

О необходимости ввода территориальных реализаций государственной системы координат, обусловленных геодинамическими особенностями территории

И. Е. Дорогова^{1}, Е. С. Блинкова¹*

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: inna_dorogova@mail.ru

Аннотация. Поскольку территории государств нередко принадлежат сразу нескольким литосферным плитам, различные регионы и расположенная на них координатная основа подвержены смещениям, которые не могут быть описаны единой математической моделью. Территория Российской Федерации расположена на четырех тектонических плитах и большом количестве блоков, скорости и направления которых могут существенно отличаться. Кроме глобальных движений литосферных плит наблюдаются региональные движения, а также местные, обусловленные смещением грунтов и сейсмическими событиями. Государственная геодезическая система координат 2011 года (ГСК-2011) является единой координатной основой в Российской Федерации (РФ), необходимо чтобы координаты и скорости смещений пунктов ГСК-2011, которые планируется использовать для пересчета координат на определенные эпохи, были уверенно определены в недеформированной системе отсчета.

Ключевые слова: система координат, координатная основа, территориальные реализации, геодинамика, единая математическая модель, ГСК-2011, литосферные плиты

On the need to introduce territorial implementations of the state coordinate system due to geodynamic features of the territory

I. E. Dorogova^{1}, E. S. Blinkova¹*

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: inna_dorogova@mail.ru

Abstract. Since the territories of States often belong to several lithospheric plates at once, different regions and the coordinate basis located on them are subject to displacements that cannot be described by a single mathematical model. Thus, the territory of the Russian Federation is located on 4 active tectonic plates and a large number of blocks, the speeds and directions of which may differ significantly. In addition to global movements of lithospheric plates, there are regional movements, as well as local ones caused by soil displacement and seismic events. The State Geodetic Coordinate System of 2011 (GSK-2011) is a single coordinate basis in the Russian Federation (RF). It is necessary that the coordinates and displacement velocities of the GSK-2011 points, which are planned to be used to recalculate coordinates for certain epochs, are confidently determined in an undeformed reference frame.

Keywords: coordinate system, coordinate basis, territorial realizations, geodynamics, unified mathematical model, GSK-2011, lithospheric plates

Введение

Точность реализации системы координат во многом зависит от того насколько надежно определена и поддерживается ее координатная основа. Понятие координатной основы по отношению к современным системам координат

включает совокупность физических носителей координат (геодезических пунктов) и модель движения пунктов (в виде каталога координат и скоростей) [1, 2].

Поскольку территории государств нередко принадлежат сразу нескольким литосферным плитам, различные регионы и расположенная на них координатная основа подвержены смещениям, которые не могут быть описаны единой математической моделью. Движение каждого тектонического блока принято описывать моделью, основными параметрами которой являются координаты Эйлера полюса вращения (точки на земной поверхности, через которую проходит ось вращения литосферной плиты) и угловая скорость вращения [3, 4].

Разные направления и скорости движения блоков приводят к тому, что изначальная отсчетная координатная основа, закрепленная совокупностью геодезических пунктов, деформируется неравномерно. Поскольку координаты и скорости смещения произвольных пунктов определяются в системе координат, определенной относительно этой основы, они несут искаженную информацию о фактическом местоположении и перемещении пунктов [5].

Необходимо чтобы координаты и скорости смещений пунктов ГСК-2011, которые планируется использовать для пересчета координат на определенные эпохи, были уверено определены в недеформированной системе отсчета. Этот момент касается и вопроса установления взаимосвязи с международной системой ITRF2014, которая имеет значительные скорости изменения координат пунктов во времени на всей территории Российской Федерации [6]. В настоящее время в нормативных документах не имеется никаких пояснений по учету скоростей при пересчете координат между различными системами на разные эпохи [2, 7].

