

УДК 528.236

DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-4-16-30

Анализ мирового опыта ввода полудинамических систем координат и территориальных реализаций систем координат

А. П. Карник¹, И. Е. Дорогова¹✉

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: inna_dorogova@mail.ru

Аннотация. В последние годы отмечается мировая тенденция перехода от государственных статических систем координат к национальным полудинамическим системам отсчета. Для корректного осуществления такого перехода государствами разрабатывается ряд мер и программное обеспечение для пересчета координат между различными системами отсчета. Такое программное обеспечение обычно включает математические модели учета геодинимических процессов для территории государства и алгоритмы их учета при определении координат в заданной системе отсчета. Государственные территории нередко относятся к нескольким литосферным плитам, в таких ситуациях смещения земной поверхности их регионов, а также координатной основы требуют разработки более сложной математической модели. В статье рассмотрен опыт решения этой задачи другими государствами, в заключительной части представлены возможные варианты решения задачи для территории Российской Федерации и государственной геодезической системы координат 2011 года (ГСК-2011).

Ключевые слова: система координат, модель деформаций земной коры, геодинамика, координатная основа, литосферные плиты, движения земной коры, территориальные реализации систем координат

Для цитирования:

Карник А. П., Дорогова И. Е. Анализ мирового опыта ввода полудинамических систем координат и территориальных реализаций систем координат // Вестник СГУГиТ. – 2024. – Т. 29, № 4. – С. 16–30. – DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-4-16-30

Введение

Точность и своевременность реализации системы координат в настоящее время во многом зависят от надежного определения и поддержания в актуальном состоянии ее координатной основы. Для современных систем координат понятие координатной основы расширилось и включает, помимо совокупности координат точек-носителей (геодезических пунктов), также описание движения пунктов (значения компонент скоростей смещения) [1, 2]. За последние годы многие государства разработали и внедрили национальные системы координат, в которых предусмотрены механизмы учета геодинимических процессов, что позволяет обеспечить долговременную согласован-

ность таких систем с глобальными международными системами отсчета, такими, как ITRS (International Terrestrial Reference System).

Государственные территории нередко принадлежат нескольким литосферным плитам, в таких ситуациях смещения земной поверхности их регионов, а также координатной основы требуют разработки более сложной математической модели. Движение каждого блока в таких моделях обычно описывается угловой скоростью вращения и координатами точки на земной поверхности, в которой ее пересекает ось вращения литосферной плиты – полюса вращения (Эйлерова полюса) [3, 4].

Несовпадение направлений и величин скоростей движений блоков вызывают нерав-

номерную деформацию сети геодезических пунктов, являющихся отсчетной координатной основой. Поскольку координаты и скорости движения произвольных пунктов определяются в системе отсчета, заданной относительно этой основы, они содержат искаженную информацию о фактическом местоположении и перемещении пунктов [5].

Координаты и скорости изменения координат пунктов национальных систем отсчета, которые планируется использовать для пересчета координат на определенные эпохи, должны быть корректно и уверенно определенными в недеформированной системе отсчета. Это также важно для установления взаимосвязи с международными системами, например, ITRF2020 (International Terrestrial Reference Frame 2020), для которой характерны значительные изменения координат пунктов на всей территории Российской Федерации [6, 7].

В случае с системой ITRF разработку единой математической модели взаимосвязи с государственной системой координат на территории Российской Федерации осложняет 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) [8], и на сегодняшний день в моделях ITRF2014, ITRF2020 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. Также возможен вариант использования модели связи национальной (государственной) системы координат с реализациями международной системы ITRS, учитывающей движения земной поверхности. Для рассмотрения возможных путей учета геодинамических процессов и установления связи государственной геодезической системы координат ГСК-2011 с международными системами отсчета в данной ста-

тье проанализирован опыт некоторых государств по решению аналогичной проблемы.

Территориальные реализации систем координат NAD83 и NSRS2022

Одним из примеров ввода территориальных реализаций государственных систем координат являются реализации американской системы North American Datum 1983 (NAD83): NAD 83 (2011) для территории Северо-Американской плиты, NAD 83 Pacific Plate (NAD 83 PA11) для территории Тихоокеанской плиты и NAD 83 Mariana Plate (NAD 83 MA11) для территории Марианской плиты, которые были введены в сентябре 2011 г. в рамках программы по совершенствованию национальной системы National Spatial Reference System (NSRS) (проект «National Adjustment of 2011») [9]. Проект представлял собой уточнение координат путем повторной обработки всех данных Continuously Operating Reference Stations (CORS) с января 1994 г. по апрель 2011 г.

Главной составляющей координатной основы для государственной системы координат NAD83(2011) и ее территориальных реализаций является сеть постоянно действующих опорных станций CORS, управляемая National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) National Geodesic Survey.

При проведении уточнения национальной системы координат 2011 г. учитывалась принадлежность сети к трем различным тектоническим плитам (Северо-Американской, Тихоокеанской и Марианской). В некоторых случаях станции, координаты которых ранее 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 [9].

Координатная основа каждой из территориальных реализаций уравнивалась отдельно. Тихий океан был разделен на две отдельные

сети, одна из которых расположена на Тихоокеанской литосферной плите, а вторая – на Марианской литосферной плите. Для уточнения координат также использовалась сеть CONUS, которая при уравнивании была разделена на две сети, основным признаком для деления выступало время наблюдений. Первая сеть состояла из 62 364 станций (включая 1 097 станций CORS), вторая сеть – 22 503 станций (включая 45 станций CORS). При уравнивании в обе сети включался общий блок из 5 321 станции (включая 29 станций CORS). Поскольку сети содержат значительное количество пунктов и данных, при уравнивании использовался подход, согласно которому сеть разбивается на отдельные взаимосвязанные блоки. Каждый такой блок уравнивался отдельно, затем решения согласовывались так, чтобы результаты были идентичны одновременному уравниванию всей сети. Это позволило сократить время вычислений [9].

