

УДК 528.236

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-3-89-106

ГЛОБАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОТСЧЕТА И ЕЕ ЛОКАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ – ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА КООРДИНАТ 2011 ГОДА

Вячеслав Евгеньевич Терещенко

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, аспирант, тел. (953)766-70-14, e-mail: taboretzvigyn@mail.ru

Андрей Васильевич Радченко

Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, 634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4, e-mail: andrehradchenko8@gmail.com

Вячеслав Анатольевич Мелкий

Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 16, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканопасности, тел. (984)139-70-77, e-mail: vamelkiy@mail.ru

В статье освещается вопрос интерпретации сетей спутниковых дифференциальных геодезических станций как локальной реализации глобальной системы отсчета. Приведено обоснование предложенного подхода и показаны его преимущества. В частности, высшее звено в структуре формирования российской государственной координатной основы (системы координат 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), 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 почти никогда не подразумевается. В этой связи асинхронность движения российской государственной системы координат ГСК-2011 с международной земной системой отсчета ITRS стала приводить к рассогласованности 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. В статье приводятся скорости изменения параметров связи вышеупомянутых систем, при помощи которых становится возможным согласование результатов высокоточного позиционирования, выполняемого в различных системах, различными методами на различную эпоху. Эксперимент, проведенный во второй части статьи, это подтверждает.

Ключевые слова: высокоточное позиционирование, глобальные навигационные спутниковые системы, ГСК-2011, ГНСС-измерения, дифференциальная геодезическая станция, метод PPP, параметры связи систем координат, система координат, система отсчета.

Введение

В современной мировой геодезической практике глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) стали незаменимым инструментом как для высокоточного определения положения точки в пространстве, так и при формировании системы координатно-временного и навигационного обеспечения (КВНО). Современные методические и технологические решения способствуют повышению точности и эффективности применения спутниковых систем для формирования еди-

ной системы КВНО в мировом и национальных масштабах. Для этого расширяются и уплотняются сети дифференциальных геодезических станций (ДГС), являющиеся практической реализацией заданной системы.

Координатная основа и система КВНО Российской Федерации также развивается с применением технологий ГНСС. Расширение и уплотнение сети пунктов, реализующих российскую систему ГСК-2011, ведется с некоторым отставанием от передовых стран – лидеров в сфере формирования общемировой координатно-временной

основы. Однако развитие российской государственной координатной основы ускоряется. За 2019 г., количество пунктов фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС), реализующих систему ГСК-2011, с установленным постоянно действующим оборудованием выросло с 45 до 53, включая развертывание новых пунктов за пределами границ России.

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 [1–3] посвящены описанию построения ГСК-2011. Работы [4–6] посвящены проблемам использования этой координатной основы в геодезической практике.

Ключевая проблема заключается в корректном согласовании национальной системы координат ГСК-2011 с международной (глобальной) системой отсчета (International Terrestrial Reference System – ITRS) в долгосрочной перспективе. Основным фактором, вносящим несоответствие в результаты высокоточного позиционирования, является различие в учете глобальных и региональных геодинамических процессов. Современные требования к точности определения координат (а также нормальных высот и значений силы тяжести) обуславливают необходимость учета временного фактора, поскольку координаты, нормальные высоты и значения ускорения силы тяжести связаны с перманентным влиянием глобальных и региональных геодинамических процессов.

Изучение и учет геодинамических процессов стали 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) обеспечит возможность достижения высокого уровня точности при проведении работ в системах, отличных от систем полета спутников ГНСС на территориях значительной протяженности, и повысит эффективность применения технологий ГНСС при использовании различных методов позиционирования.

Текущее состояние

Международная земная система отсчета ITRS – это совокупность договоренностей и основополагающих принципов построения общеземной геоцентрической системы координат, принятых Международным Астрономическим Союзом в 1991 г., касающихся определения начала центра системы, ориентации осей, инерциальности, фундаментальных геодезических постоянных, параметров общеземного эллипсоида, параметров гравитационного поля и прочих параметров. Начало отсчета находится в центре масс Земли. Ориентация координатных осей в теле Земли определяется из наблюдений Международной службы вращения Земли (International Earth Rotation and Reference Systems Service – IERS) и Международной ассоциацией геодезии (МАГ) (International Association of Geodesy – IAG), являющейся одной из семи ассоциаций Международного геодезического и геофизического союза (МГГС) (International Union of Geodesy and Geophysics – IUGG). В настоящее время Российская Федерация является действительным членом МГГС и МАГ [3].

Реализация ITRS – это Международная земная отсчетная основа (International Terrestrial Reference Frame – ITRF). Это совокупность опорных пунктов, на которых основана система ITRS, расположенных по всей территории земного шара, включающая пункты Международной ГНСС службы (МГС) (International GNSS Service – IGS). На январь 2020 г., по данным [7], количество пунктов МГС в мире достигает 509, на территории России – 22, из них уникальных – 18.