В случае с ITRF2014 установление единой математической модели взаимосвязи с ГСК-2011 на территории Российской Федерации осложняет также тот факт, что изначально система ITRF опиралась на модель движения тектонических плит NUVEL-1A NNR, в которой отсутствуют многие литосферные плиты и микроплиты, принятые в других моделях (для территории Российской Федерации – это Охотоморская и Амурская литосферные плиты), и на сегодняшний день в модели ITRF2014 эти плиты по-прежнему не учитываются.

С целью уменьшения эффектов, вызванных деформациями отсчетной основы при движении тектонических блоков возможен ввод территориальных реализаций системы координат и использование в каждой реализации в качестве координатной основы только тех исходных пунктов, которые принадлежат данному тектоническому блоку.

Результаты

Одним из наиболее ярких примеров территориальных реализаций государственных систем координат являются реализации американской системы NAD83: NAD 83(2011), NAD 83(PA11) и NAD 83(MA11), которые были введены в сентябре 2011 г в рамках программы по совершенствованию национальной системы National Spatial Reference System (NSRS) (проект "National Adjustment of 2011") [8]. Проект представлял собой единое государственное уточнение коор-

динат путем повторной обработки всех данных CORS с января 1994 по апрель 2011 года.

При проведении уточнения государственной системы координат 2011 года одной из решаемых проблем была принадлежность сети к трем различным тектоническим плитам (Северо-Американской, Тихоокеанской и Марианской плитам). В некоторых случаях станции, координаты которых были определены относительно одной плиты, располагались на другой плите (например, станции в Карибском бассейне и прибрежной Калифорнии были привязаны к Северо-Американской плите).

Для устранения подобных проблем выполнялось уравнивание сети на общую эпоху 2010.00, при этом было выполнено моделирование движений тектонических плит, которое учитывалось в процессе уравнивания с помощью специально разработанного программного обеспечения [8].

В 2022 году National Spatial Reference System (NSRS) будет модернизирована. Новая национальная система координат NSRS будет содержать четыре новые территориальные системы отсчета: North American Terrestrial Reference Frame of 2022 (NATRF2022) для территории Северо-Американской литосферной плиты, Pacific Terrestrial Reference Frame of 2022 (PATRF2022), для территории Тихоокеанской литосферной плиты, Caribbean Terrestrial Reference Frame of 2022 (CATRF2022) для территории Карибской литосферной плиты, Mariana Terrestrial Reference Frame of (MATRF2022) для территории Марианской литосферной плиты.

Еще одним примером государственной системы координат содержащей территориальные реализации можно считать государственную систему координат Новой Зеландии – New Zealand Geodetic Datum 2000 (NZGD2000). В NZGD2000 выбран несколько иной подход к территориальным реализациям координатной системы, которые представлены не в явном виде, а реализованы внутри деформационной модели [9].

Система NZGD2000 определяет: официальные национальные геодезические данные Новой Зеландии, параметры, устанавливающие национальную систему координат NZGD2000, модель деформации NZGD2000, которая позволяет преобразовывать координаты из опорной эпохи 2000.0 в любое другое время, параметры преобразования между NZGD2000 и международными системами координат, а также другими системами Новой Зеландии [10].

В системе координат Новой Зеландии NZGD2000 координаты объектов являются неизменными (до введения обновлений путем ввода новых версий NZGD2000), несмотря на то, что Новая Зеландия постоянно движется и деформируется под влиянием Австралийской и Тихоокеанской тектонических плит, на границе которых расположено государство [11]. Для обеспечения устойчивости координат они перемещаются и деформируются вместе с территорией государства и постоянно изменяются относительно Международной земной системы отсчета ITRF.

Новозеландская государственная система координат NZGD2000 была совмещена с Международной системой ITRF96 на эпоху 2000.0. Процедура преоб-

разования координат в NZGD2000 из любой реализации ITRF на заданную дату включает преобразование координат ITRF из заданной реализации в ITRF96 и исключение деформации, вычисленной с помощью модели деформации NZGD2000 на эту дату. Для обратного преобразования координат (из системы NZGD2000 в систему ITRF на определенную дату) к значениям добавляется деформация NZGD2000 (в результате координаты пересчитываются в ITRF96), затем выполняется преобразование в требуемую реализацию ITRF [12].