В 2022 г. National Spatial Reference System (NSRS) была модернизирована. Новая национальная система координат NSRS включает следующие 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.

Для каждой из новых территориальных реализаций определены координаты Эйлера полюса и скорость вращения плиты, которые могут быть использованы для вычисления координат в государственной системе на разные эпохи по изменяющимся во времени координатам системы International GNSS Service (IGS). Схема получения разных наборов геодезических данных по исходным данным ГНСС-изменений с помощью сервисов и программного обеспечения, предоставляемого National Geodetic Survey (NGS), представлена в работе [9].

Система отсчета New Zealand Geodetic Datum 2000 (NZGD2000)

Государственная система координат Новой Зеландии – New Zealand Geodetic Datum 2000 (NZGD2000) – является примером реализации другого подхода к установлению взаимосвязи национальной системы координат с международной системой отсчета. Система NZGD2000 является статической (в рамках одной версии) и поддерживает взаимосвязь с международными системами отсчета с помощью деформационной модели [10].

В системе отсчета NZGD2000 координаты объектов являются неизменными (до введения обновлений путем ввода новых версий NZGD2000), несмотря на то, что территория государства испытывает постоянные перемещения и деформации, связанные с движениями Тихоокеанской и Австралийской тектонических плит, на границе которых расположена Новая Зеландия [11, 12].

Система отсчета NZGD2000 совмещена с Международной системой ITRF96 на эпоху 2000.0. Поэтому процесс определения координат в NZGD2000 на основе координат любой реализации ITRF на заданную эпоху состоит из преобразования координат ITRF из любой реализации в ITRF96 и исключения деформации, которая определяется с помощью модели деформации NZGD2000 на заданную дату. В обратном порядке осуществляется переход от координат в системе NZGD2000 к любой реализации ITRF на определенную дату: к значениям координат добавляется деформация согласно модели NZGD2000 (в результате координаты преобразуются в ITRF96), а затем выполняется переход к нужной реализации ITRF [13]. Для обеспечения устойчивости координат они перемещаются и деформируются вместе с территорией государства и постоянно изменяются относительно Международной земной системы отсчета ITRF [14].

Модель деформации NZGD2000 включает нескольких подмоделей, которые описывают деформации, имеющие различный геофизический характер. По своей сути часть этих подмоделей и представляет собой территори-

альные 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 [14].

Каждый компонент деформационной модели и ее подмоделей задается пространственным представлением и функцией времени. Пространственное представление определяет вектор смещения в любом месте в пределах диапазона работы модели, а функция времени определяет масштабный коэффициент в любое время в пределах допустимого диапазона дат компонента. Таким образом в подмодели задаются значения деформации в указанное время и в указанном месте. Пространственное представление в модели NZGD2000 описано относительно точек регулярной сетки, разбитой по широте и долготе, или вложенной сеткой, которая представляет собой список сеток [11].

Модель деформации периодически обновляется, в том числе вносятся локальные подмодели («заплаты») для учета деформаций, вызванных землетрясениями. После некоторых землетрясений наблюдаются серьезные смещения до нескольких метров, тогда координаты части пунктов модели обновляются с целью сохранения точности. Опубликованная модель деформации содержит информацию для текущей версии, а также для всех предшествующих версий. Каждому компоненту модели назначается начальная версия, в которой он впервые применяется, и версия, после которой он утрачивает значение. Таким образом, состав компонентов разных версий модели является различным [11]. Для того, чтобы отражать сложный характер деформации, которую она моделирует, NZGD2000 со временем становится все более сложной, поскольку приспособливается к локальным деформациям [15].

Такая модель должна сопровождаться простыми и понятными в использовании инструментами, позволяющими пользователю получать координаты пунктов на любую эпоху без серьезного погружения в механику процесса. Для пересчета координат между

различными датами и системами реализован сервис New Zealand Coordinate Conversions [16], а сама модель опубликована в формате открытого кода и инструкций [11, 15].

Системы отсчета Australian Terrestrial Reference Frame 2014 (ATRF2014) и Geocentric Datum of Australia 2000 (GDA2000)

Для обеспечения учета движений земной поверхности, связи с международными системами отсчета и удобства решения прикладных задач пользователей в Австралии реализовано несколько систем отсчета и алгоритмов их взаимосвязи, которые описаны на схемах в работе [17].

Система отсчета GDA2020 основана на реализации ITRF2014 на эпоху 2020.0. Предыдущая система отсчета GDA94 опиралась на реализации ITRF1992 в эпоху 1994.0. Необходимость ввода GDA2020 была вызвана рядом причин: движением Австралийской тектонической плиты (около 7 см в год), из-за которого накапливалось расхождение координат отсчета GDA94 и ITRF1992 (до 1,8 м к 2020 г.), накопившиеся улучшения и наработками по реализации глобальной системы отсчета, различиями между ITRF1992 и ITRF2014, локальными деформациями земной коры на территории Австралии.

Система отсчета GDA2020 так же, как и GDA94, является статической, что удобно для решения многих прикладных задач. Для учета происходящих со временем смещений земной поверхности на территории государства и связи с международной системой ITRF используется другая система отсчета – ATRF2014, координаты которой изменяются со временем из-за тектонического движения Австралийской плиты, поверхность плиты смещается на северо-восток примерно на 7 см в год [18].