Движения пунктов ITRF вследствие геодинамических процессов определены с точностью до 10^{-4} м/год и приведены на сайте ITRF [8]. Для того 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. Тектоническая активность не влияет

на смещение или разворот координатных осей системы 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, локальные/местные), являются статическими системами координат, так как собственные движения опорных пунктов в данном случае не предусмотрены. Это связано с тем, что постоянное изменение координат пунктов негативно сказывается на эффективности выполнения геодезических работ и значительно затрудняет их проведение. Кинематическими системами называют системы отсчета, в которых предусмотрена временная эволюция пунктов, практически реализующих их. К ним относятся глобальные системы отсчета. Глобальными называют такие системы, в которых осуществляется определение координат находящихся на орбите спутников, а сеть пунктов развернута на территории значительной части земного шара и уравнена совместно.

Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 ноября 2016 г. № 1240 [9] в качестве единой государственной системы координат для использования при осуществлении геодезических и картографических работ установлена геодезическая система координат ГСК-2011. Так как эта система предназначена для прикладного геодезического и картографического производства, координаты пунктов, реализующих данную систему, не должны быть зависимыми от времени, т. е. система ГСК-2011 должна быть статической. Предложения по переходу на кинематическую версию системы ГСК-2011 по аналогии с системой ITRF не в полной мере состоятельны, поскольку:

– во-первых, система ITRF не предназначена для ведения в ней прикладных геодезических работ и для этого не используется, а ГСК-2011, согласно нормативно-технической документации [9, 10], предназначена именно для этого;

– во-вторых, пункты системы ITRF расположены по всему земному шару, а пункты

ГСК-2011 максимум на 10 % его поверхности, что не позволяет судить о глобальных тектонических процессах общемирового масштаба, необходимых для соблюдения принципа минимизации остаточных скоростей движения всех пунктов сети;

– в-третьих, средняя годовая скорость движения пунктов на Евразийской тектонической плите различна, и в разных районах она варьируется от 1 до 5 см/год, что при ведении высокоточных геодезических работ требует введения поправок, вычисление которых связано с разработкой национальной модели скоростей движения пунктов земной поверхности (ее разработка на сегодняшнем этапе развития не возможна по следующей причине);

– в-четвертых, низкая плотность опорных пунктов с постоянно действующим обсервированием 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 система ГСК-2011, созданная для ведения геодезических и картографических работ, реализованная набором пунктов ФАГС, ВГС, СГС, де-факто является локальной реализацией глобальной системы отсчета. По ГНСС-измерениям постоянно действующих пунктов ФАГС определены их собственные движения в глобальной отсчетной основе ITRF [11] и в системе координат ГСК-2011 [12]. На эпоху 2011,0 статические параметры связи этих систем приведены в приказе Росреестра от 23 марта 2016 г. № П/0134 «Об утверждении геометрических и физических числовых геодезических параметров государственной геодезической системы координат 2011 года» [13]. Таким образом, установлена взаимосвязь систем ГСК-2011 и ITRF. Однако движение этих систем друг относительно друга происходит несинхронно, о чем эксперты неоднократно упоминали в публикациях [14–16], что ведет к систематическому увеличению погрешностей при трансформации координат. Рост погрешности соответствует среднегодовой скорости движения тектонических плит и внутриплитовых блоков, на которых расположены пункты ФАГС.

В этой связи не замечать нарастания погрешностей в результатах высокоточного позиционирования уже нельзя. Это 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 координатных определений, вычисленные по методу точного точечного позиционирования (Precise Point Positioning – PPP), не соответствуют результатам, полученным с применением наиболее распространенного метода относительного позиционирования от пунктов региональных сетей ДГС. В работе [17] приведены разницы координат, вычисленные данными методами на территории Новосибирской области.

Для разрешения проблем оптимальным вариантом может стать не введение зависимости от времени для координат опорных пунктов, а определение взаимосвязи локальной реализации глобальной системы отсчета (ГСК-2011) с самой глобальной системой отсчета (ITRS). Связь кинематической и статической систем координат можно установить только с применением параметров трансформации, зависящих от времени.

Статья [17] посвящена разработке методики установления такой связи. В ней по предложенной методике определена взаимосвязь глобальной системы отсчета с ее локальной реализацией пунктами сети ДГС, расположенной на территории Новосибирской области (ДГС НСО). Поскольку территория России располагается на четырех тектонических плитах и некотором количестве внутриплитовых блоков, скорости и направления движения которых могут отличаться [18], то для определения строгой взаимосвязи с глобальной системой отсчета такая связь должна быть дифференцирована для каждого региона России и сопоставлена с общефедеральными результатами взаимосвязи ГСК-2011 с глобальной системой отсчета [19].

Поэтому первая цель данной работы заключается в вычислении кинематических параметров связи системы ГСК-2011 с глобальной отсчетной основой ITRF на эпоху t_0 .

Это обусловит движение этих систем относительно друг друга, но актуальными полученными данными будут оставаться только для измерений, выполненных на Евразийской тектонической плите. Вторая цель работы заключается в освещении практической стороны предложенного подхода. Рассмотрение системы ГСК-2011 как локальной (региональной) реализации глобальной системы отсчета не исключает возможности ведения в ней любых видов прикладной геодезической или картографической деятельности. Предложенный подход, напротив, создает условия корректного согласования результатов высокоточного позиционирования, выполненного в глобальной (кинематической) системе отсчета, с результатами, полученными с применением спутниковых геодезических сетей, являющихся локальной (статической) реализацией глобальной системы отсчета, в которых временная эволюция координат пунктов не предусмотрена.

