысить эффективность реализации единой системы КВНО России.

Поскольку движение тектонических плит и внутриплитовых блоков, на которых расположена территория России, имеет разнонаправленный характер, то уточненный принцип, заключающийся в дополнительной оценке скоростей изменения параметров связи, обеспечит связь отдельных фрагментов общероссийской опорной геодезической сети с глобальной системой отсчета и корректное поддержание такой связи в долгосрочной перспективе с учетом глобальных и региональных геодинамических процессов. Такой подход будет способствовать созданию единого высокоточного гомогенного координатного пространства на территории России [59].

2.3 Этапы реализации усовершенствованной методики согласно уточненному принципу связи систем координат и систем отсчета

В соответствии с уточненным принципом взаимосвязи глобальной кинематической системы отсчета с ее локальной статической реализацией пунктами региональных сетей ДГС далее описана усовершенствованная методика по установлению связи таких систем. Стандартная методика установления связи систем заключается в решении уравнения (1) относительно элементов сдвига, углов пово-

рота и масштабного коэффициента ($T_x, T_y, T_z, R_x, R_y, R_z, D$) по известным членам уравнения X_{1i} и X_{2i} , где i – номер пункта в сети, индексы 1 и 2 – начальная и текущая эпохи. Усовершенствованная методика заключается в комплексе мер по определению векторов X_{1i} и X_{2i} на заданную эпоху, а также определению скоростей изменения приведенных семи параметров связи систем на эту эпоху. Она состоит из шести этапов [82], описанных в таблице 7.

Таблица 7 – Этапы реализации усовершенствованной методики связи систем

№ п/п	Операция	Пояснение
1	Определение координат пунктов локальной спутниковой геодезической сети методом PPP или относительным методом от пунктов МГС на начальную эпоху 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
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

Окончание таблицы 7

№ п/п	Операция	Пояснение
5	Определение кинематической составляющей, характеризующей скорости изменения компонентов движения одной системы относительно другой	Для вычисления скоростей изменения компонентов движения достаточно определить частные 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

Ключевой момент при реализации усовершенствованной методики заключается в применении метода PPP или относительного метода позиционирования от пунктов МГС. На сегодняшний день метод PPP является одним из передовых методов высокоточного позиционирования, так как он объединяет в себе возможность достижения высокой точности (менее сантиметра при достаточно длительных спутниковых измерениях [49]), простоту и эффективность применения (не требуется наличие второго приемника для получения точных результатов позиционирования), получение результатов координатных определений в системе, в которой определены координаты спутников ГНСС – глобальной системе отсчета. В работах [16, 49, 95, 111] приведено описание метода PPP и показаны его преимущества.

При реализации первого и второго этапов методики необходимо, чтобы координатные определения выполнялись в глобальной системе отсчета. Это можно обеспечить методом относительного позиционирования от пунктов глобальной сети МГС, так как координаты этих пунктов определены с учетом движений тектонических плит или методом PPP. Поскольку на сегодняшний день количества пунктов сети МГС на территории России недостаточно для того, чтобы на большей части территории обеспечить возможность высокоточного определения ко-

ординат пунктов региональных сетей, то в основе реализации усовершенствованной методики лежит метод PPP.

На первом этапе могут быть выявлены существенные погрешности привязки пунктов региональной сети в общеземной системе отсчета, которые, например, выявлены в координатах пунктов сети ДГС Новосибирской области (ДГС НСО). Такие погрешности могут возникнуть из-за использования неадаптированного программного обеспечения для обработки сверхдлинных базовых линий или иных видов погрешностей, сопровождающих процесс высокоточного позиционирования. Оценка величины погрешностей привязки региональной сети ДГС НСО приведена в следующем подразделе.

При реализации *второго этапа* необходимо понимать, что важным условием корректности вычислений является разность начальной и текущей эпох. Чем выше разность, тем точнее могут быть определены параметры связи. Например, в исследованиях [18, 84] установлено, что скорость движения точек земной поверхности на территории Западной Сибири составляет порядка 3 см в год, что в худшем случае может соответствовать погрешности позиционирования, выполняемого методом PPP. Таким образом, погрешность позиционирования может быть эквивалентна 0,001 секунде дуги на поверхности земного шара при расчете параметров разворота одной системы относительно другой. Это свидетельствует о том, что нежелательно проводить вычисления с разностью начальной и текущей эпох менее одного года.

На третьем этапе для составления системы векторных уравнений необходимо решить, какой вектор координат принимать в расчет, если существует различие между вектором координат, полученным методом PPP на начальную эпоху измерений, и вектором координат, зафиксированным в каталоге. Если разница между ними на заданную начальную эпоху превышает априорную погрешность позиционирования, то в обработку следует включать вектор, вычисленный в глобальной системе отсчета (методом PPP или относительным методом от пунктов МГС). В ином случае – не имеет значения. Оценка семи параметров из составлен-

ной системы векторных уравнений обусловит связь практической реализации глобальной системы отсчета с ее исправленной версией на начальную эпоху измерений. Оценку семи параметров из составленной переопределенной системы векторных уравнений можно выполнить с применением одного из методов, приведенных в 1.6.

Четвертый этап заключается в определении необходимости включения в число оцениваемых тех или иных параметров. В работах [24, 25, 76] авторами масштабный коэффициент (D) интерпретируется как сдвиг всей локальной спутниковой сети по высоте, что увеличивает длины линий между пунктами и геоцентрический радиус-вектор пропорционально масштабу. Также не всегда необходимо включать в число оцениваемых параметров сдвиг центра одной системы относительно другой. Такая опция необходима при определении связи между системами с различными относящимися к ним референц-эллипсоидами. Например, при определении связи между референцной и геоцентрической системами, в которых центры относящихся к этим системам эллипсоидов смещены. Матрицу вращения вокруг координатных осей одной системы относительно другой необходимо включать в число оцениваемых параметров всегда, когда связь систем определяется в трехмерном пространстве.

Пятым этапом реализации усовершенствованной методики является определение кинематической составляющей, которая характеризует движение региональной реализации глобальной системы отсчета вследствие геодинамических процессов относительно глобальной системы отсчета. Кинематическая составляющая – это скорость изменения параметров трансформации, определенная на начальную эпоху измерений. Она соответствует частному полученных параметров трансформации и разности текущей и начальной эпох. В случае если при фиксации координат пунктов сети имела место существенная погрешность привязки, выявленная на третьем этапе, частное следует определять между параметрами трансформации, вычисленными по векторам, определен-

ным методом PPP. Скорость изменения параметров связи систем может быть представлена формулами:

$$T(t) = \dot{T} = \frac{T}{t_i - t_0}, R(t) = \dot{R} = \frac{R}{t_i - t_0}, D(t) = \dot{D} = \frac{D}{t_i - t_0}, \quad (39)$$

где t_i – текущая эпоха измерений; t_0 – начальная эпоха измерений. При этом при определении взаимосвязи систем верны следующие равенства [107]:

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} + T + D \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} + R \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \dot{x}_2 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{z}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \\ \dot{z}_1 \end{pmatrix} + \dot{T} + \dot{D} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} + \dot{R} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} \end{cases} \quad (40)$$

Шестой этап реализации усовершенствованной методики связи систем – это расчет и оценка остаточных невязок, полученных при вычислении параметров связи и скоростей их изменения. При расчете параметров следует использовать 24-часовые ГНСС-измерения пунктов региональной сети ДГС. Как правило, пункты таких сетей расположены в зоне широко открытого радиогоризонта, оборудованы современными мультисистемными и мультиканальными приемниками, что позволяет судить о низком влиянии внешних погрешностей, а также о том, что ГНСС-измерения, полученные с пунктов сети ДГС, являются в высокой степени равноточными. Алгоритмизация метода наименьших квадратов составлена таким образом, чтобы общий функционал невязок всех пунктов стремился к минимуму. Следовательно, остаточные невязки при равноточных измерениях в идеальных условиях должны стремиться к минимуму. Таким образом, выявление значительного отклонения остаточной невязки какого-либо пункте свидетельствует о низком качестве ГНСС-измерений, полученных с него. Включение в расчет параметров связи измерений с такого пункта приведет к увеличению погрешности определения параметров и увеличению величины

остаточных невязок других пунктов. Принцип отбраковки пунктов, на которых остаточные невязки выше, чем на других, можно описать следующим образом. Остаточная невязка на пункте по любой из координат не должна превышать среднеквадратическое отклонение (1σ), рассчитанное по всем пунктам по соответствующей координате. Такой принцип обеспечит исключение из расчета параметров связи систем пункты, на которых качество ГНСС-измерений хуже, в сравнении с другими.

Повышенные остаточные невязки на пунктах могут быть следствием движения пункта в сторону, не соответствующую общему движению сети. Необходимо определить, данный пункт относится к другой тектонической плите или полученные с него ГНСС-измерения обладают низкой степенью качества. В этом случае такой пункт также должен быть исключен из списка пунктов, участвующих в вычислении параметров связи систем.

Остаточная невязка – это величина расхождения приближенного равенства, полученного при обратной подстановке вычисленных параметров в исходное уравнение. Остаточные невязки могут быть рассчитаны по формуле

$$f_i = \mathbf{X}_{2i} - \mathbf{X}_{1i} W, \quad (41)$$

где f_i – остаточная невязка i -го пункта; \mathbf{X}_{1i} , \mathbf{X}_{2i} – векторы координат i -го пункта в первой и второй системах; W – матрица коэффициентов преобразования систем.

Векторы \mathbf{X}_1 и \mathbf{X}_2 должны быть определены с максимальной степенью точности, поскольку от их качества зависит точность определения параметров связи систем. Описанные этапы усовершенствованной методики позволяют установить связь глобальной кинематической системы отсчета с ее локальной статической реализацией пунктами региональной сети ДГС, а также выявить существенную погрешность определения координат пунктов сети ДГС в общеземной системе отсчета. Вычисленная кинематическая составляющая обусловит смещение пунктов вследствие перманентных геодинимических процессов.

2.4 Применение усовершенствованной методики на примере региональной сети дифференциальных геодезических станций Новосибирской области

Одним из преимуществ реализации усовершенствованной методики является то, что в процессе осуществляется проверка зафиксированных в каталоге геоцентрических векторов положения пунктов региональной сети ДГС в общеземной системе отсчета. Приведенные этапы по установлению связи глобальной кинематической системы отсчета с ее локальной статической реализацией пунктами региональной сети ДГС позволяют выявить существенные погрешности определения координат этих пунктов в общеземной системе отсчета.

Первые результаты апробации усовершенствованной методики получены на примере пунктов региональной сети ДГС НСО.

В соответствии с этапами реализации, описанными выше, необходимо определить геоцентрические радиусы-векторы координат пунктов сети на начальную и текущую эпохи измерений (X_{1i} и X_{2i}). Каталог координат пунктов сети в первой системе отсчета (X_{1i}) получен на эпоху 2010,455 (2010.06.15) путем минимально ограниченного уравнивания сети с фиксацией пункта NSKW в качестве опорного, от которого комбинированным (лучевым и сетевым) методом были распространены координаты на все пункты сети [63]. Координаты пункта NSKW (из отчета о выполнении технического задания) вычислены относительным методом от ближайших пунктов сети МГС. Обработка базовых линий производилась с помощью коммерческого программного обеспечения ПО ТВС v1.0, их длина составляла порядка 1 000–1 500 км. Максимальная СКП всех результатов (по данным отчета о выполнении технического задания) составила 0,022 м, минимальная 0,013 м. Координаты исходного пункта получены с погрешностью 0,006 м в плане и 0,010 м по высоте.

Применение данного ПО (слабо адаптированного на тот момент к вычислению векторов сверхдлинных базовых линий) в совокупности с применяемой ме-

тодической определения координат, предположительно, могло привести к завышению оценки точности определения актуального положения пункта [76]. Это приводит к ошибке фиксации всех координат пунктов ДГС НСО в общеземной системе отсчета на указанную эпоху измерений.

Для разрешения этого предположения выполнено сопоставление результатов, полученных данным способом, с результатами, полученными с использованием современных способов высокоточного спутникового позиционирования. Измерения ДГС НСО на эпоху 2010,455 переобработаны с использованием двух методов высокоточного позиционирования: относительного и дифференциального (PPP). Данные методы реализованы онлайн-сервисами обработки ГНСС-измерений: AUSPOS и CSRS-PPP соответственно. СКП вычисленных онлайн-сервисами координат, по данным из отчета об обработке ГНСС-измерений, не превышают 0,012 м при определении геоцентрических координат и 0,014 м при определении геодезической высоты. В таблице 8 приведены разности координат, зафиксированных в каталоге и вычисленных онлайн-сервисами обработки ГНСС-измерений. ГНСС-измерения не всех пунктов сети ДГС НСО были доступны для обработки, поэтому далее представлены результаты только по 17 пунктам из 31 пункта, действующего в настоящее время. Вычисленные разности координат получены в ITRF-2008 и приведены в метрах.

