

УДК 528 EDN SWYHDO

Методы геодезического обеспечения комплекса высокоточного широкозонного функционального дополнения системы дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ-КФД)

И. А. Аникеева, к. т. н., *anikeeva_ia@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

В. К. Андреев, к. т. н., доцент, *andreev_vk@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

В. С. Вдовин, *vdovin_vs@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Г. М. Стеблов, д. ф.-м. н., проф. РАН, *steblov@ifz.ru*

ФГБУН «Институт теории прогноза землетрясения и математической геофизики РАН»,
Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье анализируется опыт геодезического обеспечения Комплекса высокоточного широкозонного функционального дополнения ГЛОНАСС и даются предложения по развитию методов и средств геодезического обеспечения. В качестве основных задач развития геодезического обеспечения Комплекса высокоточного широкозонного функционального дополнения ГЛОНАСС определены разработка национального специального программного обеспечения определения координат точек земной поверхности по методу длиннобазисных высокоточных относительных местоопределений с уравниванием относительно опорных пунктов и создание национального сервиса геодинамического мониторинга территории РФ.

Ключевые слова: комплекс высокоточного широкозонного функционального дополнения ГНСС ГЛОНАСС, СДКМ-КФД, ПЗ-90.11, ITRS, ITRF, геодинамические аспекты

Methods for Geodetic Support of a Complex of High-Precision Wide-Area Functional Augmentation to the System for Differential Correction and Monitoring (SDCM)

I. A. Anikeeva, *Cand. Sci. (Engineering)*, *anikeeva_ia@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

V. K. Andreev, *Cand. Sci. (Engineering)*, *associate prof.*, *andreev_vk@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

V. S. Vdovin, *vdovin_vs@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

G. M. Steblov, *Dr. Sci (Phys.-Math.)*, *Prof. RAS*, *steblov@ifz.ru*

FSBI “Institute of the Theory of Earthquake Forecast and Mathematical Geophysics of the RAS”,
Moscow, Russian Federation

Abstract. The report analyzes the experience of geodetic support of the GLONASS High-Precision Wide-Area Functional Augmentation Complex and makes proposals for the development of methods and means of geodetic support. The main task for the development of geodetic support for the Complex of high-precision wide-area functional addition to GLONASS is the development of national special software for determining the coordinates of points on the earth’s surface by the method of long-base precise point positioning (PPP) with adjustment relative to reference points and the creation of a national service for geodynamic monitoring of the territory of the Russian Federation.

Keywords: complex of high-precision wide-area functional addition to GNSS GLONASS, SDCM, PZ-90.11, ITRS, ITRF, geodynamic aspects

Введение

Комплекс высокоточного широкозонного функционального дополнения ГНСС ГЛОНАСС (СДКМ-КФД) является функциональным дополнением (ФД) ГЛОНАСС и предназначен для повышения точности и обеспечения целостности определения местоположения морских, воздушных, сухопутных и космических потребителей навигационных радиосигналов открытого доступа ГНСС ГЛОНАСС, GPS, Galileo и BDS [1].

Геодезическое обеспечение (ГО) СДКМ-КФД требует тщательного исследования по следующим причинам:

- требования по точности СДКМ-КФД в системах координат (СК) ПЗ-90.11 и ITRS сопоставимы с точностью самих СК ПЗ-90.11 и ITRS и аналогичных им геоцентрических СК, таких как WGS-84 и ГСК-2011 (более точное название СК ITRS в переводе на русский язык — «Международная земная система отсчета»);

- при точности местоопределения от 0,5 м и лучше, обеспечиваемой СДКМ-КФД [2], необходимо учитывать движение используемых в СДКМ-КФД опорных пунктов (унифицированных станций сбора измерений — УССИ), обусловленное геодинамическим движением земной поверхности, которое варьируется от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров в год;