Вычисление кинематических параметров связи системы ГСК-2011 с глобальной отсчетной основой ITRF

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 было проведено с использованием пунктов МГС для обеспечения согласованности с координатной основой ITRF. На сайте ЦГКИПД [12] 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 – 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, пункты 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. Их расположение приведено на рис. 1.



Рис. 1. Пункты ФАГС и МГС, расположенные на территории России

Для расчета компонентов движения системы ITRF относительно ГСК-2011 были приняты в обработку ГНСС-измерения 22 пунктов ФАГС и 17 пунктов МГС. 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, близкие 2011,0 и 2020,0.

В табл. 1 представлен список и сведения о пунктах, ГНСС-измерения которых приняты в обработку. Обработка всех ГНСС-измерений проводилась с использованием метода PPP с помощью онлайн-сервисов высокоточного позиционирования CSRS-PPP и TrimbleRTX. Их эффективность подтверждена в работах [20–22]. Движение пунктов обуславливается разностью координат, рассчитанных на начальную и текущую эпохи.

Все результаты усреднены на 5-суточном интервале. Точность полученных результа-

тов характеризуется среднеквадратической погрешностью (СКП) на уровне не более 1,3 см в системе ITRF-2014. Оценка точности результатов приведена в отчете об обработке ГНСС-измерений и соответствует оценке точности по «внутренней» сходимости.

Связь систем координат устанавливается с помощью формулы:

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D & -R_z & R_y \\ R_z & D & -R_x \\ -R_y & R_x & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix},$$

где R_x, R_y, R_z – параметры разворота координатных осей первой системы относительно второй; $(\overline{T_x, T_y, T_z})^T$ – вектор смещения центра первой системы относительно второй; D – масштабный коэффициент; $(\overline{X_1, Y_1, Z_1})^T$ – вектор положения пункта в первой системе

координат; $(X_2, Y_2, Z_2)^T$ – вектор положения пункта во второй системе координат.

Уровень точности, отсчетный эллипсоид, геоцентричность и принципы ориентации в теле Земли систем ITRF-2014 и ГСК-2011

в соответствии с [13] 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.

Таблица 1

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

№	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	KLNI	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	Вел. Новгород	2017,315	2020,002	2,14
19	NNOV	Росреестр	Ниж. 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
28	YSSK*	МГС	Юж.-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-Кам.*	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

Параметры связи этих систем на эпоху 2011,0 приведены в Приказе Росреестра от 23.03.2016 № П/0134 [13], 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, вектор сдвига центра системы ITRF-2014 относительно ГСК-2011 $(\overline{T_x, T_y, T_z})^T$ в данном исследовании положим равными нулю, как и скорости их изменения.

В работах [23, 24] 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, для определения параметров связи систем ITRF-2014 и ГСК-2011 уравнение 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, находится 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 рис. 2 в топоцентрической системе координат приведены скорости и направления движения выбранных пунктов, рассчитанные методом PPP. 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.



Рис. 2. Скорости и направления движения пунктов ФАГС и МГС

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 табл. 1 они помечены символом «*». Эти пункты находятся не на Евразийской тектонической плите, за исключением PULJ и OREN. Все 9 пунктов исключены из списка

пунктов, используемых для определения компонентов движения ITRF-2014 относительно ГСК-2011. На рис. 3 приведена гистограмма, на которой по вертикальной шкале отложены значения остаточных невязок на пунктах, по которым вычислены компоненты движения, в метрах. 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.

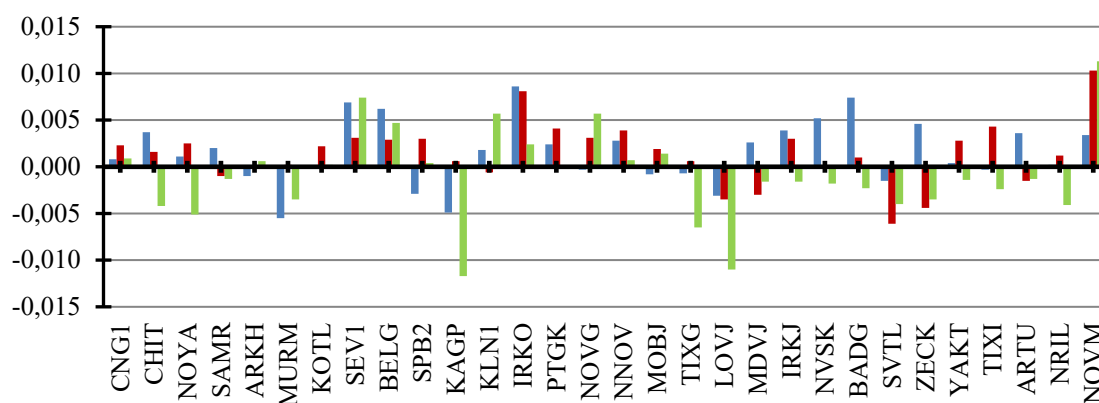


Рис. 3. Остаточные невязки на пунктах, участвующих в вычислении компонентов движения ITRF-2014 относительно ГСК-2011:

■ – по оси X; ■ – по оси Y; ■ – по оси Z

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 популярные модели движения тектонических плит NUVEL-1A и ITRF2008. Их компоненты движения приведены в работах [25, 26] 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 [17] вычислены компоненты движения сети ДГС НСО относительно глобаль-

ной отсчетной основы ITRF-2014. Данная сеть также является локальной реализацией глобальной системы отчета, 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 [17] рассчитано движение локальной реализации глобальной отсчетной основы пунктами сети ДГС НСО относительно ITRF-2014 по 6 компонентам (3 компоненты смещения центра одной системы относитель-

но другой и 3 компоненты вращения вокруг координатных осей, с игнорированием масштабного коэффициента). Для корректного сравнения с вычисленными компонентами движения ITRF-2014 относительно ГСК-2011 6-компонентное движение пересчитано в 3-компонентное. В табл. 2 приведены:

– вычисленная в данной работе скорость движения ITRF-2014 относительно ГСК-2011 по 3 компонентам вращения вокруг координатных осей на эпоху 2011,0;

– вычисленная в работе [17] скорость движения ITRF-2014 относительно локальной реализации глобальной системы отсчета пунктами сети ДГС НСО по 3 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 2

Компоненты движения ФАГС и ДГС НСО по отношению к ITRF-2014 и скорости движения Евразийской тектонической плиты

Относительное движение и движение по моделям	Разворот по оси X (сек/год)	Разворот по оси Y (сек/год)	Разворот по оси Z (сек/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 табл. 2, компоненты движения вокруг оси X, приведенные в модели NUVEL-1A, несколько отличаются от результатов, рассчитанных другими способами, и модели ITRF2008. 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 поверхность земного эллипсоида скорости, рассчитанные, как квадратный корень из суммы квадратов значений скоростей вращения вокруг координатных осей, варьируются от 27 до 29 мм в год.

Вычисленные параметры связи по методике, предложенной в работе [17], 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 обеспечения полетов спутников ГНСС) с ее локальной реализацией пунктами сетей ДГС (используемой для обеспечения инженерно-технических ра-

бот на территории России) позволяет корректно, 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 далее.

Практическая сторона вопроса интерпретации сетей ДГС как практической реализации глобальной системы отсчета

Развернутая сеть пунктов МГС и международная земная система отсчета ITRS задают некоторую «уровненную 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 про-

ведения работ с использованием опорных пунктов ДГС и технологий ГНСС.

При разработке ГСК-2011 такая ориентировка имела место [27] (в уравнивании 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 геодинимических процессов на стабильность опорной геодезической основы России не позволяют осуществить корректную взаимосвязь российской координатной основы с общемировой.

Вычисленные выше кинематические параметры связи позволяют компенсировать возникающие расхождения и призваны адекватно представлять движение систем относительно друг друга, включая такие места, где до ближайшего опорного пункта расстояние порядка 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 до 1 000 км и более, вычисленных следующими методами. Первый метод – это классический метод PPP, реализуемый уже упомянутыми онлайн-сервисами высокоточного позиционирования CSRS-PPP и TrimbleRTX. В этом случае результаты позиционирования представлены в

системе ITRF-2014. Второй метод – это метод относительного позиционирования от ближайших пунктов ФАГС. В работах [28] описана методика определения координат пунктов в системе ГСК-2011, которая заключается в вычислении векторов сверхдлинных базовых линий от пунктов ФАГС до определяемых. Она реализована на примере сети пунктов ДГС НСО. В этом случае результаты высокоточного позиционирования 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 [30]; 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» [17]. 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), дискретностью 30 с. На рис. 4 представлен фрагмент карты с обозначенными на ней определяемыми пунктами, участвующими в эксперименте, и пунктами ФАГС.



Рис. 4. Фрагмент карты с опорными и определяемыми пунктами

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, KAGR, KIZ1. Максимальная СКП результатов координатных определений по всем 159 пунктам составила: по координатам X, Y, Z – 0,009, 0,008, 0,017 м соответственно, 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 соответственно, 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, и соответствует оценке точности по «внутренней» сходимости.

На следующем этапе полученные результаты координатных определений методом относительного позиционирования редуцированы на текущую эпоху с применением вычисленных компонентов движения ITRF-2014 относительно ГСК-2011 (см. табл. 2).

Таким образом, разность вычисленных координат различными методами значительно сокращается, при том, что разность начальной и текущей эпох составляет более чем 9 лет. На рис. 5 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 понятием «разности

решений» понимается разность квадратных корней из суммы квадратов значений координат X, Y, Z (3D-вектор). Значения, отложенные по горизонтальной шкале, представлены в метрах.

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 измерений может быть решена с использованием вычисленных, зависящих от времени параметров связи.

Как видно на рис. 5, применяя полученные параметры, можно существенно сократить разность координатных определений и утверждать, что степень соответствия результатов высокоточного позиционирования, выполненного разными методами, значительно возросла. Это подтверждают следующие результаты.

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 поправок 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.