Таблица 8 – Разности фиксированных и переопределенных координат пунктов сети ДГС НСО

Разности фиксированных координат и вычисленных									
относительным методом, м					по методу PPP, м				
Пункты	ΔX	ΔY	ΔZ	$\Delta H_{\text{геод.}}$	Пункты	ΔX	ΔY	ΔZ	$\Delta H_{\text{геод.}}$
BARA	0,031	0,048	0,121	0,124	BARA	0,030	0,039	0,115	0,119
BOLO	0,031	0,050	0,117	0,121	BOLO	0,034	0,035	0,108	0,111
CHER	0,030	0,049	0,124	0,125	CHER	0,028	0,037	0,117	0,118
CHUL	0,028	0,048	0,118	0,122	CHUL	0,032	0,036	0,110	0,114

Окончание таблицы 8

Разности фиксированных координат и вычисленных									
относительным методом, м					по методу PPP, м				
Пункты	ΔX	ΔY	ΔZ	$\Delta H_{\text{геод.}}$	Пункты	ΔX	ΔY	ΔZ	$\Delta H_{\text{геод.}}$
DOVO	0,031	0,047	0,117	0,120	DOVO	0,035	0,032	0,107	0,108
ISKT	0,031	0,048	0,121	0,124	ISKT	0,031	0,035	0,112	0,113
KARG	0,028	0,048	0,118	0,123	KARG	0,035	0,037	0,113	0,118
KOCH	0,030	0,047	0,121	0,123	KOCH	0,031	0,035	0,113	0,114
KOCK	0,030	0,048	0,121	0,123	KOCK	0,033	0,035	0,112	0,114
KRAS	0,030	0,045	0,117	0,118	KRAS	0,029	0,033	0,107	0,108
MASL	0,030	0,048	0,119	0,122	MASL*	0,025	-0,032	0,018	-0,002
MHKV	0,031	0,043	0,118	0,118	MHKV	0,031	0,035	0,114	0,116
ORDN	0,031	0,048	0,123	0,125	ORDN	0,036	0,033	0,112	0,113
SUZU	0,029	0,050	0,124	0,128	SUZU*	0,022	-0,029	0,023	0,004
TOGU	0,032	0,047	0,124	0,127	TOGU	0,033	0,035	0,116	0,117
UBIN	0,029	0,050	0,122	0,126	UBIN	0,027	0,040	0,113	0,118
ZDVI	0,028	0,046	0,117	0,120	ZDVI	0,030	0,035	0,108	0,112
Ср. знач.	0,030	0,047	0,120	0,123	Ср. знач.	0,032	0,035	0,112	0,114

* пункты, на которых результаты позиционирования получены со значительными погрешностями, не включенные в расчет среднего значения.

Идентичные разности координат, полученные двумя независимыми методами, подтверждают погрешность определения положения пунктов сети ДГС НСО на эпоху 2010,455 на уровне 12–13 см в прямоугольной геоцентрической системе координат и 11–12 см по высоте над эллипсоидом.

Однако с эпохи 2010,455 прошло около 10 лет и фактическое местоположение пунктов сети ДГС НСО изменилось приблизительно на 30 см. На рисунке 12 представлена схема сети ДГС НСО со скоростями и направлениями движений пунктов в топоцентрической системе координат.

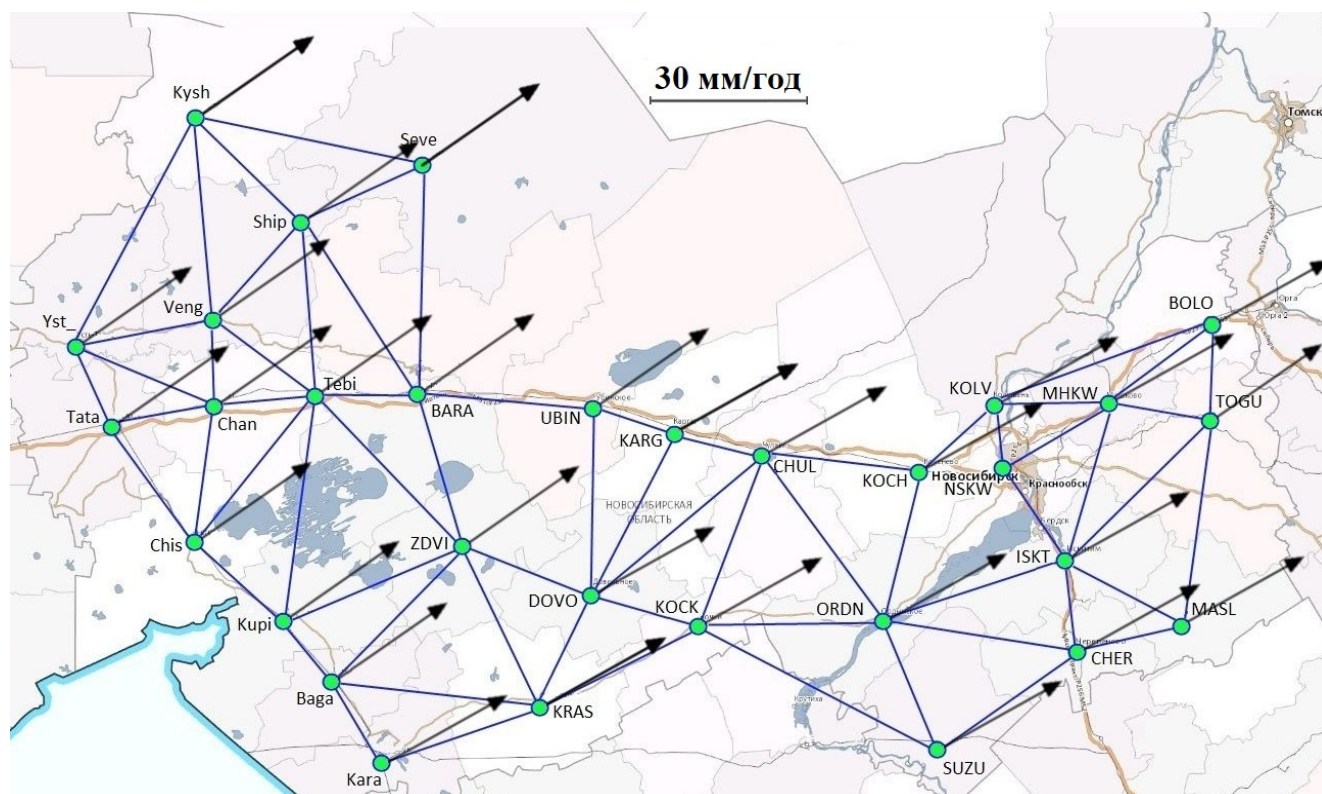


Рисунок 12 – Скорости и направления движения пунктов сети ДГС НСО

Для поддержания точности формирования дифференциальных поправок и другой навигационно-измерительной информации, создаваемой с помощью пунктов сети ДГС НСО, оператору сети необходимо вводить поправку в координаты станций. Как отмечено в 1.3, в настоящее время в России, в ходе эксплуатации сетей ДГС, поправку за движение пунктов вследствие геотектонических процессов вводят не всегда и не везде.

Для проверки наличия изменений в координатах пунктов сети ДГС НСО в ходе диссертационного исследования сопоставлены координаты пунктов, зафиксированные в RINEX-файлах ГНСС-измерений, с эпохи первичного уравнивания сети 2010,455 (2010.06.15) по эпоху 2020,003 (2020.01.02). За это время изменения в координатах пунктов установлены в период с 2013,003 по 2014,003. В таблице 9 приведены разности фиксированных координат пунктов сети ДГС НСО до эпохи 2013,003 и после 2014,003.

Таблица 9 – Разности фиксированных координат в RINEX-файлах
ГНСС-измерений пунктов сети ДГС НСО на эпохи 2013,003 и 2014,003

Разности координат					
№ п/п	Пункт	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	3 <i>D</i>
1	BARA	-0,0010	0,0051	0,0076	0,0092
2	BOLO	0,0028	0,0022	0,0068	0,0077
3	CHER	0,0007	0,0012	-0,0009	0,0017
4	CHUL	-0,0003	0,0009	-0,0006	0,0011
5	DOVO	0,0003	0,0005	-0,0004	0,0007
6	ISKT	0,0011	-0,0083	0,0056	0,0100
7	KARG	-0,0007	0,0002	-0,0001	0,0007
8	KOCH	0,0002	-0,0011	0,0008	0,0014
9	KOCK	-0,0004	0,0009	-0,0006	0,0012
10	KRAS	-0,0004	0,0000	0,0000	0,0004
11	MASL	0,0006	-0,0010	0,0007	0,0014
12	MHKV	0,0004	-0,0011	0,0007	0,0014
13	NSKW	0,0000	-0,0001	-0,0002	0,0002
14	ORDN	-0,0004	-0,0007	0,0006	0,0010
15	SUZU	-0,0001	-0,0003	0,0001	0,0003
16	TOGU	0,3334	1,9060	2,1032	2,8579
17	UBIN	0,0006	-0,0007	0,0004	0,0010
18	ZDVI	0,0004	-0,0006	0,0003	0,0008

Как видно в таблице 9, изменение координат пунктов сети ДГС НСО не превысило 0,010 м в трехмерном пространственном выражении. Исключение составил пункт TOGU, положение которого по неизвестным причинам изменилось почти на 3 метра. Вероятно, изменение координат пунктов связано с переуровнением сети после включения в нее новых пунктов второй очереди построения. В 2013 г. в список пунктов ДГС НСО добавлены 11 новых пунктов, находящихся на западе Новосибирской области [67, 83].

Таким образом, в соответствии с третьим этапом реализации усовершенствованной методики для определения векторов положения пунктов региональ-

ной сети ДГС НСО на начальную эпоху (X_{1i}) в обработку необходимо включать координаты пунктов, вычисленные в глобальной системе отсчета (методом PPP или относительным методом от пунктов МГС), а не зафиксированные в каталоге.

Определение векторов положения пунктов региональной сети ДГС НСО на текущую эпоху (X_{2i}) 2019,471 (2019.06.21) выполнялось с применением метода PPP с помощью онлайн-сервисов высокоточного позиционирования CSRS-PPP и TrimbleRTX. Контроль результатов проводился методом относительного позиционирования от пунктов МГС с применением сервиса AUSPOS. Максимальное расхождение результатов обработки по приведенным сервисам достигало 0,022 м, при среднем расхождении 0,011 м. Максимальная СКП по каждому пункту не превысила 0,018 м при средней 0,009 м.

По итогам постобработки 17 пунктов сети ДГС НСО, в соответствии с третьим этапом, составлена переопределенная система векторных уравнений (1), из которой необходимо выразить оцениваемые параметры $T_x, T_y, T_z, R_x, R_y, R_z, D$. Расчет проводился в программной среде MathCad14 с помощью функции «given – minerr», возвращающей результат, который минимизирует соответствующий функционал невязки, связанный с решаемой задачей. Если в результате поиска решения не может быть получено дальнейшее уточнение текущего приближения к решению, «minerr» возвращает это приближение. На практике решение, полученное с помощью данной функции, эквивалентно решению, найденному по методу наименьших квадратов для переопределенной системы векторных уравнений.

Другим способом выражения семи параметров из составленной системы векторных уравнений является программная утилита «Вычисление 7 параметров». После загрузки не менее трех векторов становится возможен расчет семи параметров и оценка остаточных невязок. В настоящем исследовании сравнены результаты, полученные обоими способами. Результаты совпали на уровне 0,002 м и 0,001 с.

Важным преимуществом программной среды MathCad при решении данной задачи является то, что здесь существует возможность принять за константу один или несколько параметров, и с учетом этого вести дальнейший расчет. Согласно

четвертому этапу, в данном случае при переводе из одной системы отсчета в другую высокая точность пространственной спутниковой геодезической сети (длины линий между физически существующими точками на поверхности Земли) должна быть сохранена. С использованием масштабного коэффициента при расчетах длины линий изменятся на величину, пропорциональную масштабу [24, 25, 76]. Таким образом, расчет параметров связи глобальной системы отсчета с ее местной реализацией пунктами локальной сети ДГС НСО проводился с игнорированием масштабного коэффициента, т. е. с приравниванием его к единице.

Поскольку на третьем этапе выявлены существенные погрешности в координатах пунктов сети ДГС НСО в общеземной системе отсчета, то корректно определить скорость движения такой реализации глобальной системы отсчета относительно глобальной системы отсчета невозможно. Результаты, полученные от пунктов сети с существенными погрешностями в координатах опорных пунктов, необходимо сначала привести в соответствие с истинными результатами в глобальной системе с помощью статических параметров преобразования систем, а затем производить расчет скоростей движения.

В таблице 10 приведены статические параметры связи на эпоху 2010,455 (2010.06.15), между локальной реализацией глобальной системы отсчета пунктами сети ДГС НСО с ее переопределенной (пересчитанной методом PPP) версией, в которой координаты пунктов определены в глобальной системе отсчета. Также в таблице 10, в соответствии с пятым этапом, приведены вычисленные скорости изменения параметров связи между глобальной системой отсчета и ее переопределенной локальной реализацией пунктами сети ДГС НСО.

В таблице 11 приведены остаточные невязки при вычислении статических параметров связи, между локальной реализацией глобальной системы отсчета пунктами сети ДГС НСО и ее переопределенной версией. В таблице 12 приведены остаточные невязки при вычислении скоростей измерений параметров связи глобальной системы отсчета и ее переопределенной локальной реализацией пунктами сети ДГС НСО.