Для взаимосвязи GDA2020 и GDA94 разработаны специальные сетки преобразования NTv2, которые представляют собой файлы формата .gsb, используемые для преобразования координат из одной системы отсчета в другую. Файлы с параметрами преобразования

выложены на GitHub [19], также разработан онлайн-сервис для удобного преобразования координат между австралийскими системами отсчета [20].

Разности координат, используемые для преобразования между GDA94 и GDA2020, состоят из двух компонент: конформного, в основном обусловленного тектоническим движением плит, и неконформного (компонента нерегулярных искажений). Первый компонент воспроизводит семипараметрическое преобразование, учитывая таким образом основную составляющую изменения координат между системами GDA94 и GDA2020. Второй компонент обусловлен эффектами второго порядка, к ним относятся: улучшенная реализация глобальной системы отсчета; нерегулярные движения земной поверхности, происходившие с момента ввода GDA94; различия в стратегиях для распространения координат GDA94 на различных территориях. Неконформная составляющая различается по величине и направлению и может достигать величин нескольких дециметров (до 0,5 м) [18].

Сетки параметров преобразования систем отсчета построены по данным более 170 000 точек, в которых были известны координаты для двух австралийских систем отсчета. Для ряда регионов неконформная составляющая имеет регулярный характер со схожими величинами и направлением, а для другой части регионов эта составляющая менее системна [18].

Другие примеры ввода национальных полудинамических систем координат

В Японии применяется национальная система Japanese Geodetic Datum 2000 (JGD2000), которая была совмещена с ITRF94 на эпоху 2000 г. Для преобразования координат пунктов между государственной системой Токуо Datum и национальной системой отсчета Japanese Geodetic Datum 2000 было разработано программное обеспечение TKY2JGD [21].

Программное обеспечение включает в себя файл параметров преобразования и модуль графического представления данных. Программа считывает из файла параметры в четырех углах квадрата сетки, в который попала заданная точка, и выполняет билинейную ин-

терполяцию для определения параметров преобразования координат.

Файл параметров программы TKY2JGD содержит множество наборов региональных параметров преобразования в каждом узле сетки, построенной с интервалом 30 и 45 секунд по широте и долготе, соответственно. Параметры преобразования представлены в виде разностей широт dB и долгот dL и выражены в угловых секундах. Такие сетки построены для 58 островов, вся модель содержит около 13 500 наборов параметров [22].

На территории Индонезии в 2013 г. введена новая национальная геопространственная система отсчета Indonesian Geospatial Reference System 2013 (IGRS 2013). По своей природе это полудинамическая система, которая совместима с глобальной системой ITRF2008 на эпоху 1 января 2012 г. Для преобразования координат между отсчетной эпохой и эпохой наблюдения используется модель деформации, изначальная модель деформации разработана по данным о скоростях смещения GPS-станций в период с 1993 по 2014 г. Данные обрабатывались и анализировались с использованием пакета программного обеспечения GAMIT/GLOBK. Полученное в работе [23] поле скоростей наглядно демонстрирует изменение направлений и величин скоростей смещений, определенных для точек различных тектонических блоков и плит в регионе. Для начальной реализации модели деформации IGRS 2013 использовались данные о четырех тектонических плитах, 7 тектонических блоках и 126 землетрясениях в регионе [24].

В работах [25–27] описан опыт использования систем отсчета Малайзии – реализации национальной системы Geocentric Datum of Malaysia GDM2000 (2006), GDM2000 (2009), GDM2000 (2016) и полудинамической системы отсчета MGRF2020, согласованной с ITRF2014 на эпоху 2020.0 и использующей модель деформаций в виде сетки через 5 угловых минут для полуострова и 10 угловых минут для островной части [27].

Помимо перечисленных регионов, разработкой описанной проблемы занимаются многие другие государства. Например, вопрос установления и учета связи националь-

ной системы National Horizontal Datum (NHD) с международными системами отсчета актуален для Индии [28], в работе [29] рассмотрено решение аналогичной задачи исследователями острова Тайвань, также аналогичные решения для других государств регулярно встречаются в международных периодических изданиях.

Установление взаимосвязи ГСК-2011 с международными системами отсчета на территории Российской Федерации

Проанализировав мировой опыт решения задач установления и поддержания взаимосвязи национальных систем отсчета с международными системами, можно прийти к выводу, что существует два принципиальных подхода к решению проблемы: ввод территориальных реализаций национальной системы координат (в соответствии с крупными тектоническими блоками) и использование национальной системы отсчета в качестве статической в совокупности с деформационной моделью взаимосвязи национальной системы отсчета с международной системой ITRF. Вне зависимости от выбранного подхода решение проблемы требует подробных исследований движений земной поверхности территории государства.

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 на Дальнем Востоке имеет ряд сложностей, связанных с геодинамической активностью региона [30–36]. В исследовании [35] 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. При применении модели для Дальнего Востока результат определения скоростей пунктов Фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС) получается менее качественный.

Большая часть территории Российской Федерации отличается относительной стабильностью и проявляет себя в геодинамическом отношении как цельная часть Евразийской плиты. Но также имеется часть территории России, которая принадлежит Амурской и Охотоморской или Северо-Американской литосферным плитам (по разным источникам) [31–34]. Амурская литосферная плита в ряде моделей движения литосферных плит не рассматривается в качестве отдельного литосферного блока (например, в распространенной модели NUVEL-1A), Охотская (Охотоморская) плита также отсутствует в некоторых распространенных моделях движения литосферных 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 работе [30] содержатся результаты эксперимента ввода территориальной реализации ГСК-2011 для территории Дальнего Востока России и установления модели взаимного поведения систем координат ГСК-2011 и ITRF-2014 для данного региона с использованием в качестве носителей системы ITRF-2014 опорных пунктов, расположенных только на территории Дальневосточного региона. При попытке разработать такую модель с использованием пунктов IGS, относящихся только к территории Дальнего Востока России, было получено неустойчивое решение. Предположительно, по причине малого числа пунктов и бессистемного характера распределения скоростей пунктов. Последняя причина, возможно, связана с принадлежностью пунктов различным тектоническим плитам, смещения которых сложно свести к общей модели. Устойчивого решения удалось добиться, увеличив число пунктов за счет станций IGS, расположенных на территории Аляски и Канады.