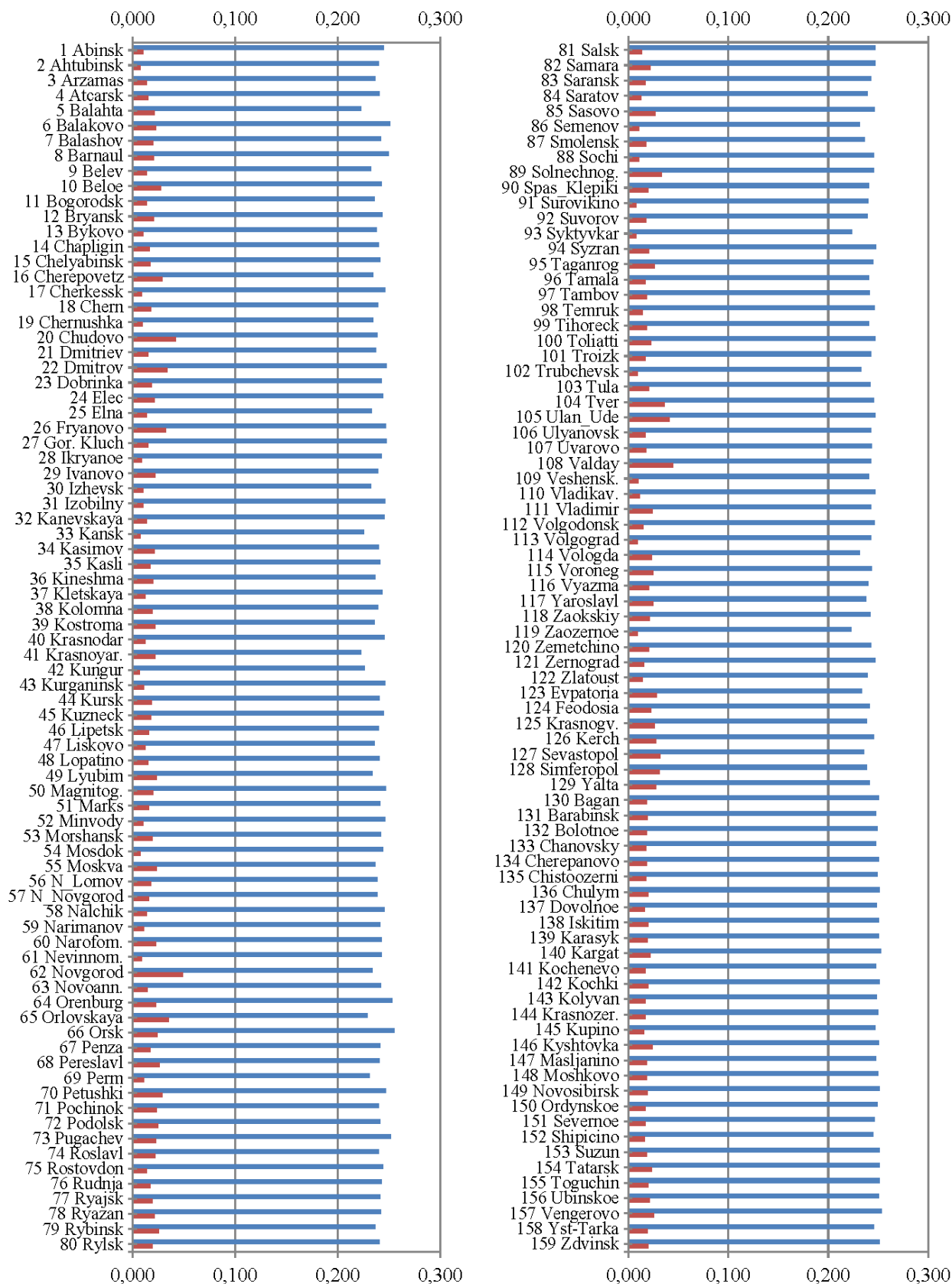


Рис. 5. Разности координат с внесением поправки и без внесения поправки за движение систем относительно друг друга и без

- – разности координат без внесения поправки за движение систем относительно друг друга;
- – разности координат с внесением поправки за движение систем относительно друг друга

Заключение

Проведенный в данной статье 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 примерно 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 график остаточных невязок (см. рис. 3), не уступает точности позиционирования. Исходя из этого средняя разность, полученная по определяемым 159 пунктам, равная 0,019 м, говорит о том, что проведенный эксперимент можно считать удачным.

Что касается практической стороны предложенного подхода, то она заключается в следующем. Методика, предложенная в работе [17] и апробированная в данной работе, создает условия для практического использования на территории отдельных регионов России передового метода высокоточного 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 отчетной 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 [32]. В координаты пунктов, реализующих систему ПЗ-90, входит поправка за геодинимические 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 территориях военных частей, что делает невозможным получение доступа к измерительной информации и координатам станций. Потому для научно-исследовательской деятельности физическая реализация системы ПЗ-90 широкому кругу пользователей недоступна.