Таблица 10 – Параметры связи текущей и переопределенной реализации, а также скорости изменения параметров связи глобальной системы отсчета и ее переопределенной реализации

Наименование параметров	Значение параметров связи	Скорости изменения параметров связи
Масштаб	1	0
Сдвиг по X	0,0118 м	-0,00795 м/год
Сдвиг по Y	-0,0921 м	0,00422 м/год
Сдвиг по Z	-0,0816 м	-0,00283 м/год
Разворот по X	0,0021"	-0,00009 "/год
Разворот по Y	0,0013"	0,00025 "/год
Разворот по Z	-0,0002"	-0,00067 "/год

Таблица 11 – Остаточные невязки, полученные при вычислении статических параметров связи, между локальной реализацией глобальной системы отсчета пунктами сети ДГС НСО и ее переопределенной версией

№ п/п	Пункт	X , м	Y , м	Z , м	$3D$, м
1	BARA	0,0003	0,0010	0,0024	0,0026
2	BOLO	0,0010	0,0025	-0,0042	0,0050
3	CHER	0,0001	0,0005	0,0021	0,0022
4	CHUL	-0,0002	0,0004	-0,0013	0,0014
5	DOVO	0,0005	-0,0005	-0,0028	0,0029
6	ISKT	0,0011	0,0000	0,0006	0,0013
7	KARG	-0,0019	0,0003	-0,0007	0,0020
8	KOCH	0,0001	-0,0003	0,0005	0,0006
9	KOCK	0,0000	-0,0002	0,0002	0,0003
10	KRAS	-0,0001	-0,0031	-0,0033	0,0045
11	MASL	0,0001	-0,0001	-0,0019	0,0019
12	MHKV	0,0011	-0,0048	-0,0025	0,0055
13	ORDN	0,0011	-0,0002	0,0018	0,0021
14	SUZU	-0,0009	0,0014	0,0030	0,0034
15	TOGU	0,0015	-0,0002	0,0036	0,0039
16	UBIN	-0,0017	0,0030	0,0023	0,0041
Максимальная невязка (по модулю)		0,0019	0,0048	0,0042	0,0055
Средняя невязка (по модулю)		0,0007	0,0012	0,0021	0,0027

Таблица 12 – Остаточные невязки, полученные при вычислении скоростей изменения параметров связи глобальной системы отсчета и ее переопределенной локальной реализацией пунктами сети ДГС НСО

№ п/п	Пункт	X, м	Y, м	Z, м	3D, м
1	BARA	-0,0001	-0,0019	0,0014	0,0024
2	BOLO	-0,0027	-0,0002	0,0062	0,0068
3	CHER	-0,0035	0,0003	0,0069	0,0077
4	CHUL	0,0088	0,0060	-0,0001	0,0107
5	DOVO	-0,0015	-0,0029	0,0021	0,0039
6	ISKT	-0,0011	0,0047	-0,0037	0,0061
7	KARG	0,0018	0,0010	0,0001	0,0021
8	KOCH	-0,0017	-0,0028	-0,0068	0,0075
9	KOCK	0,0020	0,0040	0,0019	0,0049
10	KRAS	0,0018	0,0003	-0,0015	0,0024
11	MASL	0,0002	-0,0003	0,0027	0,0027
12	MHKV	-0,0019	0,0009	0,0020	0,0029
13	ORDN	-0,0012	-0,0022	-0,0056	0,0061
14	SUZU	0,0017	-0,0023	0,0005	0,0029
15	TOGU	-0,0028	-0,0042	-0,0049	0,0070
16	UBIN	-0,0018	-0,0020	0,0005	0,0027
Максимальная невязка (по модулю)		0,0088	0,0060	0,0069	0,0107
Средняя невязка (по модулю)		0,0020	0,0021	0,0028	0,0049

2.5 Выводы по второму разделу

Во втором разделе диссертации рассмотрен вопрос интерпретации сетей ДГС как локальной реализации глобальной системы отсчета. Такой подход позволяет считать сети ДГС некой реализацией глобальной системы отсчета, зафиксированной на небольшом участке на конкретную временную эпоху, так как скорости движения пунктов в каталогах не приводятся, а переопределение координат пунктов сетей ДГС в настоящее время в России производится редко.

В связи с отсутствием учета временного фактора при эксплуатации сетей ДГС в России и устойчивым ростом точности спутникового позиционирования необходимо уточнить принцип взаимосвязи глобальной кинематической системы отсчета с ее местными статическими реализациями. В настоящее время использо-

вание только статических параметров связи систем (глобальных систем отсчета и их реализаций – сетей ДГС) не достаточно для обеспечения точности, сопоставимой с точностью, достижимой современными технологиями ГНСС. Во втором разделе диссертации в существующий принцип предложено ввести уточнение, заключающееся в добавлении кинематических параметров связи между системами – параметров связи, зависящих от времени.

В соответствии с уточненным принципом во втором разделе диссертации описаны этапы реализации усовершенствованной методики связи систем, которые позволяют установить движение глобальной кинематической системы отсчета относительно ее локальной или региональной статической реализации пунктами сетей ДГС. Получены первые результаты применения усовершенствованной методики на примере пунктов сети ДГС НСО, с помощью которой оценены параметры связи и скорости их изменения между глобальной координатной основой ITRF-2014 и ее локальной реализацией пунктами сети ДГС НСО.

Одним из преимуществ усовершенствованной методики является возможность определения значительных погрешностей при фиксации координат пунктов региональных сетей ДГС в общеземной системе отсчета. Существенные погрешности выявлены в координатах пунктов сети ДГС НСО. Таким образом, применение методики связи глобальной кинематической системы отсчета с ее локальной статической реализацией позволит не только математически обоснованно обеспечить согласование системы отсчета и системы координат, но и компенсирует погрешность, которая могла возникнуть при обработке сверхдлинных базовых линий от опорных пунктов при фиксации координат пунктов региональной сети. Такое преимущество актуально в России в свете дефицита опорных пунктов, реализующих глобальную систему отсчета.

3 АПРОБАЦИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ МЕТОДИКИ НА ПРИМЕРЕ ПУНКТОВ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ АСТРОНОМО-ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЕТИ И ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ НА ПРАКТИКЕ

3.1 Постановка задачи эксперимента

Высшее звено в структуре формирования российской государственной координатной основы (ГСК-2011) – фундаментальная астрономо-геодезическая сеть, она является региональной реализацией глобальной системы отсчета. Создание ГСК-2011 велось с ориентировкой на глобальную международную земную систему отсчета (ITRS) [26, 32], однако геодинамические процессы, влияющие на смещение опорных пунктов относительно центра масс Земли, играют разную роль во временной эволюции систем. В системе ГСК-2011 такие процессы учету не подлежат, поскольку система создана для ведения в ней различных видов прикладной геодезической и картографической деятельности, в которой учет постоянного изменения координат опорных пунктов не подразумевается [27]. В этой связи рассогласованность движения российской государственной системы координат ГСК-2011 и международной земной системой отсчета ITRS стала приводить к несоответствию результатов высокоточных спутниковых измерений, выполненных в разное время, разными методами. Исходя из этого, необходимость поиска способа согласования ГСК-2011 с глобальной системой отсчета является актуальной задачей.

С помощью усовершенствованной методики необходимо определить параметры связи и их скорости измерения глобальной системы отсчета и ее локальной реализации, сформированной пунктами ФАГС. Полученные параметры связи и скорости их изменения будут являться поправкой, введение которой в результаты позиционирования, выполненного относительным методом от пунктов ФАГС, приведут полученные результаты в соответствие результатами, полученными на тех же пунктах в то же время, но в глобальной системе отсчета (ITRF-2014).

Таким образом, проведение эксперимента по определению координат пунктов на территории России в системе ГСК-2011 с последующим введением поправки за движение систем ITRF-2014 относительно ГСК-2011 позволит привести результаты высокоточных ГНСС-измерений выполненного разными методами в разных системах в независимости от эпохи измерений в соответствии друг другу.

3.2 Вычисление кинематических параметров связи системы ГСК-2011 с глобальной координатной основой ITRF-2014

Вычисление кинематических параметров связи систем координат характеризуется определением компонентов движения одной системы относительно другой. Рассматривая ГСК-2011 как локальную (региональную) реализацию глобальной системы отсчета сетями опорных пунктов ФАГС, ВГС, СГС, определить компоненты движения относительно ITRF можно, полагая, что система ГСК-2011 неподвижна, а изменения положения пунктов происходят в системе ITRF. Построение и уравнивание системы ГСК-2011 выполнялось с использованием пунктов МГС, для обеспечения согласованности с координатной основой ITRF [26, 32, 72]. На сайте ЦГКиИПД [86] в разделе «Список координат и скоростей пунктов, участвовавших в первичном построении системы координат ГСК-2011 на эпоху 1 января 2011 года», приведен список пунктов, используемых при построении системы ГСК-2011. Их количество в списке – 46. Сопоставив приведенные в списке пункты со списком существующих в настоящее время пунктов ФАГС, можно сделать вывод, что из числа ныне существующих пунктов ФАГС при первичном построении системы ГСК-2011 были использованы только 15. Остальной 31 пункт – это пункты сети МГС, расположенные на территории России и ближнего зарубежья.

Пункты МГС характеризуются высокой стабильностью положения относительно друг друга. Расположенные в зоне развернутой сети пунктов ФАГС, пунк-

ты МГС также отражают движение ITRF относительно ГСК-2011, как и пункты ФАГС. На текущий момент на территории России функционируют 52 пункта ФАГС и 22 пункта МГС, из них уникальных 18. Их расположение приведено на рисунке 13.

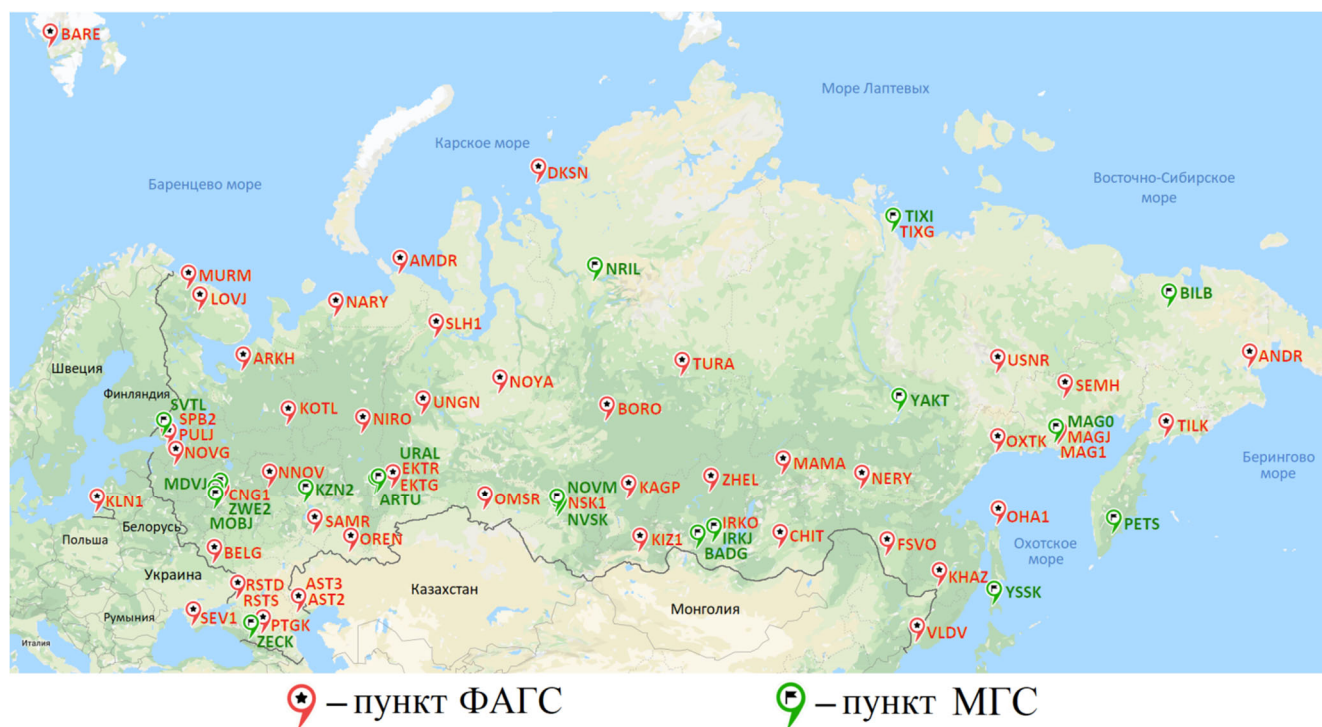


Рисунок 13 – Пункты ФАГС и МГС, расположенные на территории России

Для расчета компонентов движения системы ITRF относительно ГСК-2011 принцип отбора пунктов ФАГС для включения в обработку заключался в том, чтобы на начало 2020 г. станция функционировала не менее 2 лет. Для пунктов МГС принцип отбора заключался в том, чтобы ГНСС-измерения были доступны на эпохи 2011,003 и 2020,003. Таким образом, в обработку приняты ГНСС-измерения 22 пунктов ФАГС на среднюю начальную эпоху 2017,866 (2017.11.13) и среднюю текущую эпоху 2020,003 (2020.01.02), а также ГНСС-измерения 17 пунктов МГС на среднюю начальную эпоху 2011,0 (2011.01.01) и среднюю текущую эпоху 2020,003 (2020.01.02). В таблице 13 представлен список и сведения о пунктах, ГНСС-измерения которых приняты в обработку.

Таблица 13 – Список и информация о пунктах, ГНСС-измерения которых использованы для вычисления компонентов движения ITRF-2014 относительно ГСК-2011

№ п/п	Пункт	Сегмент	Местоположение	Начальная эпоха (год, день года)	Текущая эпоха (год, день года)	Разность эпох (лет)
1	CNG1	RGS	Москва	2017,315	2020,001	2,14
2	CHIT	RGS	Чита	2017,300	2020,001	2,18
3	VLDV*	RGS	Владивосток*	2017,315	2020,001	2,14
4	NOYA	RGS	Ноябрьск	2017,315	2020,001	2,14
5	SAMR	RGS	Самара	2017,315	2020,001	2,14
6	ARKH	Росреестр	Архангельск	2017,315	2020,002	2,14
7	MURM	Росреестр	Мурманск	2017,315	2019,362	2,13
8	KOTL	Росреестр	Котлас	2017,315	2020,002	2,14
9	OHA1*	Росреестр	Оха*	2017,315	2020,002	2,14
10	SEV1	Росреестр	Севастополь	2017,315	2020,002	2,14
11	BELG	Росреестр	Белгород	2017,315	2020,002	2,14
12	SPB2	Росреестр	Санкт-Петербург	2017,315	2020,002	2,14
13	KHAZ*	Росреестр	Хабаровск*	2017,315	2020,002	2,14
14	KAGP	Росреестр	Красноярск	2017,315	2019,290	1,93
15	KLN1	Росреестр	Калининград	2017,315	2020,002	2,14
16	IRKO	Росреестр	Иркутск	2017,315	2020,002	2,14
17	PTGK	Росреестр	Пятигорск	2017,315	2020,002	2,14
18	NOVG	Росреестр	Великий Новгород	2017,315	2020,002	2,14
19	NNOV	Росреестр	Нижний Новгород	2017,315	2020,002	2,14
20	PULJ*	Росреестр	Пулково	2017,316	2020,002	2,14
21	OREN*	Росреестр	Оренбург	2017,316	2020,002	2,14
22	MOBJ	РАН	Обнинск	2017,315	2020,001	2,14
23	TIXG	РАН	Тикси	2017,315	2020,001	2,14
24	LOVJ	РАН	Ловозеро	2017,315	2020,001	2,14
25	MDVJ	МГС	Менделеево	2011,002	2020,001	9,00
26	IRKJ	МГС	Иркутск	2011,002	2020,001	9,00
27	NVSK	МГС	Новосибирск	2011,002	2020,001	9,00

Окончание таблицы 13

№ п/п	Пункт	Сегмент	Местоположение	Начальная эпоха (год, день года)	Текущая эпоха (год, день года)	Разность эпох (лет)
28	YSSK*	МГС	Южно-Сахалинск*	2011,002	2020,001	9,00
29	BADG	МГС	Бадары	2011,015	2020,001	8,96
30	SVTL	МГС	Светлое	2011,002	2020,001	9,00
31	ZECK	МГС	Зеленчукское	2011,004	2020,001	8,99
32	YAKT	МГС	Якутск	2011,002	2020,001	9,00
33	MAG0*	МГС	Магадан*	2012,002	2019,364	7,99
34	PETS*	МГС	Петропавловск-Камчатский*	2011,002	2020,001	9,00
35	TIXI	МГС	Тикси	2011,002	2020,001	9,00
36	ARTU	МГС	Арти	2011,002	2020,001	9,00
37	BILB*	МГС	Билибино*	2011,002	2020,001	9,00
38	NRIL	МГС	Норильск	2011,002	2020,001	9,00
39	NOVM	МГС	Новосибирск	2011,002	2020,001	9,00

* пункты, находящиеся не на Евразийской тектонической плите.