Модель деформации NZGD2000 состоит из нескольких подмоделей, представляющих различные геофизические источники деформаций. По своей сути часть этих подмоделей и представляет собой территориальные реализации системы координат, включенные в общую национальную деформационную модель, которая описывает деформации для страны в целом. Эта модель дополняется подмоделями ("заплатами") описывающими эффект локализованных деформационных событий [13].

С течением времени в модели NZGD2000 накапливаются ошибки в определении скоростей, которые приводят к увеличению ошибок в вычисленных координатах пунктов для эталонной эпохи 2000.0. Скорость накопления ошибок для территории Новой Зеландии различна и в некоторых областях положение геодезических пунктов определено грубее, чем в других регионах государства. Данные ухудшаются со временем, но гораздо медленнее, чем если бы не использовалась модель деформации. Поэтому такая модель деформации со временем становится все более сложной и требует переопределения координат на другую эталонную эпоху [14].

Большая часть территории Российской Федерации отличается относительной стабильностью и проявляет себя в геодинимическом отношении как цельная часть Евразийской тектонической плиты. Но также имеется часть территории России, которая принадлежит, Амурской и Охотоморской или Северо-Американской литосферным плитам (по разным источникам) [15-18]. Амурская литосферная плита в ряде моделей движения тектонических плит не рассматривается в качестве отдельного литосферного блока (например, в распространенной модели NUVEL-1A) [19], Охотская (Охотоморская плита) также отсутствует в некоторых распространенных моделях движения тектонических плит (NUVEL 1A, HS2-NUVEL1A, HS3-NUVEL1A, APKIM2000, ITRF2000, ITRF2008, ITRF2014, CGPS, GEODVEL), что создает дополнительные сложности при использовании этих моделей для отдельных регионов территории Российской Федерации.

В настоящее время государственная геодезическая система координат ГСК-2011 распространена на всю территорию Российской Федерации единой реализацией. Однако, ряд исследований указывает на то, что действующая реализация ГСК-2011, распространенная на всю территорию Российской Федерации, при использовании в Дальневосточном регионе имеет ряд сложностей, связанных с геодинимической активностью региона [15-18, 20]. В исследовании [21] предложена модель взаимного поведения систем координат ГСК-2011 и ITRF-2014, которая показала хорошую согласованность с данными измерений для всей территории Российской Федерации кроме территории Дальнего Востока России, при приме-

нении модели для Дальневосточного региона моделирование скоростей пунктов ФАГС дает менее качественный результат [22].

Поэтому на сегодняшний день наиболее рациональным является ввод отдельных территориальных реализаций государственной системы координат ГСК-2011 для Дальневосточного региона. При этом могут быть рассмотрены варианты двух территориальных реализаций: ГСК-2011(EA) – для территории Евразийской литосферной плиты, ГСК-2011(NA) – для территории Северо-Американской литосферной плиты; и трех территориальных реализаций: ГСК-2011(EA) – для территории Евразийской литосферной плиты, ГСК-2011(AM) – для территории Амурской литосферной плиты и ГСК-2011(OK) – для территории Охотомоской литосферной плиты.

В дальнейшем в зависимости от геодинамической ситуации количество реализаций государственной системы координат ГСК-2011 может изменяться. Так, например, произошло с системой NAD83, которая с 2022 году будет включать четыре реализации: North American Terrestrial Reference Frame of 2022 (NATRF2022), Pacific Terrestrial Reference Frame of 2022 (PATRF2022), Caribbean Terrestrial Reference Frame of 2022 (CATRF2022), Mariana Terrestrial Reference Frame of (MATRF2022). Со временем новые территориальные реализации государственной системы координат могут понадобиться и для других регионов Российской Федерации, обладающих потенциальной геодинамической активностью. На данный момент на наш взгляд будет достаточно ввода двух-трех территориальных реализаций государственной системы координат ГСК-2011.