- национальные (государственные) геоцентрические СК, а именно ПЗ-90.11 и ГСК-2011, и их опорные наземные сети (ОНС), соответственно, Глобальная космическая геодезическая сеть (ГКГС) и Фундаментальная астрономо-геодезическая сеть (ФАГС), функционально не готовы быть эксплуатационными системами координат (ЭСК)¹ для СДКМ-КФД. Функциональная неготовность ПЗ-90.11 и ГСК-2011 быть ЭСК для СДКМ-КФД объясняется тем, что эти СК и их ОНС не являются динамическими (координаты пунктов ГКГС и ФАГС зафиксированы на т.н. «нулевые» эпохи: 01.01.2010 г. (эпоха 2010.0) для ПЗ-90.11 и 01.01.2011 г. (эпоха 2011.0) для ГСК-2011 (см. [3]), и мониторинг их динамики не предусмотрен. В частности, в [4] отмечено, что «существует

¹ Эксплуатационная система координат — система координат, используемая во внутреннем контуре СДКМ-КФД в эксплуатационных алгоритмах.

довольно сложная задача по определению границ территории, на которую (авторы) вправе распространять значения скоростей, определенных в пункте ФАГС. Для решения этой задачи в ЦНИИГАиК совместно с ИФЗ РАН проводятся исследования по проблеме геотектонического районирования... Однако до практической реализации результатов этих исследований при установлении системы координат еще достаточно далеко»;

- у «держателей» ГКГС (ВТУ ГШ) и ФАГС (Росреестр) нет полноценных онлайн сервисов удаленного доступа к измерительной информации и координатам их опорных пунктов, аналогичных зарубежным и международным онлайн-сервисам, обеспечивающим удаленный доступ к информации Международной земной отсчетной основы ITRF, являющейся динамической² земной отсчетной основой, и реализацией Международной земной системы отсчета ITRS [5].

Тестовые мероприятия по геодезическому обеспечению СДКМ-КФД на этапе межведомственных испытаний СДКМ-КФД

На этапе межведомственных испытаний СДКМ-КФД, которые проводились в 2018–2020 гг., в качестве ЭСК была использована СК ITRS и ее актуальная реализация — отсчетная основа ITRF-2014. Для удобства СК ITRS и связанную с ней отсчетную основу ITRF-2014 будем называть «система ITRS/ITRF».

Порядок вычисления координат УССИ на этапе межведомственных испытаний СДКМ-КФД в графическом виде показан на рис. 1.

Вычисление координат УССИ СДКМ-КФД осуществлялось в системе ITRS/ITRF на текущую эпоху по методу высокоточных абсолютных местоопределений (ВАМО) (англ. PPP — Precise Point Positioning) в режиме постобработки. При этом использовалась наиболее точная эфемеридно-временная информация (ЭВИ), формируемая Между-

² Динамическая земная отсчетная основа — земная отсчетная основа (англ. TRF), эволюционирующая во времени [5].