В соответствии с первым и вторым этапами реализации усовершенствованной методики обработка всех ГНСС-измерений проводилась с использованием метода PPP с помощью онлайн-сервисов высокоточного позиционирования CSRS-PPP и TrimbleRTX. Их эффективность подтверждена в работах [84, 89, 108]. Движение пунктов обуславливается разностью координат, рассчитанных на начальную и текущую эпохи. Все ГНСС-измерения пунктов имели продолжительность 24 ч и дискретность 30 с. В обработке участвовали пять последовательных суточных файлов ГНСС-измерений с каждого пункта. Полученные результаты усреднены на пятисуточном интервале. СКП полученных результатов по всем пунктам не превышает 1,3 см в системе ITRF-2014. Оценка точности результатов приведена в отчете об обработке ГНСС-измерений.

При выполнении третьего этапа – составление системы векторных уравнений (1) – в данном случае принимаются в расчет координаты пунктов ФАГС и МГС,

вычисленные методом PPP, в глобальной системе отсчета. Использование координат пунктов, полученных из опубликованного списка координат пунктов ФАГС на сайте ЦГКиИПД, не рекомендуется по причине возможного несоответствия координат из каталога актуальным координатам в глобальной системе отсчета. Причины таких несоответствий приведены в 1.4 и по большей части заключаются в различии в учете геодинамических процессов в системах ГСК-2011 и ITRF-2014.

При реализации четвертого этапа необходимо определить, какие параметры связи систем требуется включить в число оцениваемых. Уровень точности, отсчетный эллипсоид, геоцентричность и принципы ориентации в теле Земли систем ITRF-2014 и ГСК-2011 в соответствии с [58] идентичны друг другу. Различия между ними есть только в составе геодезических пунктов, реализующих данные системы, и в способах определения скоростей движения пунктов вследствие геодинамических процессов. Параметры связи этих систем на эпоху 2011,0 приведены в Приказе Росреестра от 23.03.2016 № П/0134 [58], где в строке элементы сдвига начала координатных осей одной системы относительно другой соответствуют по осям: $X (0,002 \pm 0,010 \text{ м})$; $Y (-0,003 \pm 0,020 \text{ м})$; $Z (-0,003 \pm 0,010 \text{ м})$. В силу того, что точность определения центра массы Земли (геоцентра) ограничена вышеприведенными значениями, а также того, что изменения положения пунктов на поверхности земли незначительно влияют на смещение центра массы, то компоненты сдвига центра системы ITRF-2014 относительно ГСК-2011 (T_x , T_y , T_z) в данном исследовании положим равными нулю, как и скорости их изменения.

В работах [25, 24, 76] при трансформации систем координат, масштабный коэффициент (D) обоснованно интерпретируется как сдвиг одной системы относительно другой по высоте над поверхностью эллипсоида. При условии, что обе системы имеют идентичный отсчетный эллипсоид, априорный сдвиг по высоте при трансформации координат из одной системы в другую равен нулю. В данном случае эллипсоиды систем ITRF-2014 и ГСК-2011 идентичны, поэтому в настоящем исследовании масштабный коэффициент при расчете компонентов движения следует игнорировать.

Таким образом, при выполнении пятого этапа реализации усовершенствованной методики для определения параметров связи систем ITRF-2014 и ГСК-2011 и скоростей их изменения, уравнение (1) необходимо разрешить только относительно углов разворота вокруг координатных осей R_x , R_y , R_z . Вычисленные углы разворота обусловят смещение систем относительно друг друга вследствие движения Евразийской тектонической плиты. Результатом представления полученных решений в единицах измерений в год будут скорости изменения компонентов движения системы ITRF-2014 относительно ГСК-2011 на начальную эпоху.

Однако часть расположенных на территории России пунктов, входящих в состав ФАГС и МГС, находятся не на Евразийской тектонической плите. Включение таких пунктов в совместную обработку с остальными сопровождалось существенным увеличением остаточных невязок на всех пунктах. Это связано с различиями в скоростях и направлениях движений тектонических плит, на которых находятся пункты. На рисунке 14 в топоцентрической системе координат приведены скорости и направления движения выбранных пунктов, рассчитанные методом PPP.

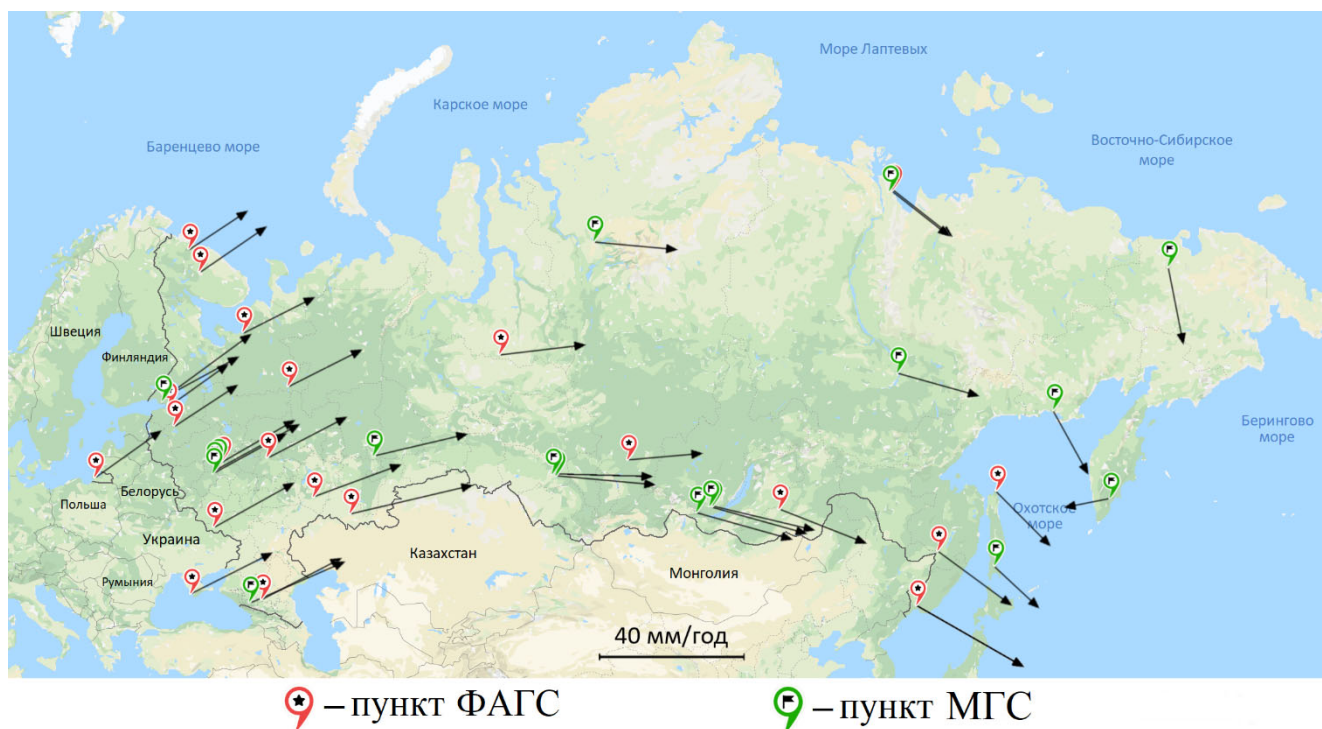


Рисунок 14 – Скорости и направления движения пунктов ФАГС и МГС

При реализации шестого этапа усовершенствованной методики необходимо определить и оценить остаточные невязки на пунктах, участвующих в вычислении параметров связи систем. Остаточные невязки характеризуют объективный контроль качества результатов высокоточного позиционирования точки на начальную и текущую эпохи. Повышенная остаточная невязка на каком-либо пункте в сравнении с остальными может быть следствием двух причин. Первая связана с тем, что на данном пункте результаты позиционирования получены с большей погрешностью, чем на других пунктах. Вторая – с тем, что скорость и направление движения данного пункта значительно отличаются от общего движения, вычисленного по большинству пунктов.

Принцип отбраковки пунктов, вносящих погрешность в определение компонентов движения ITRF-2014 относительно ГСК-2011, по причине нахождения на другой тектонической плите или из-за низкой точности вычисленных координат заключался в следующем. Остаточная невязка на пункте по любой из координат не должна превышать среднеквадратическое отклонение (1σ), рассчитанное по всем пунктам по соответствующей координате. Таких пунктов выявлено 9. В их число входят все пункты, находящиеся не на Евразийской тектонической плите (в таблице 13 они помечены символом «*»), и пункты PULJ и OREN. Вероятно, качество полученной навигационно-измерительной информации с этих двух пунктов, было ниже, чем с других. Все 9 пунктов исключены из списка пунктов, используемых для определения компонентов движения ITRF-2014 относительно ГСК-2011. В таблице 14 приведены остаточные невязки на пунктах, ГНСС-измерения которых были использованы для вычисления компоненты движения.

После отбраковки пунктов, вносящих погрешности в определение движения ITRF-2014 относительно ГСК-2011, средняя остаточная 3D-невязка по всем пунктам составляет 0,006 м, что позволяет судить о вычисленных параметрах связи систем координат с погрешностью не ниже, чем погрешность высокоточного позиционирования по методу PPP.

Таблица 14 – Остаточные невязки на пунктах, участвующих в вычислении компонентов движения ITRF-2014 относительно ГСК-2011

№ п/п	Пункт	X, м	Z, м	Y, м	3D, м
1	CNG1	0,0008	0,0009	0,0023	0,0026
2	CHIT	0,0037	-0,0042	0,0016	0,0058
3	NOYA	0,0011	-0,0051	0,0025	0,0058
4	SAMR	0,0020	-0,0013	-0,0010	0,0026
5	ARKH	-0,0010	0,0006	0,0000	0,0012
6	MURM	-0,0055	-0,0035	0,0002	0,0065
7	KOTL	-0,0002	0,0002	0,0022	0,0022
8	SEV1	0,0069	0,0074	0,0031	0,0106
9	BELG	0,0062	0,0047	0,0029	0,0083
10	SPB2	-0,0029	0,0004	0,0030	0,0042
11	KAGP	-0,0049	-0,0117	0,0006	0,0127
12	KLN1	0,0018	0,0057	-0,0006	0,0060
13	IRKO	0,0086	0,0024	0,0081	0,0121
14	PTGK	0,0024	0,0001	0,0041	0,0048
15	NOVG	-0,0003	0,0057	0,0031	0,0065
16	NNOV	0,0028	0,0007	0,0039	0,0049
17	MOBJ	-0,0008	0,0014	0,0019	0,0025
18	TIXG	-0,0007	-0,0065	0,0006	0,0066
19	LOVJ	-0,0031	-0,0110	-0,0035	0,0120
20	MDVJ	0,0026	-0,0016	-0,0030	0,0043
21	IRKJ	0,0039	-0,0016	0,0030	0,0052
22	NVSK	0,0052	-0,0018	0,0000	0,0055
23	BADG	0,0074	-0,0023	0,0010	0,0078
24	SVTL	-0,0015	-0,0040	-0,0061	0,0074
25	ZECK	0,0046	-0,0035	-0,0044	0,0073
26	YAKT	0,0004	-0,0014	0,0028	0,0032
27	TIXI	-0,0003	-0,0024	0,0043	0,0049
28	ARTU	0,0036	-0,0013	-0,0015	0,0041
29	NRIL	0,0002	-0,0041	0,0012	0,0043
30	NOVM	0,0034	0,0113	0,0103	0,0157
Максимальная невязка (по модулю)		0,0086	0,0103	0,0117	0,0156
Средняя невязка (по модулю)		0,0030	0,0028	0,0036	0,0062

Так как движение ITRF-2014 относительно ГСК-2011 по большей части характеризуется движением Евразийской тектонической плиты, то полученные результаты целесообразно сравнить с компонентами движения, определенными для моделей движений тектонических плит. Для сравнения выбраны две популярные модели движения тектонических плит NUVEL 1A и ITRF2008. Их компоненты

движения приведены в работах [97, 103] соответственно. Обе модели 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 позволяет представить движение земной поверхности относительно приблизительного центра Земли.