Для ГСК-2011 могут быть рассмотрены варианты двух территориальных реализаций: ГСК-2011(EA) – для территории Евразийской литосферной плиты, ГСК-2011(NA) – для территории Северо-Американской литосферной

плиты; трех территориальных реализаций: ГСК-2011(EA) – для территории Евразийской литосферной плиты, ГСК-2011(NA) – для территории Северо-Американской литосферной плиты и ГСК-2011(OK) – для территории Охотомоской литосферной плиты и четырех территориальных реализаций: ГСК-2011(EA), ГСК-2011(AM), ГСК-2011(NA) и ГСК-2011(OK). При вводе территориальных реализаций необходимо определять их связь с основной реализацией ГСК-2011 с течением времени, а на фундаментальную эпоху принимать реализации, совпадающие с основной системой ГСК-2011.

В дальнейшем в зависимости от геодинамической ситуации количество изначально принятых реализаций государственной системы координат ГСК-2011 может изменяться. Так, например, произошло с системой NAD83, которая изначально включала три реализации, а с 2022 г. имеет четыре реализации.

Стоит отметить, что второй подход к решению проблемы (использование национальной системы отсчета в качестве статической в совокупности с деформационной моделью взаимосвязи национальной системы отсчета с международной системой ITRF) предполагает возможность представления для пользователя не явных отдельных территориальных реализаций системы координат ГСК-2011, а некоторых матриц деформационных поправок (по аналогии с тем, как этот процесс организован для системы координат New Zealand Geodetic Datum 2000) [37].

Условия для корректного установления взаимосвязи систем отсчета обеспечиваются, в первую очередь, наличием пунктов носителей систем отсчета, достаточно плотно и относительно равномерно расположенных на территории каждого тектонического блока.

Число пунктов Фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС) на территории Дальнего Востока России в последние годы увеличилось, тем не менее, должно пройти время для получения уверенных значений скоростей смещений пунктов. Международная ГНСС сеть IGS в регионе представлена малым количеством пунктов, такая же ситуация складывается и со многими сетями дифференциальных геодезических станций.

Все станции локализованы в одних и тех же населенных пунктах, и их количество очень невелико для сетей RTKNet, NIVE, PrinNet [38–40] и других операторов.

В случае включения дифференциальных станций в перечень пунктов, определяющих территориальную реализацию, важно обеспечить их тщательный отбор и согласованность значений координат пунктов, для этого необходимо располагать достаточной информацией об эпохе и системе, в которой были определены координаты станции, способе и точности определения. Также для того, чтобы обеспечить согласованность сети, необходимым условием является ее объединение в процессе совместного уравнивания как единого геодезического построения. Этот вопрос является крайне важным, поскольку в противном случае все внутренние деформации и несогласованности повлияют на итоговые значения деформаций территориальной реализации системы координат ГСК-2011.

С точки зрения количества, плотности и относительно равномерного расположения пунктов потенциально интересным является рассмотрение возможности использования для исследований, связанных с территориальными реализациями ГСК-2011 и моделью связи с международными системами отсчета, пунктов Единой сети геодезических наблюдений Дальневосточного отделения Российской Академии Наук (ЕСГН ДВО РАН) [41].

Приведенная сеть сформирована и поддерживается коллективными усилиями институтов ДВО РАН и Камчатским филиалом Геофизической службы РАН [42]. Сеть содержит 21 пункт непрерывных GPS/ГЛОНАСС-наблюдений [41]. Согласно [41, 43] имеется архив данных измерений на пунктах сети ЕСГН ДВО РАН в формате, конвертируемом в RINEX, с 2012 г. К архиву возможна организация настраиваемого удаленного доступа [41].

Помимо основной модели, связанной с движением тектонических плит, также необходимо разработать решения для территорий границ тектонических плит, поскольку характер движения пунктов, расположенных на границах плит, отличается и плохо согласуется с основной моделью движения плиты [30]. Отдельные простран-

ственно-временные решения требуются также для определения положения пунктов, подверженных постсейсмическим смещениям и деформациям по аналогии с локальными подмоделями, предложенными в NZGD2000 Deformation Model [9], или модели постсейсмических деформаций Post-seismic Deformation Models международной системы ITRF [44].

Для обеспечения удобства пользователей все перечисленные выше решения необходимо оформить в виде системы онлайн-сервисов, позволяющих получать геопространственную информацию в требуемой системе отсчета на заданную эпоху.

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 на территории Российской Федерации, или разработка нового решения для описания движения литосферных плит;

- 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;

- программная реализация разработанных решений и их представление в виде, удобном для пользователя (система онлайн-сервисов).

Проанализировав международный опыт решения проблемы, можно прийти к выводу, что наиболее распространенным и удобным для

пользователей является второй путь решения проблемы – использование национальной системы отсчета в качестве статической и разработки модели ее взаимосвязи с реализациями международной системы отчета ITRF. В случае выбора такого варианта решения перечень рассматриваемых вопросов будет похожим, но полученная информация будет использоваться для определения параметров связи и построения деформационной модели взаимосвязи между системами отсчета.