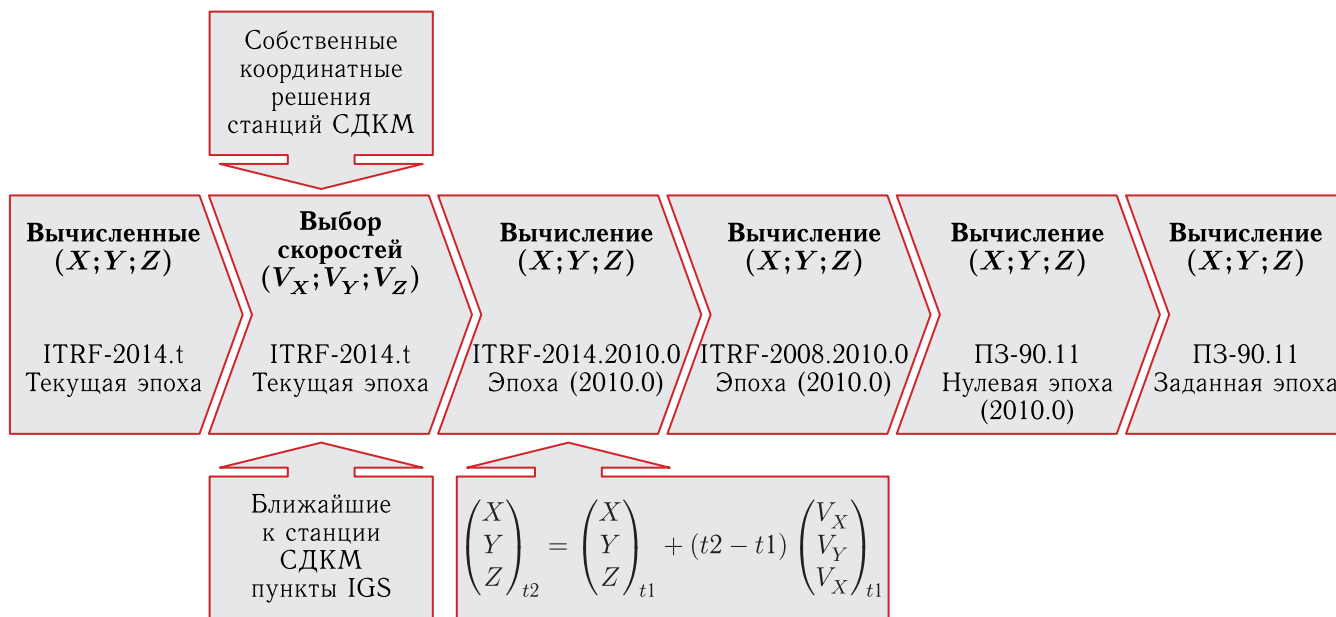


Рис. 1. Порядок вычисления координат УССИ

народной ГНСС-службой (англ. IGS — International GNSS Service) [6], с задержкой около двух недель. В настоящее время IGS формирует высокоточную ЭВИ всех национальных ГНСС, входящих в международную ГНСС (МГНСС, англ. IGNSS) в ITRS/ITRF на текущие эпохи. Поэтому результаты PPP соответствуют системе координат, в которой определена используемая ЭВИ. Наиболее точная ЭВИ, формируемая службой IGS (т. н. финальная), является усреднением соответствующих решений от нескольких аналитических центров. Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения (ИАЦ КВНО) Роскосмоса [7] является одним из самых точных участвующих в этом усреднении поставщиков высокоточной ЭВИ ГЛОНАСС. Таким образом, в случаях отсутствия доступа к финальной ЭВИ, формируемой IGS, для уточнения координат УССИ СДКМ-КФД использовалась высокоточная ЭВИ от ИАЦ КВНО, которая также соответствует ITRS/ITRF на текущую эпоху.

Пересчет координат УССИ от текущей эпохи на «нулевую» эпоху 2010.0 ITRF-2014 и далее на «нулевые» эпохи 2010.0 для ПЗ-90.11 и 2011.0 для ГСК-2011 выполнялись по рекомендациям IERS [5], но с использованием национальной справочной информации [3].

Сценарии перевода геодезического обеспечения СДКМ-КФД в эксплуатационную фазу

Сценарий 1 (максимальный)

Собственники национальных СК ПЗ-90.11 (ВТУ ГШ) и ГСК-2011 (Росреестр) выведут эти СК на уровень мониторинговых СК с предоставлением потребителям необходимой информации в режиме онлайн. ГО СДКМ-КФД осуществляется в виде описанных выше тестовых мероприятий, но с использованием систем ПЗ-90.11/КГС и/или ГСК-2011/ФАГС в эксплуатационном режиме при условии выпуска необходимых нормативно-правовых и нормативно-технических документов.

Сценарий 2 (минимальный)

Собственники национальных СК ПЗ-90.11 и ГСК-2011 не выведут эти СК на уровень мониторинговых СК с предоставлением потребителям необходимой информации в режиме онлайн. ГО СДКМ-КФД осуществляется в виде описанных выше тестовых мероприятий с использованием системы ITRS/ITRF, но в эксплуатационном режиме.

На момент подготовки данной работы ГО СДКМ-КФД осуществляется по второму сценарию.