В работе [82] вычислены компоненты движения сети ДГС НСО относительно глобальной отсчетной основы ITRF-2014. Данная сеть также является локальной реализацией глобальной системы отсчета, так как установленное оборудование непрерывно принимает радиосигналы спутников ГНСС, координаты которых заданы в глобальной системе отсчета, а координаты пунктов уравниваются в той же системе. Сеть ДГС НСО расположена на сравнительно малом участке земной поверхности, но в зоне развернутой сети пунктов ФАГС, поэтому компоненты движения должны соответствовать компонентам движения, рассчитанным для сети федерального масштаба (если данный район не подвержен аномальной сейсмической активности). В работе [82] рассчитано движение локальной реализации глобальной отсчетной основы пунктами сети ДГС НСО относительно ITRF-2014 по шести компонентам (три компонента смещения центра одной системы относительно другой и три компонента вращения вокруг координатных осей, с игнорированием масштабного коэффициента). Для корректного сравнения с вычисленными компонентами движения ITRF-2014 относительно ГСК-2011, шестикомпонентное движение пересчитано в трехкомпонентное.

Полученные компоненты движения локальных реализаций глобальной системы отсчета и модели движения тектонической плиты, с которой жестко связаны пункты региональных сетей обобщены и приведены в таблице 15:

– вычисленная в ходе диссертационного исследования и в работе [81] скорость движения ITRF-2014 относительно ГСК-2011 по трем компонентам вращения вокруг координатных осей на эпоху 2011,0;

– вычисленная в ходе диссертационного исследования и в работе [82] скорость движения ITRF-2014 относительно локальной реализации глобальной си-

стемы отсчета пунктами сети ДГС НСО по трем компонентам вращения вокруг координатных осей на эпоху 2010,5;

– скорости движения Евразийской тектонической плиты, определенные для общемировых моделей движения земной поверхности NUVEL 1A и ITRF2008.

Таблица 15 – 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

Как видно из таблицы 15, компоненты движения вокруг оси X , приведенные в модели NUVEL-1A, несколько отличаются от результатов, рассчитанных другими способами. Вероятно, это связано с тем, что компоненты движения модели NUVEL-1A были определены в 1994 г. с использованием менее точных методов и средств измерений. Различия в компонентах движения, определенных другими способами, не представляются критическими. В проекции на земной эллипсоид скорости, рассчитанные как квадратный корень из суммы квадратов значений скоростей вращения вокруг координатных осей, варьируются от 0,027 до 0,029 м в год.

Вычисленные параметры связи и скорости их изменения с помощью усовершенствованной методики обуславливают движение системы ГСК-2011 относительно ITRF-2014 вследствие движения Евразийской тектонической плиты (или наоборот, если изменить знак компонентов движения на противоположный). Предложенный и реализованный подход к определению взаимосвязи глобальной системы отсчета (используемой для координатного обеспечения спутников ГНСС) с ее локальной реализацией пунктами сетей ДГС (используемой для обеспечения инженерно-технических работ на территории России) позволяет коррект-

но, с высоким уровнем точности согласовывать результаты высокоточного позиционирования, получаемые на различные эпохи ГНСС-измерений различными методами (методом PPP и методом относительного позиционирования). Практическая часть исследования предложенного подхода изложена в 3.4.

3.3 Проверка опубликованных скоростей движения пунктов фундаментальной астрономо-геодезической сети России

Во время подготовки диссертационной работы на официальном сайте ЦГКиИПД [86] были опубликованы скорости изменения координат рабочих центров пунктов ФАГС в системе координат ГСК-2011 на эпоху 1 января 2011 г. Из 53 пунктов скорости опубликованы только для 34, из которых 5 в настоящий момент не функционируют. Причиной отсутствия опубликованных скоростей движения для остальных пунктов, вероятно, является недостаточное количество полученной навигационно-измерительной информации, так как они введены в эксплуатацию после 2018 г.

Опубликованные координаты рабочих центров некоторых пунктов ФАГС и скорости их изменения в системе координат ГСК-2011 могут быть использованы в качестве независимого контроля определения геоцентрических радиусов-векторов на начальную и текущую эпохи измерений при реализации первого и второго этапов усовершенствованной методики. Для этого необходимо сопоставить скорости движения пунктов ФАГС, доступные на официальном сайте ЦГКиИПД, со скоростями, полученными другими способами: способом определения скоростей из разностей координатных решений, полученных методом PPP на начальную и текущую эпохи; с помощью моделирования скоростей движения тектонических плит с использованием моделей ITRF2008, NUVEL 1A. Результаты сопоставления скоростей движения и азимута направления движения представлены в таблице 16, в которой результаты, опубликованные на сайте ЦГКиИПД, обозначены «ГСК-2011»; результаты, полученные методом PPP, – «PPP»; результаты, полученные с помощью моделей движений, – «ITRF2008» и «NUVEL 1A».

Таблица 16 – Скорости движения и азимуты направлений движения пунктов ФАГС, полученные разными способами

№ п/п	Пункт	По оси X, мм/год				По оси Y, мм/год				По оси Z, мм/год				Модуль скорости, мм/год				Азимут, градусы			
		ГСК-2011	PPP	ITRF 2008	NUVEL 1A	ГСК-2011	PPP	ITRF 2008	NUVEL 1A	ГСК-2011	PPP	ITRF 2008	NUVEL 1A	ГСК-2011	PPP	ITRF 2008	NUVEL 1A	ГСК-2011	PPP	ITRF 2008	NUVEL 1A
1	CNG1	-21	-20	-22	-19	13	10	13	14	7	6	6	5	25	23	26	25	64	60	64	70
2	CHIT	-26	-25	-26	-23	-3	-2	-4	0	-2	-4	-6	-7	26	26	27	24	107	111	109	119
3	NOYA	-24	-23	-25	-22	5	4	5	8	0	3	1	-1	24	24	26	24	87	83	86	95
4	SAMR	-24	-23	-24	-21	10	10	11	13	6	5	5	3	27	25	27	25	69	70	72	79
5	ARKH	-20	-20	-21	-19	11	9	10	12	7	4	5	3	23	22	24	23	65	63	64	71
6	MURM	-18	-17	-20	-18	12	9	10	12	9	6	4	3	24	20	23	22	60	57	57	65
7	KOTL	-22	-21	-23	-20	10	8	10	12	5	4	5	3	25	23	25	24	68	66	68	76
8	SEV1	-21	-22	-21	-19	13	12	16	16	6	5	9	7	26	26	28	26	63	61	64	69
9	BELG	-21	-23	-22	-19	13	11	14	15	7	5	7	5	26	26	27	25	63	61	64	70
10	SPB2	-20	-18	-20	-18	13	10	13	14	7	6	6	5	24	21	25	24	59	55	59	65
11	KAGP	-25	-22	-27	-24	2	2	1	5	-1	3	-2	-4	25	22	27	25	97	93	97	107
12	KLN1	-17	-18	-18	-16	15	13	15	16	9	6	8	7	25	23	25	24	55	54	55	60
13	IRKO	-26	-28	-27	-24	-1	-3	-2	2	-4	-6	-4	-6	26	29	27	25	105	103	104	113
14	PTGK	-24	-22	-23	-20	11	10	14	15	10	7	7	5	28	25	28	26	60	63	69	75
15	NOVG	-20	-19	-20	-18	12	10	13	14	8	4	7	5	25	22	25	24	58	57	60	66
16	NNOV	-22	-22	-23	-20	10	8	12	13	7	5	6	4	25	24	26	25	64	62	68	74
17	PULJ	-18	-12	-20	-18	13	21	13	14	9	35	6	5	24	43	25	24	59	54	59	65
18	OREN	-19	-33	-25	-22	10	11	11	12	6	0	5	2	22	35	27	25	74	77	75	82
19	MOBJ	-21	-19	-22	-19	13	10	13	14	7	6	7	5	26	23	26	25	63	61	64	70
20	TIXG	-20	-20	-20	-21	-2	0	0	-1	-4	-1	-4	-4	21	20	20	22	125	128	129	127
21	LOVJ	-14	-18	-20	-18	10	11	10	12	9	10	5	3	19	23	23	22	61	58	59	66
22	VLDV	-30	-27	-24	-21	-9	-14	-10	-6	-14	-16	-9	-11	35	34	28	25	124	120	118	127
23	KHAZ	-23	-21	-23	-21	-7	-8	-9	-5	-8	-12	-9	-10	26	25	27	24	123	126	120	130
24	AST3	-22	–	-24	-21	13	–	13	14	7	–	6	4	26	–	28	26	72	–	71	78
25	EKTG	-24	–	-25	-22	9	–	9	11	5	–	3	1	26	–	27	25	76	–	78	85
26	MAG1	-22	–	-18	-19	-2	–	0	-1	-5	–	-9	-10	22	–	20	22	146	–	155	152
27	NSK1	-26	–	-27	-24	4	–	4	7	1	–	0	-3	26	–	27	25	90	–	91	100
28	RSTS	-22	–	-22	-20	12	–	14	15	9	–	7	5	27	–	28	26	61	–	67	72
29	SEMH	-18	–	-19	-20	-10	–	0	-1	-7	–	-9	-9	22	–	20	22	128	–	155	152

Из анализа таблицы 16 можно сделать вывод, что результаты скоростей и направлений движений пунктов ФАГС, полученные разными независимыми способами, соответствуют друг другу на уровне первых миллиметров, за исключением пунктов PULJ, OREN, VLDV, SEMH, на которых выявлены различия в скоростях движения, превышающие 1 см/год. На пункте SEMH выявлено различие значений азимута направления движения, полученных с помощью моделей движения тектонических плит, и значений, полученных по опубликованным скоростям движения на сайте ЦГКиИПД. Оно достигает 28 градусов. Таким образом, при использовании ГНСС-измерений или опубликованных скоростей движений пунктов PULJ, OREN, VLDV, SEMH необходимо иметь в виду, что качество опубликованных решений для этих пунктов может не соответствовать качеству решений других пунктов ФАГС.

3.4 Эксперимент по применению вычисленных параметров связи и скоростей их изменения на практике

Развернутая сеть пунктов МГС и международная земная система отсчета ITRS задают некоторую «уровенную поверхность», относительно которой стало возможным вести работы по созданию и развитию национальных координатных основ в любом месте Земли. Достижение и сохранение в долгосрочной перспективе уровня точности, сопоставимого с точностью системы отсчета ITRS, возможно только при развертывании сети опорных пунктов по всему земному шару. Национальные и региональные координатные основы должны быть ориентированы на глобальную общемировую систему отсчета для обеспечения высокой точности проведения работ с использованием опорных пунктов ДГС и технологий ГНСС.

При разработке ГСК-2011 такая ориентировка имела место [26, 32] (в уравнении сети опорных пунктов на эпоху 2011,0 участвовал 31 пункт МГС). Однако малое количество пунктов на территории России, а также отсутствие четких

разъяснений в нормативно-технической документации о степени влияния геодинамических процессов на стабильность опорной геодезической основы России не позволяют осуществить корректную взаимосвязь российской координатной основы с общемировой в долгосрочной перспективе.

Вычисленные кинематические параметры связи позволяют компенсировать возникающие расхождения и призваны адекватно представлять движение систем относительно друг друга, в том числе в тех местах, где до ближайшего опорного пункта расстояние около 1 000 км.

Для проверки этого утверждения выполнен эксперимент, заключающийся в сравнении координат пунктов ДГС, находящихся на удалении от пунктов ФАГС и МГС от нескольких километров до более 1 000, вычисленных следующими методами. Первый метод – это стандартный метод PPP, реализуемый вышеупомянутыми онлайн-сервисами высокоточного позиционирования CSRS-PPP и TrimbleRTX. В этом случае результаты позиционирования представлены в системе ITRF-2014. Второй метод – метод относительного позиционирования от ближайших пунктов ФАГС. В работах [47, 91] описана методика определения координат пунктов в системе ГСК-2011, которая заключается в вычислении векторов сверхдлинных базовых линий от пунктов ФАГС до определяемых. В этом случае результаты высокоточного позиционирования будут представлены в системе ГСК-2011.

Для проведения текущего эксперимента выбраны ГНСС-измерения 122 пунктов сети ДГС Федерального бюро технической инвентаризации, полученные с портала спутниковых систем точного позиционирования [7]; ГНСС измерения 7 пунктов сети ДГС Республики Крым, полученные с того же портала; ГНСС измерения 30 пунктов сети ДГС НСО, предоставленные в научных целях Государственным бюджетным учреждением «Центр навигационных и геоинформационных технологий Новосибирской области» [33]. Все ГНСС-измерения опорных и определяемых пунктов, а также точные эфемериды спутников получены на промежутке с 20 по 25 февраля 2020 г. (средняя эпоха 2020,14), дискретно-

стью 30 с. В приложении А представлен фрагмент карты с обозначенными на ней определяемыми пунктами, участвующими в эксперименте, и пунктами ФАГС.

Для обработки ГНСС-измерений методом относительного позиционирования использовано программное обеспечение Trimble Business Centre v. 4.0. Координаты определяемых пунктов вычислены посредством 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 геодезического построения с опорой на пункты ФАГС. Например, координаты пунктов сети ДГС НСО рассчитаны от ближайших к ним пунктов ФАГС: NSK1, OMSR, KAGP, KIZ1. Максимальная СКП результатов координатных определений по всем 159 пунктам составила: по координатам X, Y, Z – 0,009, 0,008, 0,017 м, при осредненной СКП по всем пунктам по координатам X, Y, Z – 0,004, 0,004, 0,007 м соответственно. Для результатов, полученных методом PPP, максимальная СКП составила: по координатам X, Y, Z – 0,015, 0,015, 0,021 м, при осредненной СКП по всем пунктам по координатам X, Y, Z – 0,005, 0,005, 0,007 м соответственно. Приведенная оценка точности произведена программным обеспечением, используемым при обработке измерений.