Для разработки такой модели понадобится время и достаточно подробные исходные данные о смещениях земной поверхности, поэтому наиболее рациональным способом построения такой модели является ее постепенное усложнение, по мере усложнения можно выделить четыре приближения модели:

- первое приближение: реализация на основе одной из существующих моделей движения литосферных плит с разработкой решений для границ плит;

- второе приближение: реализация модели, в которой параметры движения внутри блоков уточнены по многолетним геодезическим данным;

- третье приближение: реализация модели, содержащей, помимо движений литосферных плит, региональные составляющие взаимосвязи систем;

- четвертое приближение: «умная» реализация модели, способная самостоятельно определять и обновлять параметры взаимосвязи.

Все приближения также должны предполагать возможность дополнения модели локальными решениями, учитывающими последствия сейсмических событий для территорий, испытывающих постсейсмические деформации, а также выпуск новых версий деформационной модели и алгоритмы их согласования с предыдущими версиями.

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., Дворкин В. В., Карпик А. П., Липатников Л. А., Сорокин С. Д., Стеблов Г. М. Проблемы и перспективы развития активных спутниковых геодезических сетей в России и их интеграции в ITRF // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 1. – С. 6–27.
2. Сурнин Ю. В. О корректном применении международной терминологии «ReferenceSystem» и «ReferenceFrame» к понятиям «система координат» и «координатная основа» в геодезической практике России // Геодезия и картография. – 2015. – № 8. – С. 2–9. – DOI 10.22389/0016-7126-2015-902-8-2-9.
3. Дорогова И. Е., Дербенев К. В. Глобальные вихревые движения блоков земной поверхности // // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 1. – С. 237–240.
4. Дорогова И. Е. Изучение горизонтальных движений земной коры вращательного характера по данным геодезических наблюдений // Геодезия и картография. – 2013. – № 4. – С. 37–40.
5. Дорогова И. Е. Влияние выбора исходных пунктов на результаты уравнивания повторных геодезических измерений // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 1. – С. 209–213.
6. Об установлении государственных систем координат, государственной системы высот и государственной гравиметрической системы : постановление Правительства РФ от 24.11.2016 года № 1240 [Электронный ресурс]. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_207750/ (дата обращения: 30.09.2023).
7. Об утверждении геометрических и физических числовых геодезических параметров государственной геодезической системы координат 2011 года : приказ Росреестра от 23.03.2016 № П/0134 [Электронный ресурс]. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_198787/ (дата обращения: 30.09.2023).
8. Argus D. F., Gordon R. G. and DeMets C. Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame [Electronic resource] // *Geochem. Geophys. Geosyst*, 2011. – V. 12. – № 11. – DOI 10.1029/2011gc003751.
9. 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) [Electronic resource]. – URL: <https://www.ngs.noaa.gov/web/surveys/NA2011> (дата обращения: 17.09.2023).
10. 1NZGD2000 Deformation Model Format Land Information New Zealand, 17 June 2013 [Electronic resource] // GitHub. – URL: <https://github.com/linz/nzgd2000-deformation-model/tree/master/documentation/NZGD2000DeformationModelFormat.docx> (дата обращения: 17.09.2023).
11. Standard for New Zealand Geodetic Datum 2000 LINZS25000 Effective date: 16 November 2007 Office of the Surveyor-General Land Information New Zealand [Electronic resource]. – URL: <https://www.linz.govt.nz/regulatory/25000> (дата обращения: 17.09.2023).
12. OSG Technical Report 5: Realisation of the New Zealand Geodetic Datum 2000 1 June 2000 Land Information New Zealand [Electronic resource]. – URL: https://www.linz.govt.nz/system/files_force/media/file-attachments/tr05-realisation-of-nzgd2000-2000.pdf (дата обращения: 15.09.2023).
13. Transforming between ITRF and NZGD2000 Land Information New Zealand, 9 May 2017 [Electronic resource] // GitHub – URL: https://github.com/linz/nzgd2000-deformation-model/tree/master/documentation/ITRF_to_NZGD2000.docx (дата обращения: 17.09.2023).
14. NZGD2000 Deformation Model // Toitū Te Whenua Land Information New Zealand [Electronic resource]. – 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: 17.09.2023).
15. Blick G., Donnelly N., Jordan A. The Practical Implications and Limitations of the Introduction of a Semi-Dynamic Datum – A New Zealand Case Study // *Geodetic Reference Frames. International Association of Geodesy Symposia*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. – Vol 134. – DOI 10.1007/978-3-642-00860-3_18.
16. New Zealand Coordinate Conversions [Electronic resource]. – URL: <https://www.geodesy.linz.govt.nz/concord> (дата обращения: 21.04.2023).
17. Geoscience Australia. Australian Geospatial Reference System/ [Electronic resource]. – URL: <https://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/australian-geospatial-reference-system> (дата обращения: 17.09.2023).
18. Geocentric Datum of Australia 2020. Technical Manual 1. Version 1.2 Intergovernmental Committee on Surveying and Mapping. – 77 p.
19. GDA Transformation products and tools [Electronic resource]. – URL: <https://www.icsm.gov.au/datum/gda-transformation-products-and-tools> (дата обращения: 17.09.2023).
20. ICSM transformation grids. [Electronic resource]. – URL: https://github.com/icsm-au/transformation_grids/tree/373affdf4c00bd7f0b1d43a012551d1c9b31b498 (дата обращения: 21.04.2023).
21. TKY2JGD. [Electronic resource]. – URL : <https://github.com/mugwort-rc/TKY2JGD> (дата обращения : 11.08.2023).
22. Tobita M. Datum transformation software TKY2JGD from Tokyo Datum to a geocentric reference system [Electronic resource] // IUGG2003, Japan as G04/08P/D-027 on July 8, 2003. – DOI 10.13140/RG.2.2.17427.99368.
23. Susilo S. et al. On the Development of Deformation Model for the Indonesian Geospatial Reference System 2013. [Electronic resource]. – URL : https://www.researchgate.net/publication/304523480_On_the_Development_of_Deformation_Model_for_the_Indonesian_Geospatial_Reference_System_2013 (дата обращения : 11.05.2023).
24. Semi-Dynamic Datum of Indonesia // FIG/IAG/UN-GGIM-AP/ICG/GSI/JFS Technical Seminar Reference Frame in Practice Kobe, Japan, 29-30 July 2017. [Electronic resource]. – URL: https://fig.net/resources/proceedings/2017/07_refframe_japan/03%20S2-2%20Anonius%20Wijanarto.pdf (дата обращения : 11.05.2023).
25. Suryati M. S., Tajul A. M., Kamaludin O., Rusli O. The Geocentric Datum of Malaysia: Preliminary Assessment and Implications // *Geoinformation for Informed Decisions*. [Electronic resource]. – URL : https://doi.org/10.1007/978-3-319-03644-1_5 (дата обращения : 11.05.2023).
26. Jaffar N. J., Musa T. A., Aris W. A. W. Assessment of geocentric datum of Malaysia 2000 (GDM2000) [Electronic resource] // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-4/W16, 2019 6th International Conference on Geomatics and Geospatial Technology (GGT 2019), 1–3 October 2019, Kuala Lumpur, Malaysia*. – DOI 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W16-271-2019.
27. Azhari M. et al. Semi-kinematic geodetic reference frame based on the ITRF2014 for Malaysia [Electronic resource] // *J. Geod. Sci.* 2020; 10:91–109. – URL: <https://doi.org/10.1515/jogs-2020-0108>.
28. Dhar S. et al. Stable and upgraded horizontal datum for India [Electronic resource] // *Current Science*, 2022. – Vol. 123. – №. 1. – P 43-51. – DOI 10.18520/cs/v123/i1/43-51.
29. Chen K. H., Chuang R. Y., Ching K. E. Realization approach of non-linear post-seismic deformation model for Taiwan semi-kinematic reference frame [Electronic resource] // *Earth, Planets and Space*, 2020. – Vol. 72. – № 75. – DOI 10.1186/s40623-020-01209-y.
30. 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.