Также в заключении 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 2 лет, в то время как для пунктов сети МГС такая разность составила более 9 лет. Это связано с тем, что данные ГНСС-измерений с пунктов ФАГС появились в открытом доступе недавно, и технология их предоставления в настоящий момент отрабатывается. Однако предпринятые шаги в данном направлении уже позволяют делать некоторые выво-

ды. 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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горобец В. П., Ефимов Г. Н., Столяров И. А. Опыт Российской Федерации по установлению государственной системы координат 2011 года // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 2 (30). – С. 24–37.
2. Современное состояние и направления развития геодезического обеспечения РФ. Системы координат / В. П. Горобец, Г. В. Демьянов, А. Н. Майоров, Г. Г. Побединский // Геопрофи. – 2013. – № 6. – С. 4–9.
3. Государственная геоцентрическая система координат Российской Федерации / 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.
4. Проблемы и перспективы развития активных спутниковых геодезических сетей в России и их интеграции в ITRF / 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.
5. Демьянов Г. В., Майоров А. Н., Побединский Г. Г. Проблемы непрерывного совершенствования ГГС и геоцентрической системы координат России // Геопрофи. – 2011. – № 4.
6. Попрыгин В. А., Третьяков В. И. ГСК-2011. Проблемы перехода // Геопрофи. – 2018. – № 1. – С. 8–12.
7. International GNSS Service [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.igs.org/>.
8. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions: ITRF2014 / Z. Altamimi, P. Rebischung, L. Métivier, X. Collilieux // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2016. DOI: 10.1002/2016JB013098.
9. Об установлении государственных систем координат, государственной системы высот и государственной гравиметрической системы [Электронный ресурс] : постановление Правительства РФ от 24 ноября 2016 года № 1240. – Доступ из справ.-правовой системы «Кодекс/Техэксперт».
10. ГОСТ 32453–2017. Глобальная навигационная спутниковая система. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек. Введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 сентября 2017 г. № 1055-ст. М. – Доступ из справ.-правовой системы «Кодекс/Техэксперт».
11. Липатников Л. А. Эксперимент по формированию геоцентрической земной координатной основы на территории России и ближнего зарубежья // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 3 (35). – С. 16–24.
12. Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центр геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cgkipd.ru>.
13. Об утверждении геометрических и физических числовых геодезических параметров государственной геодезической системы координат 2011 года : приказ Росреестра от 23.03.2016 № П/0134. – Доступ из справ.-правовой системы «Кодекс/Техэксперт».
14. Демьянов Г. В., Майоров А. Н., Побединский Г. Г. Вопросы построения государственной геоцентрической системы координат Российской Федерации // Геодезия и картография. – 2011. – № 11. – С. 17–25.
15. Липатников Л. А. Проверка опубликованных значений скоростей пунктов ФАГС в новой государственной системе координат ГСК-2011 // 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.
16. Бовшин Н. А. Высокоточные координатные GNSS-определения в системе ГСК-2011 // Геодезия и картография. – 2019. – Т. 80. – № 2. – С. 2–14. DOI: 10.22389/0016-71262019-944-2-2-14.
17. Карпик А. П., Терещенко В. Е. Методика связи глобальной системы отсчета с ее локальной реализацией пунктами сетей дифференци-

альных геодезических станций // Геодезия и картография. – 2020. – № 7. – С. 17–38.

18. Обиденко В. И. Методология геодезического обеспечения цифровой экономики Российской Федерации // Геодезия и картография. – 2019. – Т. 80. – № 12. – С. 42–55. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-954-12-42-55.

19. Бовшин Н. А. Оптимизация условий применения системы ГСК-2011 в Дальневосточном регионе // Геодезия и картография. – 2019. – Т. 80. – № 9. – С. 2–9. DOI: 10.22389/00167126-2019-951-9-2-9.

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

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

22. Islam A. Kandil, Mahmoud El-Mewafiand Ahmed Awaad. Analysis of GNSS Accuracy of Relative Positioning and Precise Positioning Based on Online Service. // International Journal of Scientific Engineering and Research. – 2017. – Vol. 5 (12). – С. 94–103.

23. Струков А. А. Совершенствование методики определения положения пунктов локальных спутниковых геодезических сетей в общеземной и референционной системах координат : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.32 / Струков Алексей Алексеевич ; Сибирская государственная геодезическая академия. – Новосибирск, 2013. – 174 с.

24. Гиенко Е. Г., Сурнин Ю. В. Об интерпретации масштабного параметра при согласовании локальных спутниковых геодезических сетей с государственной координатной основой // Интерэкспо Гео-Сибирь-2009. V Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20-24 апреля 2009 г.). – Новосибирск : СГГА, 2009. Т. 1. № 2. – С. 321–324.

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

26. Altamimi, Z., Métivier, L. & Collilieux, X. ITRF2008 plate motion model // Journal of Geophysical Research. – 2012. – Vol. 117. DOI: 10.1029/2011JB008930

27. 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 // 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.

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

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

30. АО Ростехинвентаризация – «Федеральное бюро технической инвентаризации» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: gnss.rp.

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

32. 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 // 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.