Следующим шагом является редуцирование полученных результатов координатных определений методом относительного позиционирования на текущую эпоху с применением вычисленных кинематических компонентов движения ITRF-2014 относительно ГСК-2011 (см. таблицу 15) по уточненной формуле (1), в которую добавлены скорости изменения параметров связи:

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_x + \dot{T}_x(t - t_0) \\ T_y + \dot{T}_y(t - t_0) \\ T_z + \dot{T}_z(t - t_0) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 + D + \dot{D}(t - t_0) & R_z + \dot{R}_z(t - t_0) & -R_y - \dot{R}_y(t - t_0) \\ -R_z - \dot{R}_z(t - t_0) & 1 + D + \dot{D}(t - t_0) & R_x + \dot{R}_x(t - t_0) \\ R_y + \dot{R}_y(t - t_0) & -R_x - \dot{R}_x(t - t_0) & 1 + D + \dot{D}(t - t_0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}. \quad (42)$$

Таким образом, разность вычисленных координат различными методами значительно сокращается, при том, что разность начальной и текущей эпох составляет более чем 9 лет.

В приложении Б по всем 159 пунктам приведены разности решений, полученных методом PPP и методом относительного позиционирования без внесения поправки (синий цвет) за движение систем относительно друг друга; а также разности, полученные методом PPP и методом относительного позиционирования с внесением поправки (красный цвет), рассчитанной в первой части работы. Под разностями решений понимается разность квадратных корней из суммы квадратов значений координат X, Y, Z (3D-вектор).

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 высокоточного 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 поправки за движение систем относительно друг друга обеспечивает согласованность результатов высокоточного позиционирования, выполняемого разными методами, в разных системах координат и на различные эпохи измерений, на большей части территории страны с точностью, соответствующей современной точности высокоточного спутникового позиционирования.

Кинематические параметры связи ITRF-2014 и ГСК-2011, вычисленные по трем компонентам (вращение вокруг каждой координатной оси), позволяют установить скорость движения ITRF-2014 относительно ГСК-2011. Ключевая проблема, заключающаяся в согласовании результатов высокоточного позиционирования, выполняемого разными методами, в разных системах координат и на различные эпохи проведения ГНСС-измерений, может быть решена с использованием

вычисленных, зависящих от времени параметров связи. Как видно в приложении Б, применение полученных параметров и скоростей их изменения позволяет утверждать, что степень соответствия результатов высокоточного позиционирования, выполненного разными методами, значительно возрастает.

3.5 Анализ результатов эксперимента

Проведенный эксперимент доказал состоятельность описанного подхода по реализации вычисленных зависящих от времени параметров связи систем ITRF-2014 и ГСК-2011 в качестве инструмента, обеспечивающего согласованность результатов высокоточного позиционирования, выполняемого разными методами на разные эпохи проведенных ГНСС-измерений. Полученные кинематические параметры позволяют улучшить согласованность результатов более чем в 12 раз (с 0,242 до 0,019 м). Следовательно, можно утверждать, что результаты высокоточного позиционирования методом PPP и методом относительного позиционирования соответствуют друг другу на уровне точности не ниже точности современного высокоточного спутникового позиционирования. Максимально достижимый уровень точности определения координат методом PPP на сегодняшний день соответствует 0,010–0,030 м. Максимально достижимый уровень точности определения координат методом относительного позиционирования зависит от дальности до опорного пункта и также соответствует 0,010–0,030 м. Точность координатных преобразований, которую можно оценить, проанализировав остаточные невязки (см. таблицу 14), не уступает точности спутникового позиционирования. Исходя из этого средняя разность, полученная по 159 пунктам, равная 0,019 м, говорит о том, что проведенный эксперимент можно считать удачным.

Практическая сторона предложенного подхода заключается в следующем. Усовершенствованная методика, описанная и апробированная в диссертационной работе и в работах [81, 82], создает условия для практического использования на территории отдельных регионов России передового метода точного точечного позиционирования PPP, обеспечивая совместимость его результатов с результатами

относительно метода высокоточного спутникового позиционирования. В дальнейшем полученные компоненты движения системы ГСК-2011 относительно ITRF-2014 могут быть использованы для определения координат точки на Евразийской тектонической плите в системе ГСК-2011 методом PPP. Для перспектив дальнейшего развития в данном направлении требуется разработка национальной модели движения земной поверхности на территории всей страны и ближнего зарубежья, что связано со значительным уплотнением государственной сети опорных пунктов ДГС.

Практическая сторона предложенного подхода актуальна в свете недостаточной обоснованности развития системы ГСК-2011 как кинематической государственной отсчетной основы. Такая модель имеет больше недостатков, чем преимуществ, учитывая параллельное, но закрытое развитие системы ПЗ-90. ПЗ-90 является основой геодезического обеспечения системы ГЛОНАСС, а также основным инструментом в определении геодезических параметров Земли [15]. В координаты пунктов, реализующих систему ПЗ-90, входит поправка за геодинамические процессы, для повышения точности контроля орбитальной группировки спутников ГЛОНАСС, поэтому данную систему можно считать кинематической. Однако применение ПЗ-90 в основном осуществляется в военных целях, а пункты расположены на закрытых территориях военных частей, что делает невозможным получение доступа к измерительной информации и координатам станций. Поэтому для научно-исследовательской деятельности физическая реализация системы ПЗ-90 широкому кругу пользователей недоступна.

Также необходимо отметить сравнительно короткий временной промежуток доступных ГНСС измерений с пунктов сети ФАГС и их малое количество. В исследовании приняты в обработку измерения пунктов ФАГС с разностью начальной и текущей эпох около двух лет, в то время как для пунктов сети МГС такая разность составила более девяти лет. Это связано с тем, что данные ГНСС-измерений с пунктов ФАГС появились в открытом доступе недавно, и технология их предоставления в настоящий момент обрабатывается. Однако предпринятые

шаги в данном направлении уже позволяют делать некоторые выводы. Необходимо продолжать развитие в этой области, включая развертывание новых пунктов ДГС с постоянно действующим оборудованием, и, главное, организацию доставки бесперебойного потока информации от них широкому кругу пользователей, а также сохранение этой информации на сервере в долгосрочной перспективе. Это позволит перейти на качественно новый уровень развития КВНО в России, так как ценность опорных пунктов ДГС заключается в их истории.

3.6 Выводы по третьему разделу

В ходе апробации усовершенствованной методики на примере пунктов ФАГС вычислены параметры связи и скорости изменения параметров связи глобальной системы отсчета ITRF-2014 с ее региональной реализацией пунктами региональной сети ФАГС – государственной системой координат ГСК-2011. Рассчитанные скорости движения ITRF-2014 относительно ГСК-2011 отражают вращательно-поступательное движение Евразийской тектонической плиты относительно центра масс Земли. Для подтверждения этого утверждения проведено сопоставление полученных скоростей изменения параметров связи систем с компонентами движения точек земной поверхности, установленными для общемировых моделей движения тектонических плит. Сопоставление проведено с наиболее популярными моделями NUVEL 1A и ITRF2008. Модуль разности полученных результатов с результатами, полученными по модели ITRF2008, составил 0,000010, 0,000016, 0,000066 с/год вокруг координатных осей X , Y , Z соответственно, что эквивалентно 0,000, 0,000, 0,002 м/год по осям X , Y , Z на поверхности земного эллипсоида соответственно. Модуль разности полученных результатов и результатов, полученных по модели NUVEL 1A, составил 0,000129, 0,000024, 0,000034 с/год вокруг координатных осей, что эквивалентно 0,004, 0,000, 0,001 м/год по координатным осям на поверхности земного эллипсоида. Причины высоких расхождений с результатами, полученными по модели NUVEL 1A, можно объяснить тем, что компоненты движения, определенные для этой модели, бы-

ли получены в 1994 г., в условиях недостаточного количества используемых для проведения вычислений опорных пунктов на территории Евразийской тектонической плиты.

Практическое применение вычисленных кинематических параметров связи заключается в возможности компенсации расхождений, которые возникают при спутниковых геодезических измерениях, выполняемых различными методами. В ходе диссертационного исследования установлено, что результаты высокоточного позиционирования методом PPP расходятся с результатами позиционирования, выполненными относительным методом от пунктов региональных сетей или от пунктов ФАГС. Расхождения в результатах могут достигать 30 см. С помощью вычисленных параметров связи и скоростей их изменения становится возможным обеспечение согласования результатов, полученных разными методами. На примере 159 пунктов проведен эксперимент по определению соответствия результатов позиционирования, выполненного разными методами. В результате эксперимента установлено, что с применением вычисленных скоростей изменения параметров связи глобальной координатной основы ITRF-2014 и ее локальной реализации (ГСК-2011) соответствие результатов позиционирования, выполненного относительным методом от пунктов ФАГС и методом PPP, выросло в среднем более чем в 12 раз.

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 корректно 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 ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Аврунев, Е. И. Геодезическое обеспечение государственного кадастра недвижимости [Текст] : монография / Е. И. Аврунев. – Новосибирск : СГГА, 2010. – 143 с.
- 2 Аврунев, Е. И. Проблемы координатного обеспечения кадастровой деятельности и пути их решения [Текст] / Е. И. Аврунев, А. Э. Труханов // Интерэкс-по ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 2. – С. 29–33.
- 3 Анализ состояния государственной геодезической сети России с учетом существующих и перспективных требований [Текст] / Е. М. Мазурова, К. М. Антонович, Е. К. Лагутина, Л. А. Липатников // Вестник СГГА. – 2014. – Вып. 3 (27). – С. 84–89.
- 4 Андреев, В. К. Роль и место в исследованиях по геодезическому обеспечению системы ГЛОНАСС в рамках НИР «Развитие» государственных единых систем координат ГСК-2011 и ПЗ-90, высокоточного определения координат и гравитационного поля Земли [Текст] / В. К. Андреев // Доклад на заседании секции № 3 НТС ФГУП ЦНИИмаш по вопросу «Общий замысел геодезических направлений исследований в рамках НИР «Развитие» от 28 мая 2013 года. – М. : ЦНИИГАиК, 2013. – 14 с.
- 5 Антонович, К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: монография. В 2 т. Т. 1 [Текст] / К. М. Антонович. – М. : Картогеоцентр, 2005. – 334 с.
- 6 Антонович, К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: монография. В 2 т. Т. 2 [Текст] / К. М. Антонович. – М. : Картогеоцентр, 2006. – 360 с.

7 АО Ростехинвентаризация – «Федеральное бюро технической инвентаризации» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: гнсс.рф.

8 Архитектура перспективной системы координатно-временного и навигационного обеспечения России [Текст] / Ю. М. Урличич, А. М. Финкельштейн, С. Г. Ревнивых, Н. А. Тестоедов, А. Ю. Данилюк, С. И. Донченко, Е. И. Долгов, Н. Л. Макаренко, В. Г. Пешехонов, П. А. Красовский, С. А. Белов, В. В. Бутенко // Труды ИПА РАН. – 2009. – № 20. – С. 20–33.

9 Афонин, К. Ф. Государственная система координат ГСК-2011 и региональные системы координат Гаусса – Крюгера [Текст] / К. Ф. Афонин // Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения. – 2018. – Т. 1. – С. 177–180.

10 Барлиани, А. Г. Разработка алгоритмов уравнивания и оценки точности свободных и несвободных геодезических сетей на основе псевдонормального решения [Текст] : монография / А. Г. Барлиани. – Новосибирск : СГГА, 2010. – 135 с.

11 Безменов, В. М. Элементы кватернионов в фотограмметрии [Текст] / В. М. Безменов // Изв. вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2009. – № 4. – С. 48–56.

12 Бовшин, Н. А. Высокоточные координатные GNSS-определения в системе ГСК-2011 [Текст] / Н. А. Бовшин // Геодезия и картография. – 2019. – Т. 80. – № 2. – С. 2–14. doi: 10.22389/0016-71262019-944-2-2-14.

13 Бовшин, Н. А. Оптимизация условий применения системы ГСК-2011 в Дальневосточном регионе [Текст] / Н. А. Бовшин // Геодезия и картография. – 2019. – Т. 80. – № 9. – С. 2–9. doi: 10.22389/0016-7126-2019-951-9-2-9.

14 Бойко, Е. В. Вращение и деформации блоков земной коры по данным космической геодезии (Байкальский рифт и Дальний Восток) [Текст] : автореф. дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук / Е. В. Бойко. – Новосибирск : ФГБУН «Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук» (ИНГГ СО РАН), 2012. – 16 с.

15 Вдовин, В. С. Общий замысел геодезических направлений исследований в рамках НИР «Развитие». Исследование проблемных вопросов геодезического обеспечения системы ГЛОНАСС. Исследование проблемных вопросов навигационно-геодезического обеспечения объектов ракетно-космической техники [Текст] / В. С. Вдовин // Доклад на заседании секции №3 НТС ФГУП ЦНИИмаш по вопросу «Общий замысел геодезических направлений исследований в рамках НИР «Развитие» от 28 мая 2013 года. – М. : ЦНИИГАиК, 2013. – 20 с.

16 Виноградов, А. В. Оценка точности метода Precise Point Positioning и возможности его применения при кадастровых работах [Текст] / А. В. Виноградов, А. В. Войтенко, А. Ю. Жигулин // Геопрофи. – 2010. – № 2. – С. 27–30.

17 Войтенко, А. В. Оценка точности способа вычисления координат геодезического пункта на заданную эпоху с учетом движения Евразийской литосферной плиты [Текст] / А. В. Войтенко // Геодезия и картография. – 2014. – № 2. – С. 2–7.

18 Войтенко, А. В. Прогнозирование изменения пространственного положения геодезических пунктов, вызванного глобальными геотектоническими процессами [Текст] / А. В. Войтенко // Геодезия и картография. – 2013. – № 10. – С. 8–12.

19 Войтенко, А. В. Сравнение способов вычисления пространственного положения геодезических пунктов с учетом движения литосферных плит [Текст] / А. В. Войтенко // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 1. – С. 23–28.