31. Левин В. Е., Бахтиаров В. Ф., Титков Н. Н. и др. Современные движения земной коры (СЗДК) на Камчатке // Физика Земли. – 2014. – № 6. – С. 17–36.
32. Прытков А. С., Василенко Н. Ф., Фролов Д. И. Современная геодинамика Курильской зоны субдукции // Тихоокеанская геология. – 2017. – Т. 36, № 1. – С. 23–28.
33. Стеблов Г. М., Василенко Н. Ф., Прытков А. С. и др. Динамика Курило-Камчатской зоны субдукции по данным GPS // Физика Земли. – 2010. – № 5. – С. 77–82.
34. Габсатаров Ю. В., Стеблов Г. М., Фролов Д. И. Результаты новых GPS-наблюдений в области Беринговой микроплиты // Физика Земли. – 2013. – № 3. – С. 114–118.
35. Бовшин Н. А. Высокоточные координатные GNSS-определения в системе ГСК-2011 // Геодезия и картография. – 2019. – № 2. – С. 2–14. – DOI 10.22389/0016-7126-2019-944-2-2-14.
36. Липатников Л. А. Проверка опубликованных значений скоростей пунктов ФАГС в новой государственной системе координат ГСК-2011 // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Международн. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 2. – С. 86–91.
37. NZGD2000-deformation-model [Electronic resource] // GitHub – URL: <https://github.com/linz/nzgd2000-deformation-model> (дата обращения: 30.04.2023).
38. RTKNet – сеть базовых станций RTK [Electronic resource]. – URL: <https://rtknet.ru> (дата обращения: 30.04.2023).
39. Система NIVE [Electronic resource]. – URL: <https://hive.geosystems.aero/map> (дата обращения: 30.04.2023).
40. Сеть базовых станций PrinNet [Electronic resource]. – URL: https://www.prin.ru/seti_referencyh_stancij/prinnet (дата обращения: 30.04.2023).
41. Сорокин А. А., Королев С. П., Шестаков Н. В. и др. Организация работы с данными глобальных навигационных спутниковых систем для комплексного исследования современных геодинамических процессов на юге Дальнего Востока России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14, № 3. – С. 158–172.
42. Быков В. Г., Шестаков Н. В., Герасименко М. Д. и др. Единая сеть геодинамических наблюдений ДВО РАН: становление, десять лет развития, основные достижения // Вестник ДВО РАН. – 2020. – № 3. – С. 5–24.
43. Sorokin A. A., Makogonov S. I., Korolev S. P. The information infrastructure for collective scientific work in the Far East of Russia [Electronic resource] // Sci. Techn. Inform. Proc., 2017. – Vol. 4. – P. 302–304. – DOI 10.3103/S0147688217040153.
44. ITRF2014: Equations of post-seismic deformation models [Electronic resource]. – URL: <https://itrf.ign.fr/docs/solutions/itrf2014/itrf2014psdmodeleqsign.pdf> (дата обращения: 27.04.2023).

Об авторах

Александр Петрович Карпик – доктор технических наук, профессор, ректор.

Инна Евгеньевна Дорогова – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры космической и физической геодезии.