Стоит отметить, что для пользователя возможно представление территориальных реализаций ГСК-2011 не в виде явных отдельных реализаций системы координат, а в виде некоторых матриц деформационных поправок (по аналогии с тем, как этот процесс организован для системы координат New Zealand Geodetic Datum 2000) [23].

Целостность и точностные характеристики реализация системы координат приобретает после уравнивания закрепляющей ее геодезической сети, поэтому в процессе уравнивания пунктов, закрепляющих государственную геодезическую систему координат ГСК-2011 необходимо учитывать принадлежность пункта к той или иной территориальной реализации. Также при вводе территориальных реализаций необходимо определять их связь с основной реализацией ГСК-2011 с течением времени, а на фундаментальную эпоху 2011.0 принимать реализации совпадающими с основной системой ГСК-2011.

Выводы

Таким образом, для обеспечения возможности разработки территориальных реализаций государственной системы координат ГСК-2011 необходимо рассмотреть следующие вопросы:

– выбор модели движения литосферных плит, наиболее подходящей для использования в качестве основы территориальных реализаций ГСК-2011 для территории Российской Федерации или разработка нового собственного или гибридного решения, сочетающего границы и параметры движения плит рассмотренных моделей;

– уточнение количества и границ территориальных единиц (блоков) Российской Федерации для которых предлагается применять различные территориальные реализации;

– выбор физических носителей (пунктов) для закрепления и определения параметров каждой реализации государственной системы координат ГСК-2011;

– методика ввода, обновления и добавления территориальных реализаций;

– уточнение условий и методики обновления и переопределения параметров территориальных реализаций ГСК-2011 после крупных сейсмических событий.

Исследование выполнено в рамках СЧ НИР «ГЕОТЕХ-Квант» с целью повышения точности координатно-временных определений на территории Российской Федерации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вдовин В. С. 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. – Том 23. – № 1. – С. 6-27.

2. О корректном применении международной терминологии «ReferenceSystem» и «ReferenceFrame» к понятиям «система координат» и «координатная основа» в геодезической практике России / Ю. В. Сурнин // Геодезия и картография. – 2015. – № 8. – С. 3–9. DOI: 10.22389/0016-7126-2015-902-8-2-9.

3. Дорогова И.Е., Дербенев К.В. Глобальные вихревые движения блоков земной поверхности / И.Е. Дорогова, К.В. Дербенев // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2012. – Т. 1. – № 1. – С. 237-240.

4. Дорогова И.Е. Изучение горизонтальных движений земной коры вращательного характера по данным геодезических наблюдений / И.Е. Дорогова // Геодезия и картография. – 2013. – № 4. – С. 37-40.

5. Дорогова И.Е. Влияние выбора исходных пунктов на результаты уравнивания повторных геодезических измерений / И.Е. Дорогова // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2015. – Т. 1. – № 1. – С. 209-213.

6. Об установлении государственных систем координат, государственной системы высот и государственной гравиметрической системы: постановление Правительства РФ от 24 ноября 2016 года № 1240 (Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс») – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_207750/ (дата обращения: 30.09.2022).

7. 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 «КонсультантПлюс») – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_198787/ (дата обращения: 30.09.2022).

8. The National Adjustment of 2011 Project. Alignment of Passive GNSS Control with the Three Frames of the North American Datum of 1983 at Epoch 2010.00: NAD83 (2011), NAD83 (PA11), and NAD83 (MA11) – URL: <https://www.ngs.noaa.gov/web/surveys/NA2011> (дата обращения: 17.09.2022).

9. NZGD2000 Deformation Model Format Land Information New Zealand, 17 June 2013 // GitHub – URL: <https://github.com/linz/nzgd2000-deformation-model/tree/master/documentation/NZGD2000DeformationModelFormat.docx> (дата обращения: 17.09.2022).