20 Гандин, Л. С. Объективный анализ метеорологических полей [Текст] / Л. С. Гандин. – Ленинград : Гидрометеорологическое изд-во, 1963.

21 Генике, А. А. Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии [Текст] / А. А. Генике, Г. Г. Побединский. – М. : Картгеоцентр, 2004. – 355 с.

22 Герасимов, А. П. Местные системы координат [Текст] / А. П. Герасимов, В. Г. Назаров. – М. : Проспект, 2010. – 64 с.

23 Герасимов, А. П. Проблемы спутниковых дифференциальных геодезических станций [Текст] / А. П. Герасимов // Геопрофи. – 2012. – № 3. – С. 52–53.

24 Гиенко, Е. Г. О корреляции масштаба и сдвига по высоте при согласовании локальных геодезических сетей [Текст] / Е. Г. Гиенко, Ю. В. Сурнин // Современные проблемы геодезии и оптики: сб. материалов LIII международной науч.-технической конф., посвященной 70-летию СГГА. 11 – 21 марта 2003 г. Ч. III / СГГА. – Новосибирск, 2003. – С. 246–248.

25 Гиенко, Е. Г. Об интерпретации масштабного параметра при согласовании локальных спутниковых геодезических сетей с государственной координатной основой [Текст] / Гиенко Е. Г., Сурнин Ю. В. // ГЕО-Сибирь-2009. V Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.). – Новосибирск : СГГА, 2009. Т. 1, ч. 2. – С. 321–324.

26 Горобец, В. П. Опыт Российской Федерации по установлению государственной системы координат 2011 года [Текст] / Горобец В. П., Ефимов Г. Н., Столяров И. А. // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 2 (30). – С. 24–37.

27 ГОСТ 32453–2017. Глобальная навигационная спутниковая система. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document>.

28 ГОСТ Р 55024–2012. Национальный стандарт Российской Федерации сети геодезические. Классификация. Общие технические требования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document>.

29 ГОСТ Р 57372–2016. Глобальная навигационная спутниковая система. Методы и технологии выполнения геодезических работ. Пункты высокоточной геодезической сети (ВГС). Технические условия [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

30 ГОСТ Р 57373–2016. Глобальная навигационная спутниковая система. Методы и технологии выполнения геодезических работ. Пункты спутниковой геодезической сети 1 класса (СГС-1). Технические условия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document>.

31 ГОСТ Р 57374–2016. Глобальная навигационная спутниковая система. Методы и технологии выполнения геодезических работ. Пункты фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС). Технические условия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document>.

32 Государственная геоцентрическая система координат Российской Федерации [Текст] / В. П. Горобец, Г. В. Демьянов, Г. Г. Побединский, Л. И. Яблонский // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Пленарное заседание : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 2. – С. 76–94.

33 Государственное бюджетное учреждение «Центр навигационных и геоинформационных технологий Новосибирской области» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rtk.nso.ru/spiderweb/frmIndex.aspx>.

34 Демьянов, Г. В. Вопросы построения государственной геоцентрической системы координат Российской Федерации [Текст] / Г. В. Демьянов, А. Н. Майоров, Г. Г. Побединский // Геодезия и картография. – 2011. – № 11. – С. 17–25.

35 Демьянов, Г. В. Проблемы непрерывного совершенствования ГГС и геоцентрической системы координат России [Текст] / Г. В. Демьянов, А. Н. Майоров, Г. Г. Побединский // Геопрофи. – 2011. – № 4.

36 Закатов, П. С. Курс высшей геодезии [Текст] / П. С. Закатов. – М. : Недра, 1976. – 512 с.

37 ИАЦ – информационно-аналитический центр. КВНО ФГУП ЦНИИМАШ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.glonass-iac.ru/GLONASS/specifyRINEX.php>.

38 Каленицкий, А. И. О развитии многоуровневых построений на геодинатическом полигоне при освоении недр Кузбасса [Текст] / А. И. Каленицкий, А. Н. Соловицкий // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 2. – С. 45–55.

39 Карпик, А. П. Методологические и технологические основы геоинформационного обеспечения территорий [Текст] : монография / А. П. Карпик. – Новосибирск: СГГА, 2004. – 260 с.

40 Карпик, А. П. О направлении развития опорной геодезической сети России как элемента единой системы координатно-временного и навигационного обеспечения [Текст] / А. П. Карпик, Л. А. Липатников, Е. К. Лагутина // Гироскопия и навигация. – 2016. – Т. 24, № 2 (93). – С. 87–94. doi: 10.1134/S207510871603007X.

41 Карпик, А. П. Управление территорией в геоинформационном дискурсе [Текст] : монография / А. П. Карпик, А. Г. Осипов, П. П. Мурзинцев. – Новосибирск : СГГА, 2010. – 280 с.

42 Кафтан, В. И. Временной анализ геопространственных данных: кинематические модели [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук / В. И. Кафтан. – М. : МГУПС, 2003. – 285 с.

43 Комаровский, Ю. А. Использование различных референц-эллипсоидов в судовождении : Учебное пособие [Текст] / Ю. А. Комаровский. – Владивосток : ДВГМА им. адм. Г. И. Невельского, 1999. – 170 с.

44 Координатно-временное и навигационное обеспечение: правовой аспект [Текст] / А. И. Болкунов, Е. И. Игнатович, В. Н. Климов, А. И. Сердюков // Вестник ГЛОНАСС. – 2013. – № 2(12). – С. 86–97.

45 Куприянов, А. О. Преобразования координат при проектировании протяженных объектов [Текст] / А. О. Куприянов // Перспективы науки и образования. – 2016. – № 1. – С. 53–57.

46 Курошев, Г. Д. Методы трансформации геодезических и пространственных прямоугольных координат, их алгоритмы, параметры, точность [Текст] / Г. Д. Курошев, А. А. Харунжий. // Вестник СПбГУ. – 2012. – № 3 (7). – С. 79–90.

47 Лагутина, Е. К. Апробация методики включения сети постоянно действующих базовых станций Новосибирской области в государственную геодезическую сеть [Текст] / Е. К. Лагутина // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 3 (35). – С. 35–40.

48 Липатников, Л. А. Проверка опубликованных значений скоростей пунктов ФАГС в новой государственной системе координат ГСК-2011 [Текст] /

Л. А. Липатников // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 1. – С. 86–91.

49 Липатников, Л. А. Совершенствование методики точного дифференциального позиционирования с использованием глобальных навигационных спутниковых систем [Текст] : дис. ... канд. техн. наук: 25.00.32 / Липатников Леонид Алексеевич. – Новосибирск : СГГА, 2014. – 144 с.

50 Липатников, Л. А. Эксперимент по формированию геоцентрической земной координатной основы на территории России и ближнего зарубежья [Текст] / Л. А. Липатников // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 3 (35). – С. 16–24.

51 Мазуров, Б. Т. Обзор развития геодинамики и геодезических методов решения геодинамических задач [Текст] / Б. Т. Мазуров, В. И. Кафтан // Геодезия и картография. – 2020. – Т. 81. – № 2. – С. 25–39. doi: 10.22389/0016-7126-2020-956-2-25-39.

52 Методические вопросы построения глобальных и региональных геодезических сетей (начало) [Текст] / Р. З. Абдрахманов, Г. В. Демьянов, В. И. Кафтан, Г. Г. Побединский // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – 2013. – № 1(48). – С. 80–85.

53 Морозов, В. П. Курс сфероидической геодезии [Текст] / В. П. Морозов. – М. : Недра, 1979.

54 Непоклонов, В. Б. Методики определения составляющих уклонений отвесных линий и высот квазигеоида по гравиметрическим данным [Текст] / В. Б. Непоклонов // Гравиметрия и геодезия. – М. : Научный мир, 2010. – С. 455–464.

55 О геодезии, картографии и пространственных данных и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации [Электронный ресурс] : федер. закон от 30.12.2015 № 431-ФЗ. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

56 Об установлении государственных систем координат, государственной системы высот и государственной гравиметрической системы [Электронный ресурс] : Постановление Правительства РФ от 24.11.2016 № 1240. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

57 Об установлении структуры государственной геодезической сети и требований к созданию государственной геодезической сети, включая требования к геодезическим пунктам : приказ Минэкономразвития Российской Федерации от 29 марта 2017 года № 138 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document>.

58 Об утверждении геометрических и физических числовых геодезических параметров государственной геодезической системы координат 2011 года [Электронный ресурс] : приказ Росреестра от 23.03.2016 № П/0134. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document>.

59 Обиденко, В. И. Единое высокоточное гомогенное координатное пространство территорий и местные системы координат: пути гармонизации [Текст] / В. И. Обиденко // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 2. – С. 46–62.

60 Обиденко, В. И. Изменение метрических параметров объектов на территории Российской Федерации при переходе к ГСК-2011 [Текст] / В. И. Обиденко, Г. Г. Побединский // Геодезия и картография. – 2016. – № 10. – С. 12–21.

61 Обиденко, В. И. Методология геодезического обеспечения цифровой экономики Российской Федерации [Текст] / В. И. Обиденко // Геодезия и картография. – 2019. – Т. 80. – № 12. – С. 42–55. doi: 10.22389/0016-7126-2019-954-12-42-55.

62 Обиденко, В. И. Разработка методики получения нормальных высот на территории Новосибирской области с использованием глобальной модели геоида EGM2008 [Текст] / В. И. Обиденко, О. А. Оприцова, А. П. Решетов // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 14–25.

63 Определение координат пунктов сети базовых станций НСО в общеземной системе координат [Текст] / А. П. Карпик, А. П. Решетов, А. А. Струков, К. А. Карпик // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов

в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск : СГГА, 2011. Т. 1, ч. 1. – С. 3–10.

64 Побединский, Г. Г. Системы координат и нормативное регулирование создания и функционирования спутниковых сетей точного позиционирования [Текст] / Г. Г. Побединский // Геопрофи. – 2016. – № 6. – С. 4–12.

65 Попрыгин, В. А. ГСК-2011. Проблемы перехода [Текст] / В. А. Попрыгин, В. И. Третьяков // Геопрофи. – 2018. – № 1. – С. 8–12

66 Проблемы и перспективы развития активных спутниковых геодезических сетей в России и их интеграции в ITRF [Текст] / В. С. Вдовин, В. В. Дворкин, А. П. Карпик, Л. А. Липатников, С. Д. Сорокин, Г. М. Стеблов // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23. № 1. – С. 6–27.

67 Проект сети активных станций для Новосибирской области [Текст] / К. М. Антонович, А. П. Карпик, Ю. В. Сурнин и др. // ГЕО-Сибирь-2007. III Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 25–27 апреля 2007 г.). – Новосибирск : СГГА, 2007. Т. 1, ч. 1. – С. 68–74.

68 Радиоинтерферометрическая сеть «Квазар-КВО» – базовая система фундаментального координатно-временного обеспечения [Текст] / А. М. Финкельштейн, А. В. Ипатов, М. Н. Кайдановский, Н. Е. Кольцов, Э. И. Коркин, З. М. Малкин, И. А. Рахимов, А. И. Сальников, С. Г. Смоленцев // Труды ИПА РАН. – 2005. – Вып. 13. – С. 104–138.

69 Результаты построения государственной геоцентрической системы координат Российской Федерации в рамках Федеральной целевой программы «ГЛОНАСС» [Текст] / В. П. Горобец [и др.] // Журнал Геодезия и картография. – 2012. – № 2. – С. 53–57.

70 Российская система дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sdcm.ru>.

71 Совершенствование и практическая реализация динамического метода космической геодезии [Текст] : монография / Ю. В. Сурнин, В. А. Ащеулов, С. В. Кужелев [и др.]. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – 192 с.

72 Современное состояние и направления развития геодезического обеспечения РФ. Системы координат [Текст] / В. П. Горобец, Г. В. Демьянов, А. Н. Майоров, Г. Г. Побединский // Геопрофи. – 2013. – № 6. – С. 4–9.

73 Соловицкий, А. Н. Геодезический мониторинг напряженно-деформированного состояния земной коры в районах освоения угольных месторождений: геодезические построения [Текст] / А. Н. Соловицкий // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 1. – С. 81–89.

74 Соловицкий, А. Н. Теория высот при изучении геодинамики земной коры [Текст] / А. Н. Соловицкий // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 34–42.

75 Спутниковые методы измерений в геодезии. Часть 3 : учеб. пособие [Текст] / Е. Б. Ключин, И. Г. Гайрабеков, Е. Ю. Маркелова, В. В. Шлапак. – М. : Изд-во МИИГАиК, 2015. – 110 с.

76 Струков, А. А. Совершенствование методики определения положения пунктов локальных спутниковых геодезических сетей в общеземной и референцной системах координат [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.32. – Новосибирск : СГГА, 2013. – 174 с.

77 Сурнин, Ю. В. О корректном применении международной терминологии «Reference System» и «Reference Frame» к понятиям «система координат» и «координатная основа» в геодезической практике России [Текст] / Ю. В. Сурнин // Геодезия и картография. – 2015. – № 8. – С. 2–9. doi: 10.22389/0016-7126-2015-902-8-2-9.

78 Сурнин, Ю. В. О применении в геодезической практике России международной терминологии к понятиям «система координат» и «координатная основа» [Текст] / Ю. В. Сурнин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 3. – С. 28–36.

79 Теория плитной тектоники и результаты измерений на постоянной станции космической геодезии NVSK [Текст] / В. Ю. Тимофеев, Д. Г. Ардюков, А. В. Тимофеев, Е. В. Бойко // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 2. – С. 95–108.

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

81 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.

82 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.

83 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.

84 Терещенко, В. Е. Сравнение относительных смещений пунктов сети постоянно действующих базовых станций Новосибирской области, полученных с использованием различных онлайн-сервисов обработки спутниковых измерений [Текст] / В. Е. Терещенко, Е. К. Лагутина // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 2. – С. 76–94.

85 Урмаев, М. С. Применение алгебры кватернионов в фотограмметрии [Текст] / М. С. Урмаев // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1986. – № 2. – С. 81–90.