Получено 27.10.2023

© А. П. Карпик, И. Е. Дорогова, 2024

Analysis of world experience in introducing semi-dynamic coordinate systems and territorial implementations of coordinate systems

A. P. Karpik¹, I. E. Dorogova¹✉

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: inna_dorogova@mail.ru

Abstract. In recent years, there has been a worldwide trend of transition from state static coordinate systems to national semi-dynamic reference systems. To correctly implement such a transition, states are developing a number of measures and software for recalculating coordinates between different reference systems. Such software usually includes mathematical models for taking into account geodynamic processes for the territory of a state and algorithms for taking them into account when determining coordinates in a given reference system. State territories often belong to several lithospheric plates; in such situations, displacements of the earth's surface of their regions, as well as the coordinate base, require the development of a more complex mathematical model. The article discusses the experience of solving this problem by other states; the final part presents possible options for solving the problem for the territory of the Russian Federation and the state geodetic coordinate system of 2011 (SGCS-2011).

Keywords: coordinate system, crustal deformation model, geodynamics, coordinate basis, lithospheric plates, crustal movements, territorial implementations of coordinate systems

REFERENCES

1. 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]*, 1(23), 6–27 [in Russian].
2. Surnin, Ju. V. (2015). About correct application of international terminology "Reference System" and "Reference Frame" to "koordinatnaya sistema" and "koordinatnaya osnova" in practice of geodesy in Russia. *Geodezija i kartografija*, 8, 2–9. DOI 10.22389/0016-7126-2015-902-8-2-9 [in Russian].
3. Dorogova, I. E., Derbenev, K.V. (2012). Global whirling movements of the earth's surface blocks *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2012: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2015: International Scientific Conference: Vol. 1]*, 237–240. Novosibirsk: SSUGT [in Russian].
4. Dorogova, I. E. (2013). Study of horizontal movements of the earth's crust of a rotational nature based on geodetic observations. *Geodezija i kartografija*, 4, 37–40 [in Russian].
5. Dorogova, I. E. (2015). Influence of the choice of initial points on the results of adjustment of repeated geodetic measurements. *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2015: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2015: International Scientific Conference: Vol. 1]*, 209–213. Novosibirsk: SSUGT [in Russian].
6. Decree of the Government of the Russian Federation dated No. 1240 of November 24, 2016. *On the establishment of State coordinate systems, the State elevation system and the State gravimetric system*. Retrieved from http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_207750/ (date of the application: 30.09.2023) [in Russian].
7. Order of the Federal Register of 23.03.2016 No. P/0134. *On the approval of geometric and physical numerical geodetic parameters of the state geodetic coordinate system in 2011* Retrieved from http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_198787/ (date of the application: 30.09.2023) [in Russian].

8. Argus, D. F., Gordon, R. G., & DeMets, C. (2011). Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 12., № 11. DOI 10.1029/2011gc003751.
9. 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). Retrieved from <https://www.ngs.noaa.gov/web/surveys/NA2011> (date of the application: 17.09.2023).
10. NZGD2000 Deformation Model Format Land Information New Zealand, 17 June 2013. Retrieved from <https://github.com/linz/nzgd2000-deformation-model/tree/master/documentation/NZGD2000DeformationModelFormat.docx> (date of the application: 17.09.2023).
11. Standard for New Zealand Geodetic Datum 2000 LINZS25000 Effective date: 16 November 2007 Office of the Surveyor-General Land Information New Zealand. Retrieved from <https://www.linz.govt.nz/regulatory/25000> (date of the application: 17.09.2023).
12. OSG Technical Report 5: Realisation of the New Zealand Geodetic Datum 2000 1 June 2000 Land Information New Zealand. Retrieved from https://www.linz.govt.nz/system/files_force/media/file-attachments/tr05-realisation-of-nzgd2000-2000.pdf (date of the application: 15.09.2023).
13. Transforming between ITRF and NZGD2000 Land Information New Zealand, 9 May 2017. Retrieved from https://github.com/linz/nzgd2000-deformation-model/tree/master/documentation/ITRF_to_NZGD2000.docx (date of the application: 17.09.2023).
14. NZGD2000 Deformation Model. *Toitū Te Whenua Land Information New Zealand*. Retrieved from <https://www.linz.govt.nz/data/geodetic-system/datums-projections-and-heights/geodetic-datums/new-zealand-geodetic-datum-2000-nzgd2000/nzgd2000-deformation-model> (date of the application: 17.09.2023).
15. Blick, G., Donnelly, N., & Jordan, A. (2009). The Practical Implications and Limitations of the Introduction of a Semi-Dynamic Datum – A New Zealand Case Study. *Geodetic Reference Frames. International Association of Geodesy Symposia*, 134. DOI 10.1007/978-3-642-00860-3_18.
16. *New Zealand Coordinate Conversions*. Retrieved from <https://www.geodesy.linz.govt.nz/concord> (date of the application: 21.04.2023).
17. *Geoscience Australia. Australian Geospatial Reference System*. Retrieved from <https://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/australian-geospatial-reference-system> (date of the application: 17.09.2023).
18. *Geocentric Datum of Australia 2020. Technical Manual 1. Version 1.2 Intergovernmental Committee on Surveying and Mapping*, 77 p.
19. *GDA Transformation products and tools*. Retrieved from <https://www.icsm.gov.au/datum/gda-transformation-products-and-tools> (date of the application: 17.09.2023).
20. *ICSM transformation grids*. Retrieved from https://github.com/icsm-au/transformation_grids/tree/373affdf4c00bd7f0b1d43a012551d1c9b31b498 (date of the application: 21.04.2023).
21. *TKY2JGD*. Retrieved from <https://github.com/mugwort-rc/TKY2JGD> (date of the application: 11.08.2023).
22. Tobita, M. (2003). Datum transformation software TKY2JGD from Tokyo Datum to a geocentric reference system. *IUGG2003*, DOI 10.13140/RG.2.2.17427.99368.
23. Susilo, S., & et al. (2013) On the Development of Deformation Model for the Indonesian Geospatial Reference System 2013. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/304523480_On_the_Development_of_Deformation_Model_for_the_Indonesian_Geospatial_Reference_System_2013 (date of the application: 11.05.2023).
24. Semi-Dynamic Datum of Indonesia. *FIG/IAG/UN-GGIM-AP/ICG/GSI/JFS Technical Seminar Reference Frame in Practice Kobe, Japan*, 29–30 July 2017. Retrieved from https://fig.net/resources/proceedings/2017/07_refframe_japan/03%20S2-2%20Anonius%20Wijanarto.pdf (date of the application: 11.05.2023).