Получено 10.06.2020

© В. Е. Терещенко, А. В. Радченко, В. А. Мелкий, 2020

GLOBAL REFERENCE SYSTEM AND ITS LOCAL REALIZATION – RUSSIAN STATE COORDINATE SYSTEM GSK-2011

Vyacheslav E. Tereshchenko

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D. Student, phone: (953)766-70-14, e-mail: taboretzvigyn@mail.ru

Andrey V. Radchenko

Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2/4, Prospect Akademicheskii St., Tomsk, 634055, Russia, e-mail: andreyradchenko8@gmail.com

Vyacheslav A. Melkiy

Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 1b, Nauki St., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia, D. Sc., Leading Researcher, Laboratory of Volcanology and Volcano Hazard, phone: (984)139-70-77, e-mail: vamelkiy@mail.ru

The article highlights the issue of interpreting reference stations networks as a local realization of the global reference system. The substantiation of the proposed approach is given and its advantages are shown. The rationale for the proposed approach is given and its advantages are shown. In particular, the top block in the structure of the formation of the Russian state coordinate system (GSK-2011) is the fundamental astronomical and geodetic network. It is a regional realization of a global reference system. The creation of GSK-2011 was carried out with a focus on the global International Terrestrial Reference System (ITRS) however geodynamic processes affecting the displacement of reference points relative to the center of the Earth's masses play a different role in the time evolution of systems. Such processes in GSK-2011 are not subject to accounting, since the system was created to conduct various types of applied geodetic and cartographic activities in it. In this case, taking into account the constant change in the coordinates of reference points is almost never implied. In this regard, the asynchronous movement of the Russian state coordinate system (GSK-2011) with the global reference system (ITRS) began to lead to inconsistencies in the results of high-precision positioning performed at different times, by different methods. Based on this, the necessity to find a way of matching GSK-2011 to ITRS is urgent. The article presents the rates of change of the match parameters of the above-mentioned systems. These parameters make it possible to match the results of high-precision positioning performed in different reference systems using different methods of positioning for different epochs of the GNSS observations. The experiment carried out in the second part of the article confirms this.

Key words: coordinate system, coordinate system transformation parameters, Global Navigation Satellite Systems (GNSS), GNSS observations, GSK-2011, high-precision positioning, Precise Point Positioning technique, reference station, reference system.

REFERENCE

1. Center for Geodesy, Cartography and Spatial Data Infrastructure. (n. d.). Retrieved from <https://cgkipd.ru> [in Russian].
2. Gorobec, V. P., Efimov, G. N., & Stolyarov, I. A. (2015). Experience of the Russian Federation on an establishment of the state system of coordinates of 2011. *Vestnik SSGA [Vestnik SSGA]*, 2(30), 24–37 [in Russian].
3. Gorobec, V. P., Demianov, G. V., Mayorov, A. N., Pobedinsky, G. G. (2013). The current state and directions of development of geodetic support of the Russian Federation. Coordinate systems. *Geoprofi [Geoprofi]*, 6, 4–9 [in Russian].
4. Gorobec, V. P., Dem'yanov, G. V., Pobedinskij, G. G., & Yablonskij, L. I. (2013). State geocentric coordinate system of the Russian Federation. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2013: Plenarnoe zasedanie [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2013: Plenary Session]* (pp. 76–94). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
5. Vdovin, V. S., Dvorkin, V. V., Karpik, A. P., Lipatnikov, L. A., Sorokin, S. D., & Steblov, G. M. (2018). Current state and future development of active satellite geodetic networks in Russia and their integration into ITRF. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(1), 6–27 [in Russian].