Основные задачи развития геодезического обеспечения СДКМ-КФД

Разработка научно-методической базы и национального специального программного обеспечения (СПО) определения координат точек земной поверхности в системе ITRS/ITRF с необходимой точностью и периодичностью

Выше было отмечено, что определение координат УССИ в системе ITRS/ITRF в настоящее время выполняется по методу PPP собственным СПО АО «Российские космические системы», созданным на базе программного пакета с открытым исходным кодом RTKLIV [11]. Точность метода PPP для неподвижных точек местности оценивается в несколько сантиметров, но не может быть проверена (подтверждена) внутренними средствами СПО, реализующего PPP. Для определения координат неподвижных точек местности в ITRF с наивысшей (геодезической) точностью с возможностью внутреннего контроля необходимо использовать СПО, реализующее метод длинноточных высокоточных относительных местопределений (ВОМО) с уравниванием относительно опорных пунктов IGS. Примером этому является определение координат и скоростей пунктов ФАГС (см., напр. [12]). Согласно [12] основным материалом для получения рядов координат пунктов ФАГС в 2022 г. в системе ITRF стали результаты обработки и уравнивания измерений с пунктов ФАГС за 2015–2022 гг.; за исходные взяты пункты из ядра IGS, обеспечивающие глобальное встраивание ФАГС в каркас IGS; обработка и уравнивание выполнены «в четыре руки» с использованием СПО GAMIT, Bernese и GeoMaster. В указанном СПО скорости пунктов ФАГС вычислялись на основе глобальных моделей движения литосферных плит [12], таких как NNR-NUVEL1A, GEODVEL, MORVEL [13–16]. В [13] отмечается, что использование указанных моделей имеет много ограничений.

С учетом опыта ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД» [12] необходимость определения координат УССИ в системе ITRS/ITRF по методу ВОМО с уравниванием как средства контроля

определения координат УССИ в системе ITRS/ITRF по методу PPP или как основного средства определения координат УССИ в системе ITRS/ITRF до 2021 г. у авторов не вызвала сомнений. Однако с 2021 г. использование для этой задачи зарубежного профильного СПО с обеспечением онлайн-доступа к необходимой внешней информации, включая модели движения литосферных плит, стало проблематичным.

Стратегическим выходом из создавшегося положения является разработка профильными научными организациями РФ собственного СПО.

Временной мерой может являться использование СПО лояльных к РФ стран. Например, проведенное авторами тестирование СПО CGO 2.0 PP китайской компании СНС [17], поставляемое в РФ компанией «ПРИН» [18], показало, что данное СПО позволяет вычислять координаты точек местности по методу ВОМО с уравниванием относительно пунктов IGS с точностью в несколько сантиметров.

Создание национального сервиса геодинамического мониторинга территории РФ

Высокие риски отключения удаленного доступа к глобальным моделям движения литосферных плит NNR-NUVEL1A, GEODVEL, MORVEL так же, как и в случае наступивших ограничений доступа к использованию СПО GAMIT, Bernese и им подобного, означают, что в РФ необходимо создавать собственные глобальные модели движения литосферных плит. В отличие от задачи определения координат опорных станций различной ведомственной принадлежности задача определения скоростей движения точек земной поверхности в настоящее время не возложена на какой-либо федеральный орган исполнительной власти РФ. Одним из вариантов решения данной проблемы является создание национального сервиса (службы) геодинамического мониторинга на базе профильного научно-исследовательского учреждения РАН. Предварительная проработка данного вопроса проводилась ранее с участием профильных специалистов ФГБУН «Федеральный исследовательский центр “Единая геофизическая служба РАН”» (ФИЦ ЕГС РАН) [19], а также

в последнее время ФГБУН «Институт теории прогноза землетрясения и математической геофизики РАН» (ИТПЗ РАН). Примечательным является то, что в статье [19] упоминается «Методика определения координат и скоростей смещений точек стояния базовых станций глобальных навигационных спутниковых систем с учетом деформационной составляющей движения земной поверхности», разработанная в 2019 г. ФИЦ ЕГС РАН совместно с АО «Российские космические системы» и Университетом СГУГиТ (Новосибирск).