25. Suryati, M. S., Tajul, A. M., Kamaludin, O., & Rusli, O. The Geocentric Datum of Malaysia: Preliminary Assessment and Implications. *Geoinformation for Informed Decisions*. Retrieved from https://doi.org/10.1007/978-3-319-03644-1_5 (date of the application: 11.05.2023).
26. Jaffar, N. J., Musa, T. A., & Aris, W. A. W. Assessment of geocentric datum of Malaysia 2000 (GDM2000). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLII-4/W16, 2019 6th International Conference on Geomatics and Geospatial Technology (GGT 2019), 1–3 October 2019, Kuala Lumpur, Malaysia. DOI 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W16-271-2019.
27. Azhari, M., & et al. (2020). Semi-kinematic geodetic reference frame based on the ITRF2014 for Malaysia. *J. Geod. Sci.*, 10:91–109. Retrieved from <https://doi.org/10.1515/jogs-2020-0108>.
28. Dhar, S., & et al. (2022) Stable and upgraded horizontal datum for India. *Current science*, 123, №1, 43–51. DOI 10.18520/cs/v123/i1/43-51.
29. Chen, K. H., Chuang, R. Y. & Ching, K. E. (2020). Realization approach of non-linear post-seismic deformation model for Taiwan semi-kinematic reference frame. *Earth, Planets and Space*, 72, № 75. DOI 10.1186/s40623-020-01209-y.
30. Bovshin, N. A. (2019). Optimization of conditions for using the GSK-2011 system in the Far Eastern region. *Geodezija i kartografija [Geodesy and cartography]*, 9, 2–9. DOI 10.22389/0016-7126-2019-951-9-2-9 [in Russian].
31. Levin, V. E., Bahtiarov, V. F., Titkov, N. N., & et al. (2014). Modern crustal movements (MCM) in Kamchatka. *Fizika Zemli [Physics of the Earth]*, 6., 17–36 [in Russian].
32. Prytkov, A. S., Vasilenko, N. F., & Frolo, D. I. (2017). Modern geodynamics of the Kuril subduction zone. *Tihookeanskaja geologija [Pacific Geology]*, 36, № 1, 23–28 [in Russian].
33. Steblou, G. M., Vasilenko, N. F., Prytkov, A. S., & et al (2010). Dynamics of the Kuril-Kamchatka subduction zone according to GPS data. *Fizika Zemli [Physics of the Earth]*, 5, 77–82 [in Russian].
34. Gabsatarov, Ju. V., Steblou, G. M., Frolov, D. I. (2013). Results of new GPS observations in the Bering microplate region. *Fizika Zemli [Physics of the Earth]*, 3, 114–118 [in Russian].
35. Bovshin, N. A. (2019). High-precision coordinate GNSS determinations in the GSK-2011 system. *Geodezija i kartografija [Geodesy and cartography]*, 2, 2–14. DOI 10.22389/0016-7126-2019-944-2-2-14 [in Russian].
36. Lipatnikov, L. A. (2016). Checking the published speed values of FAGS points in the new state coordinate system GSK-2011. *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2016: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1, №2 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2016: International Scientific Conference: Vol. 1, №2]*, 86–91. Novosibirsk: SSUGT [in Russian].
37. NZGD2000-deformation-model. Retrieved from <https://github.com/linz/nzgd2000-deformation-model> (date of the application: 30.04.2023).
38. RTKNet – RTK base station networ. Retrieved from <https://rtknet.ru> (date of the application: 30.04.2023).
39. Sistema HIVE. Retrieved from <https://hive.geosystems.aero/map> (date of the application: 30.04.2023).
40. PrinNet base station network. Retrieved from https://www.prin.ru/seti_referencyh_stancij/prinnet (date of the application: 30.04.2023).
41. Sorokin, A. A., Korolev S. P., Shestakov, N. V & et al. (2017). Organization of work with data from global navigation satellite systems for a comprehensive study of modern geodynamic processes in the south of the Russian Far East. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa [Modern problems of remote sensing of the Earth from space]*, 14, № 3, 158–172 [in Russian].
42. Bykov, V. G., Shestakov, N. V Gerasimenko, M. D., & et al. (2020). Unified network of geodynamic observations of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences: formation, ten years of development, main achievements. *Vestnik DVO RAN [Vestnik FEB RAS]*, 3, 5–24 [in Russian].

43. Sorokin, A. A., Makogonov, S. I., & Korolev, S. P. (2017). The information infrastructure for collective scientific work in the Far East of Russia. *Sci. Techn. Inform. Proc.*, 4., 302–304. DOI 10.3103/S0147688217040153.

44. ITRF2014: Equations of post-seismic deformation models. Retrieved from <https://itrf.ign.fr/docs/solutions/itrf2014/itrf2014psdmodeleqsign.pdf> (date of the application: 27.04.2023).

Author details

Alexander P. Karpik – D. Sc., Professor, Rector.

Inna. E. Dorogova – Ph. D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Space and Physical Geodesy.

Received 27.10.2023

© *A. P. Karpik, I. E. Dorogova, 2024*