10. Standard for New Zealand Geodetic Datum 2000 LINZS25000 Effective date: 16 November 2007 Office of the Surveyor-General Land Information New Zealand – URL: <https://www.linz.govt.nz/regulatory/25000> (дата обращения: 17.09.2022). 1. Бовшин Н.А. Высокоточные координатные GNSS-определения в системе ГСК-2011/ Н.А. Бовшин // Геодезия и картография. – 2019. – № 2. – С. 2-14. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-944-2-2-14.

11. OSG Technical Report 5: Realisation of the New Zealand Geodetic Datum 2000 1 June 2000 Land Information New Zealand – URL: https://www.linz.govt.nz/system/files_force/media/file-attachments/tr05-realisation-of-nzgd2000-2000.pdf (дата обращения: 15.09.2022).
12. Transforming between ITRF and NZGD2000 Land Information New Zealand, 9 May 2017 // GitHub – URL: https://github.com/linz/nzgd2000-deformation-model/tree/master/documentation/ITRF_to_NZGD2000.docx (дата обращения: 17.09.2022).
13. NZGD2000 Deformation Model // Toitū Te Whenua Land Information New Zealand – URL: <https://www.linz.govt.nz/data/geodetic-system/datums-projections-and-heights/geodetic-datums/new-zealand-geodetic-datum-2000-nzgd2000/nzgd2000-deformation-model> (дата обращения: 17.09.2022).
14. Blick, G. The Practical Implications and Limitations of the Introduction of a Semi-Dynamic Datum – A New Zealand Case Study / G. Blick, N. Donnelly, A. Jordan // Geodetic Reference Frames. International Association of Geodesy Symposia, Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. – Vol 134. DOI: 10.1007/978-3-642-00860-3_18.
15. Габсатаров Ю. В. Результаты новых GPS-наблюдений в области Беринговой микроплиты / Ю. В. Габсатаров, Г. М. Стеблов, Д. И. Фролов // Физика Земли. – 2013. – № 3. – С. 114–118.
16. Левин В. Е. Современные движения земной коры (СЗДК) на Камчатке / В. Е. Левин, В. Ф. Бахтияров, Н. Н. Титков и др. // Физика Земли. – 2014. – № 6. – С. 17–36.
17. Прытков А. С. Современная геодинамика Курильской зоны субдукции / А. С. Прытков, Н. Ф. Василенко, Д. И. Фролов // Тихоокеанская геология. – 2017. – Т. 36. – № 1. – С. 23–28.
18. Стеблов Г. М. Динамика Курило-Камчатской зоны субдукции по данным GPS / Г. М. Стеблов, Н. Ф. Василенко, А. С. Прытков, и др. // Физика Земли. – 2010. – № 5. – С. 77–82.
19. Дорогова И.Е. Сравнение существующих моделей движения Амурской литосферной плиты / И.Е. Дорогова, А.И. Мелкова // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2018. – № 1. – С. 116-122.
20. Липатников Л. А. Проверка опубликованных значений скоростей пунктов ФАГС в новой государственной системе координат ГСК-2011 / Л. А. Липатников // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2016. – Т. 1. – № 2. – С. 86–91.
21. Бовшин Н.А. Высокоточные координатные GNSS-определения в системе ГСК-2011/ Н.А. Бовшин // Геодезия и картография. – 2019. – № 2. – С. 2-14. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-944-2-2-14.
22. Бовшин Н. А. Оптимизация условий применения системы ГСК-2011 в Дальневосточном регионе // Геодезия и картография. – 2019. – № 9. – С. 2-9. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-951-9-2-9.
23. NZGD2000-deformation-model // GitHub – URL: <https://github.com/linz/nzgd2000-deformation-model> (дата обращения: 20.09.2022).

© И. Е. Дорогова, Е. С. Блинкова, 2023