86 Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центр геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cgkipd.ru>.

87 Финкельштейн, А. М. Радиоинтерферометрическая сеть «КВАЗАР» – научные задачи, техника и будущее [Текст] / А. М. Финкельштейн, А. В. Ипатов, С. Г. Смоленцев // Земля и Вселенная. – 2004. – № 4. – С. 12–26.

88 Фундаментальное координатно-временное обеспечение системы ГЛОНАСС средствами РСДБ-сети «Квазар-КВО» [Текст] / А. М. Финкельштейн, А. В. Ипатов, Е. А. Скурихина, С. Г. Смоленцев, И. Ф. Суркис // Труды ИПА РАН. – 2007. – Вып. 17. – С. 3–23.

89 Шевчук, С. О. Перспективы использования свободного программного обеспечения для постобработки ГНСС-измерений [Текст] / С. О. Шевчук, К. И. Малютина, Л. А. Липатников // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 1. – С. 65–84.

90 Шендрик, Н. К. Исследование точности геодезической сети активных базовых станций Новосибирской области в государственной системе координат и высот [Текст] / Н. К. Шендрик // Геодезия и картография. – 2014. – № 1. – С. 2–7.

91 Шендрик, Н. К. Опыт определения положения пунктов сети ПДБС Новосибирской области в ГСК–2011 [Текст] / Н. К. Шендрик, П. К. Шитиков // Геопрофи. – 2018. – № 6. – С. 46–49.

92 Шестаков, Н. В. Движения и деформации земной коры Дальнего Востока Российской Федерации, вызванные землетрясением Тохоку 11.03.2011 г., и их влияние на результаты GNSS-наблюдений [Текст] / Н. В. Шестаков, М. Д. Герасименко, М. Охзоно // Геодезия и картография. – 2011. – № 8. – С. 35–43.

93 Щербаков, М. И. Прямой способ определения кватерниона поворота системы координат снимка [Текст] / М. И. Щербаков // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1994. – № 4-5. – С. 116–128.

94 Эволюция системы государственного геодезического обеспечения территории России [Текст] : монография / Е. М. Мазурова, А. П. Карпик, И. Г. Ганагина, Е. Г. Гиенко. – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – 184 с.

95 Accuracy Investigation of PPP Method Versus Relative Positioning Using Different Satellite Ephemerides Products Near/Under Forest Environment [Text] /

T. Ocalan, B. Erdogan, N. Tunalioglu, U. Durdag // Earth Sci. Res. J. – Oct. 2016. – Vol. 20, no. 4. – P. 1.

96 Altamimi, Z. ITRF2000: a new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications [Text] / Z. Altamimi, P. Sillard, C. Boucher // Geophys. Res., 107 (B10) (2002). – P. 1–19. doi: 10.1029/2001JB000561.

97 Altamimi, Z. ITRF2008 plate motion model [Text] / Z. Altamimi, L. Métivier, X. Collilieux // Journal of Geophysical Research. – 2012. – Vol. 117. doi: 10.1029/2011JB008930.

98 AUSPOS – Online GPS Processing Service [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/geodesy/auspos>.

99 Coordinate Conversions and Transformations Including Formulas. Guidance Note Number 7, part 2. European Petroleum Survey Group, October 2004 [Text]. – 85 p.

100 CSRS-PPP Precise Point Positioning / National Resources Canada – Earth Sciences [Electronic resource]. – Mode of access: <https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/toolsoutils/ppp.php>.

101 Gakstatter, E. A Comparison of Free GPS Online Post-Processing Services [Electronic resource] / E. Gakstatter // GPS World. – 2013. – Vol. 10. – Mode of access: <https://www.gpsworld.com/a-comparison-of-free-gps-online-post-processing-services/>.

102 Global geodesy using GPS without fiducial sites [Text] / M. Heflin, W. Bertiger, G. Blewitt, A. Freedman, K. Hurst, S. Lichten, U. Lindqwister, Y. Vigue, F. Webb, T. Yunck, J. Zumberge // Geophys. Res. Lett. – 1992. – 19(2). – P. 131–134.

103 IERS Technical Note 21. IERS Conventions [Text] / D. D. McCarthy (ed.) – Paris: Central Bureau of IERS. – Observatoire de Paris. – July 1996. – 95 p.

104 International GNSS Service [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.igs.org/>.

105 ITRF – International Terrestrial Reference Frame [Electronic resource]. – Mode of access: <http://itrf.ensg.ign.fr/>.

106 ITRF2014 plate motion model [Text] / Z. Altamimi, L. Métivier, P. Rebischung, H. Rouby, X. Collilieux // *Geophysical Journal International*. – 2017. – Volume 209. – Issue 3. – P. 1906–1912. doi: [org/10.1093/gji/ggx136](https://doi.org/10.1093/gji/ggx136).

107 ITRF2014: a new release of the international terrestrial reference frame modeling nonlinear station motions [Text] / Z. Altamimi, P. Rebischung, L. Métivier, X. Collilieux // *J Geophys Res Solid Earth*. – 121(8). – 2016. P. 6109–6131. doi: [org/10.1002/2016JB013098](https://doi.org/10.1002/2016JB013098).

108 Kandil I. A. Mahmoud El-Mewafiand Ahmed Awaad. Analysis of GNSS Accuracy of Relative Positioning and Precise Positioning Based on Online Service [Text] / Islam A. Kandil // *International Journal of Scientific Engineering and Research*. – 2017. – Vol. 5 (12). – P. 94–103.

109 Kandil, A. K. Analysis of GNSS Accuracy of Relative Positioning and Precise Positioning Based on Online Service [Text] / A. K. Kandil, M. El-Mewafiand, A. Awaad // *International Journal of Scientific Engineering and Research*. – 2017. – 5 (12). – P. 94–103.

110 King, M. Ongoing deformation of Antarctica following recent Great Earthquakes [Text] / M. King, A. Santamaria-Gomez // *Geophys. Res. Lett*. – 2016. – 43. doi: [10.1002/2016GL067773](https://doi.org/10.1002/2016GL067773).

111 Kouba, J. Precise point positioning using IGS orbit and clock products [Text] / J. Kouba, P. Héroux // *GPS Solut*. – 2001. – Vol. 5, no. 2. – P. 12–28.

112 Lipatnikov, L. A. Preliminary Study on 3D Reference Frames for the Russian Federation [Text] / L. A. Lipatnikov // *Reference Frame in Practise Seminar and BELS+Training*. (Hanoi, Viet Nam, 19–20 April 2019 g.). doi: [10.13140/RG.2.2.12189.56806](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12189.56806).

113 Lipatnikov, L. Cost Effective Precise Positioning with GNSS [Text] / L. Lipatnikov, S. Shevchuk // *Chair FIG Commission 5*. – 2015–2018. – 86 p.

114 Magic GNSS – GNSS online service [Electronic resource]. – Mode of access: <https://magicgnss.gmv.com/ppp>.

115 Mueller, F. Geodynamics [Text] / F. Mueller // Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems / P. J. G. Teunissen, O. Montenbruck (Eds.) // Cham, Switzerland : Springer International Publishing AG. – P. 1063–1106.

116 National Geodetic Survey [Electronic resource]. – Mode of access: <https://geodesy.noaa.gov/>.

117 OPUS: the Online Positioning User Service [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.ngs.noaa.gov/OPUS/>.

118 Rong, Y. Earthquake potential and magnitude limits inferred from a geodetic strain-rate model for southern Europe [Text] / Y. Rong, P. Bird, D. D. Jackson // Geophysical Journal International. – 1 April 2016. – Volume 205, Issue 1. – P. 509–522. doi: [org/10.1093/gji/ggw018](https://doi.org/10.1093/gji/ggw018).

119 Site Guidelines – IGS [Electronic resource]. – Mode of access: <https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/202011433>.

120 Smith, D. NOAA Technical Report NOS NGS 62, Blueprint for 2022, 1 [Electronic resource] / D. Smith, D. Roman, S. Hilla // Geometric Coordinates 2017-04-21. – Mode of access: <https://geodesy.noaa.gov/library> (дата обращения: 18.07.2019).

121 SOPAC SCOUT – Scripps Coordinate Update Tool [Electronic resource]. – Mode of access: <http://sopac-csrc.ucsd.edu/>.

122 The angular velocities of the plates and the velocity of Earth's centre from space geodesy [Text] / Donald F. Argus, Richard G. Gordon, Michael B. Heflin, Chopo Ma, Richard J. Eanes, Pascal Willis, W. Richard Peltier, Susan E. Owen // Geophysical Journal International. – 2010. – Volume 180, Issue 3. – P. 913–960.

123 The International Terrestrial Reference Frame: lessons from ITRF2014 [Text] / Z. Altamimi, P. Rebischung, L. Métivier et al. // Rend. Fis. Acc. Lincei. – 2018. – 29. – P. 23–28. doi: [org/10.1007/s12210-017-0660-9](https://doi.org/10.1007/s12210-017-0660-9).

124 The terrestrial reference frame and the dynamic Earth, Eos Trans [Text] / Z. Altamimi et al. // AGU. – 2001. – Vol 82, № 25. – P. 273–279. doi: [org/10.1029/EO082i025p00273-01](https://doi.org/10.1029/EO082i025p00273-01).

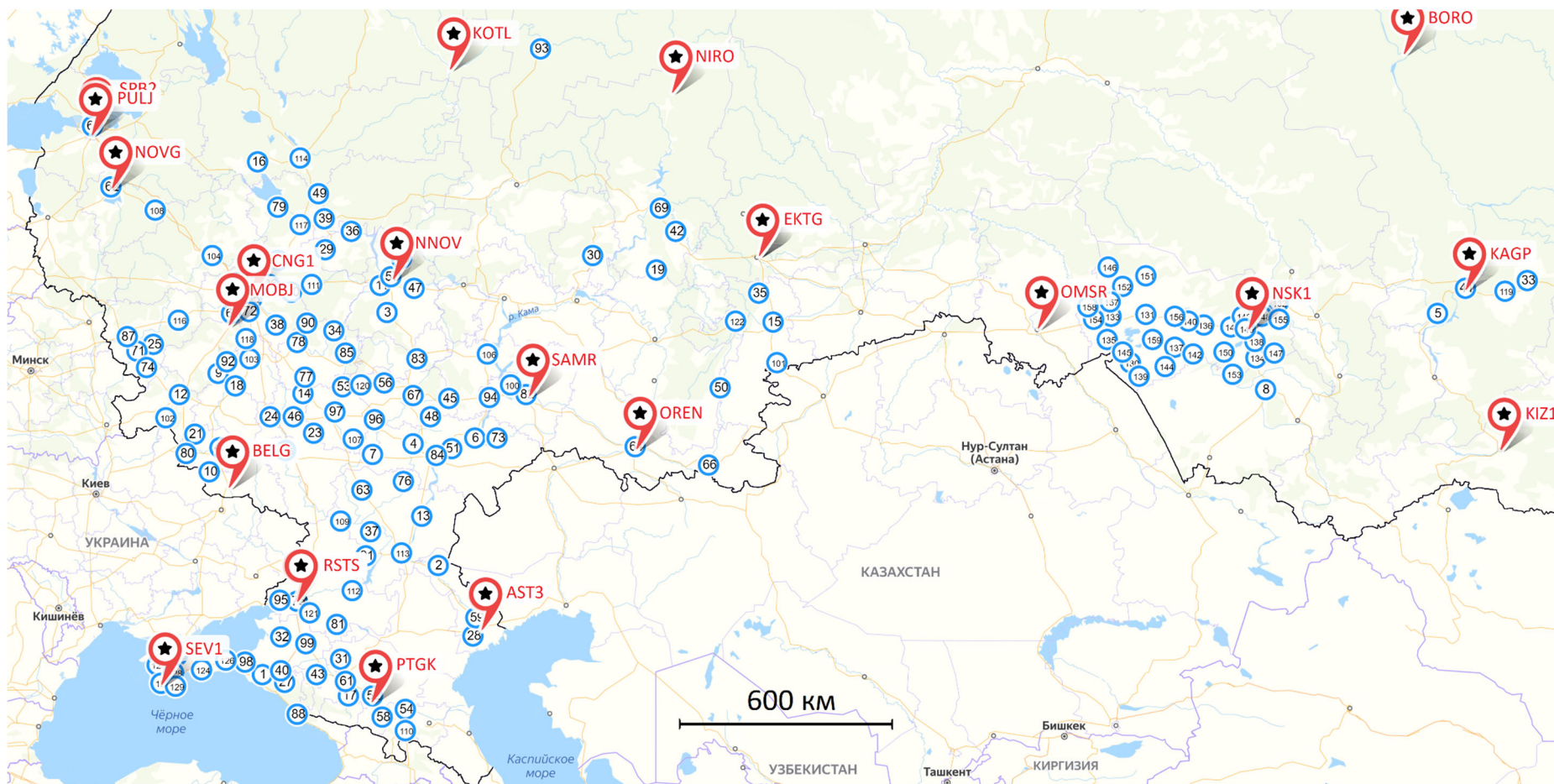
125 Trimble RTX – Trimble center point RTX post-processing service [Electronic resource]. – Mode of access: <https://trimblertx.com/Home.aspx>.

126 UNAVCO Plate Motion Calculator [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.unavco.org/software/geodetic-utilities/plate-motion-calculator/platemotion-calculator.html>.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

ФРАГМЕНТ КАРТЫ С ОПОРНЫМИ ПУНКТАМИ ФАГС И ОПРЕДЕЛЯЕМЫМИ ПУНКТАМИ



★ - пункт ФАГС

○ - определяемый пункт

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

РАЗНОСТИ КООРДИНАТ С ВНЕСЕНИЕМ И БЕЗ ВНЕСЕНИЯ ПОПРАВКИ
ЗА ДВИЖЕНИЕ СИСТЕМ ОТНОСИТЕЛЬНО ДРУГ ДРУГА

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

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