6. Demyanov, G. V., Mayorov, A. N., & Pobedinskiy, G. G. (2011). Problems of continuous improvement of the state geodetic network and Russian geocentric coordinate system. *Geoprofi [Geoprofi]*, 4, 15–21 [in Russian].
7. Poprygin, V. A., & Tret'yakov, V. I. (2018). GSK-2011. Problems of transition. *Geoprofi [Geoprofi]*, 1, 8–12 [in Russian].
8. International GNSS Service. (n. d.). Retrieved from <http://www.igs.org/>.
9. Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., & Collilieux, X. (2016). ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions: ITRF2014. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. doi: 10.1002/2016JB013098.
10. Resolution of the Government of the Russian Federation No. 1240 of November 24, 2016. [About adoption of state reference systems, state height system and state gravimetric system]. Retrieved from Codex/Techexpert online database [in Russian].
11. Standarts Russian Federation. (2017). GOST 32453-2017. Global navigation satellite system. Coordinate systems. Methods of the determined points coordinate transformation. Moscow: Author [in Russian].
12. Lipatnikov, L. A. (2016). Implementation of a geocentric terrestrial reference frame for the territory of Russia and bordering countries. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 3(35), 16–24 [in Russian].
13. Order of Rosreestr No. P/0134 of March 23, 2016. About adoption of geometrical and physical numeric geodetic parameters for state geodetic reference system system of the year 1995 (SK-95). Retrieved from Codex/Techexpert online database [in Russian].
14. Demianov, G. V., Mayorov, A. N., & Pobedinsky, G. G. (2011). Questions of constructing the state geocentric coordinate system in Russian Federation. *Geodezija i kartografija [Geodesy and Cartography]*, 11, 17–25 [in Russian].
15. Lipatnikov, L. A. (2016). Validation of the published velocities of FAGS reference points in the new reference frame GSC-2011. In *Sbornik materialov Interexpo GEO-Sibir'-2016: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2016: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Geoinformation, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 86–91). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
16. Bovshin, N. A. (2019). High-precision GNSS-positioning in GSK-2011 reference frame. *Geodezija i kartografija [Geodesy and Cartography]*, 80(2), 2–14. doi: 10.22389/0016-7126-2019-944-2-2-14 [in Russian].
17. Karpik, A. P., & Tereshchenko, V. E. (2020). Technique for relation global reference system and local realization of global reference system by continuously operated reference stations. *Geodezija i kartografija [Geodesy and Cartography]*, 7, 17–38 [in Russian].
18. Obidenko, V. I. (2019). The methodology of geodetic supporting Russian Federation digital economy. *Geodezija i kartografija [Geodesy and Cartography]*, 80(12), 42–55. doi: 10.22389/00167126-2019-954-12-42-55 [in Russian].
19. Bovshin, N. A. (2019). On perfecting the employment of GSK-2011 reference frame in the Far East territory. *Geodezija i kartografija [Geodesy and Cartography]*, 80(9), 2–9. doi: 10.22389/0016-7126-2019-951-9-2-9 [in Russian].
20. Tereshchenko, V. E., & Lagutina, E. K. (2019). Determining of Novosibirsk Region reference stations offsets by comparison method of free online GNSS post-processing services. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(2), 76–94 [in Russian].
21. Shevchuk, S. O., Malyutina, K. I., & Lipatnikov, L. A. (2018). Prospects of using free software for GNSS measurements post-processing. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(1), 65–84 [in Russian].
22. Islam A. Kandil, & Mahmoud El-Mewafiand Ahmed Awaad. (2017). Analysis of GNSS Accuracy of Relative Positioning and Precise Positioning Based on Online Service. *International Journal of Scientific Engineering and Research*, 5(12), 94–103.
23. Strukov, A. A. (2013). Improving the technique of positioning points of local geodetic network in global and reference coordinate systems. *Abstract of candidate's thesis*. Novosibirsk: Siberian State Geodesy Academy, 24 p. [in Russian].
24. Gienko, E. G., & Surmin, Yu.V. (2008). Interpretation of a scale parameter in alignment of local Satellite geodetic networks with state reference. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2009: T. 1, ch. 2 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2009: Vol. 1, Part 2]* (pp. 321–324). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
25. IERS Technical Note 21. IERS Conventions. (1996). D. D. McCarthy (ed.). Paris: Central Bureau of IERS. Observatoire de Paris, 95 p.
26. Altamimi, Z., Métivier, L. & Collilieux, X. (2012). ITRF2008 plate motion model. *Journal of Geophysical Research*, 117, B07402. doi: 10.1029/2011JB008930.

27. Andreev, V. K. (2013). Role and place in geodetic support research of the GLONASS system as part of research work "Development" of state unified coordinate systems GSK-2011 and PZ-90, high-precision positioning and the gravitational field of the Earth. *Doklad na zasedanii sekcii № 3 NTS FGUP CNIImash po voprosu "Obshchij zamysel geode-zicheskikh napravlenij issledovaniy v ramkah NIR "Razvitie" ot 28 maya 2013 goda. [Report at the Meeting of Section No. 3 of the Scientific and Technical Council of the Federal State Unitary Enterprise CNIImash on the issue "The General Concept of Geodetic Research Directions as Part of Research Work "Development" May 28, 2013]* (14 p.). Moscow: CNIIGAiK Publ. [in Russian].
28. Shendrik, N. K., & Shitikov, P. K. (2018). The experience of determining the location of the Novosibirsk region CORS network in GSK-2011. *Geoprofi [Geoprofi]*, 6, 46–49 [in Russian].
29. Lagutina, E. K. (2016). Testing methods of integration regional CORS network and the Russian state geodetic network. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGIT]*, 3(35), 35–40 [in Russian].
30. JSC Rostekhinventarizatsiya – "Federal Bureau of Technical Inventory". (n. d.). Retrieved from gnss.pf [in Russian].
31. State Budgetary Institution "Center for Navigation and Geoinformation Technologies of the Novosibirsk Region". (n. d.). Retrieved from <http://rtk.nso.ru/spiderweb/frmIndex.aspx> [in Russian].
32. Vdovin, V. S. (2013). The general concept of geodetic research directions as part of research work "Development". Investigate of problematic issues of the GLONASS geodetic support. Investigation of problematic issues of navigation and geodetic support of military and space technology objects. *Doklad na zasedanii sekcii № 3 NTS FGUP CNIImash po voprosu "Obshchij zamysel geode-zicheskikh napravlenij issledovaniy v ramkah NIR "Razvitie" ot 28 maya 2013 goda. [Report at the Meeting of Section No. 3 of the Scientific and Technical Council of the Federal State Unitary Enterprise CNIImash on the Issue "The General Concept of Geodetic Research Directions as Part of Research Work "Development" May 28, 2013]* (20 p.). Moscow: CNIIGAiK, Publ. [in Russian].

Received 10.06.2020

© V. E. Tereshchenko, A. V. Radchenko, V. A. Melkiy, 2020