Выводы

1. Геодезическое обеспечение СДКМ-КФД основано на использовании Международной земной системы отсчета ITRS и одной из современных ее реализаций — Международной земной отсчетной основы ITRF-2014.

2. Пересчет периодически определяемых координат унифицированных станций сбора измерений СДКМ-КФД из ITRF-2014 в государственную геоцентрическую систему координат ПЗ-90.11 выполняется с помощью известных формул трансформации.

3. Основными задачами развития геодезического обеспечения СДКМ-КФД являются разработка национального специального программного обеспечения определения координат точек земной поверхности по методу длиннобазисных высокоточных относительных местоопределений с уравниванием относительно опорных пунктов (пунктов IGS или их аналогов) и создание национального сервиса геодезического мониторинга территории РФ.

Список литературы

1. <https://russianspacesystems.ru/bussines/navigation/sdkm/interfeysnyy-kontrolnyy-dokument-s> (Дата обращения 16.11.2023).
2. Сернов В. Г., Филимонова Д. В., Исаев Ю. В. Перспективное координатно-временное навигационное обеспечение потребителей повышенной точности на базе СДКМ-КФД // Десятая Всероссийская конференция с международным участием «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2023). 17–21 апреля 2023 г. <https://iaaras.ru/meetings/kvno2023> (Дата обращения 16.11.2023).
3. «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90.11). Специализированный справочник. ВТУ ГШ ВС РФ. М., 2020. <https://structure.mil.ru> (Дата обращения 16.11.2023).
4. Горобец В. П. и др. Современное состояние и направления развития геодезического обеспечения РФ. Системы координат // Геопрофи, 2013, № 6. С. 5–11.
5. IERS Technical Note No. 36. IERS Conventions (2010). Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie Frankfurt am Main 2010. <https://iers-conventions.obspm.fr> (Дата обращения 16.11.2023).
6. <https://igs.org> (Дата обращения 16.11.2023).
7. <https://www.glonass-iac.ru> (Дата обращения 16.11.2023).
8. https://cdis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS/station_position (Дата обращения 16.11.2023).
9. <http://sopac.ucsd.edu> (Дата обращения 16.11.2023).
10. http://itrf.ign.fr/ITRF_solutions/2014/tp_14-08.php (Дата обращения 16.11.2023).
11. <https://github.com/tomojitakasu/RTKLIB> (Дата обращения 16.11.2023).
12. Попадьев В. В. Результаты последнего уравнивания ФАГС в системе ITRF. <https://iaaras.ru/meetings/kvno2023/abstracts/popadjov> (Дата обращения 16.11.2023).
13. Мазуров Б. Т. Геодинамические системы (кинематические и деформационные модели блоковых движений) // Вестник СГУГиТ, 2016, вып. 3 (35).
14. Kogan M. G., Steblow G. M. Current global plate kinematics from GPS (1995–2007) with the plate-consistent reference frame // J. Geophys. Res., 2008, vol. 113, № B04416.
15. DeMets C., Gordon R. G., Argus D. F. Geologically current plate motions // Geophys. J. Int., 2010, vol. 181. P. 1–80.
16. Argus D. F., Gordon R. G., Heflin M. B., Ma C. The angular velocities of the plates and the velocity of Earth's centre from space geodesy // Geophys. J. Int., 2010, vol. 180. P. 913–960.
17. <https://www.chc.com> (Дата обращения 16.11.2023).
18. https://www.prin.ru/soft/prince/cgo_2/pp (Дата обращения 16.11.2023).
19. Габсатаров Ю. В., Владимирова И. С., Сдельникова И. А. Геодинамический мониторинг в ФИЦ ЕГС РАН: Современное состояние и перспективы развития // Российский сейсмологический журнал, 2022, т. 4, № 4. С. 7–23.

Дата поступления рукописи
в редакцию 16.08.2023
Дата принятия рукописи
в печать 27.11.2023