

И. Е. Дорогова¹✉, К. А. Демидов¹

Реализация первого приближения программно-математической модели движений земной коры для пересчета координат пунктов между эпохами

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

Аннотация. В статье рассмотрено первое приближение программно-математической модели движений земной коры для территории Российской Федерации. Модель призвана обеспечить поддержание актуальности государственной системы отсчета, установление и поддержание взаимосвязи национальных систем отсчета с международными системами для территории Российской Федерации. Разработка программно-математической модели скоростей движений земной коры для территории Российской Федерации является многоступенчатым процессом и реализуется путем последовательных приближений. Реализация последующих приближений предполагает наличие многолетних проверенных данных, которые позволят уточнить модель и разработать локальные подмодели. Разработанное на сегодняшний день первое приближение модели уже пригодно к использованию и позволяет уточнять координаты пунктов на территории государства. В приведенном в статье программном обеспечении также предусмотрена функция геокалькулятора, позволяющего выполнять преобразования координат между системами и эпохами наблюдений.

Ключевые слова: геодинамика, деформации земной коры, движения земной поверхности, программное обеспечение, сглаженное поле скоростей

I. E. Dorogova¹✉, K. A. Demidov¹

Implementation of the first approximation of the programmatic and mathematical model of the Earth's crust movements for recalculating the coordinates of points between epochs

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

Abstract. The article considers the first approximation of a software and mathematical model of the movements of the Earth's crust for the territory of the Russian Federation. The model is designed to ensure the maintenance of the relevance of the state reference system, the establishment and maintenance of the relationship of national reference systems with international systems for the territory of the Russian Federation. The development of a software and mathematical model of the speeds of movements of the Earth's crust for the territory of the Russian Federation is a multi-stage process and is implemented through successive approximations. The implementation of subsequent approximations assumes the availability of long-term verified data that will allow us to refine the model and develop local submodels. The first approximation of the model developed to date is already usable and allows you to specify the coordinates of points on the territory of the state. The software described in the article also provides a geocalculator function that allows coordinate transformations between systems and epochs of observations.

Keywords: geodynamics, deformation of the Earth's crust, movements of the Earth's surface, software, smoothed velocity field

Введение

В статьях [1-5] аргументируется важность реализации программно-математической модели скоростей движений земной коры для координатно-временного обеспечения государства. Авторами разработано первое приближение такой модели. Согласно [6] это приближение должно опираться на одну из моделей движений литосферных плит. В качестве опорной модели была выбрана NNR-MORVEL56, обоснование преимуществ данной модели приводится в [7]. Поскольку на границах плит происходит резкий переход от параметров движения одной литосферной плиты к параметрам другой плиты, в работе [8] описан способ автоматизации сглаживания скачков скоростей движений земной коры. Также для удобства представления программно-математической модели авторами разработано программное обеспечение для построения регулярной сетки скоростей движений земной коры с заданным шагом, которое описано в статье [9].

В данной статье рассмотрена программная реализация первого приближения модели, проанализированы некоторые результаты вычисления скоростей по модели, перспективы ее усовершенствования, а также описан интерфейс представления программно-математической модели для пользователей и возможности ее практического применения для преобразования координат между эпохами наблюдений.

Реализация первого приближения программно-математической модели движения земной коры

Процесс программной реализации модели движения земной коры с помощью готовых и дополнительно разработанных модулей и функций языка Python представлен в работах [6-9]. В первом приближении используется модель параметров движения литосферных плит NNR-MORVEL56, границы плит из модели PB2002 [10] и формулы, приведенные в работе [6]. С помощью упомянутых инструментов была получена программно-математическая реализация модели движения блоков земной коры, расширенный интерфейс которой приведен на рис. 1. Программа представлена в двух вариантах: имеет пользовательский интерфейс (окно для ввода исходных данных), а также расширенный (исследовательский) интерфейс, который предполагает возможность изменения ряда настроек, а также преобразование координат пунктов с использованием модели [6].

The image shows a graphical user interface for a software application. It contains several input fields and controls:

- Three input fields for coordinates: "Введите координату X", "Введите координату Y", and "Введите координату Z". To the right of each field is a label and a value: "wX 0", "wY 0", and "wZ 0".
- Two dropdown menus: "Выберите границы" (set to "PB2002") and "Выберите модель" (set to "ITRF2014").
- A checkbox labeled "Пересчёт на эпоху" (unchecked).
- Two more input fields: "Начальная эпоха" and "Эпоха наблюдения".
- A button labeled "Вычислить!" (Calculate!).

Рис. 1. Интерфейс программно-математической модели движений земной коры

Для проверки работы программы были выбраны два пункта фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС), для которых программа не будет выполнять сглаживания, а также 3 пункта ФАГС, для которых будет выполняться сглаживание скоростей. Были выбраны следующие пункты: NOYA (Ноябрьск), EKTG (Екатеринбург), IRKO (Иркутск), VLDV (Владивосток), а также BARE (Баренцбург).

Для проверки работы программного обеспечения был использован калькулятор UNAVCO [11]. Выполнялось сравнение результатов, вычисленных с помощью программно-математической модели (ПММ) и через онлайн калькулятор UNAVCO. Результаты вычислений, а также их разности представлены в таблицах 1, 2.

Таблица 1

Значения скоростей в пространственной топоцентрической системе координат

Имя пункта	RGS-Centre [12]		UNAVCO [11]		ПММ	
	V_E , м/год	V_N , м/год	V_E , м/год	V_N , м/год	V_E , м/год	V_N , м/год
NOYA	0,0252	0,0026	0,0253	0,0016	0,0253	0,0017
EKTG	0,0248	0,0067	0,0258	0,0058	0,0258	0,0058
IRKO	0,0254	-0,0068	0,0225	-0,0083	0,0266	-0,0088
VLDV	0,0303	-0,0172	0,0241	-0,0129	0,0144	-0,0131
BARE	0,0161	0,0171	0,0112	0,0153	0,0057	0,0186

Таблица 2

Разность скоростей в пространственной топоцентрической системе координат

Имя пункта	RGS-Centre – ПММ		UNAVCO – ПММ		RGS-Centre – UNAVCO	
	V_E , м/год	V_N , м/год	V_E , м/год	V_N , м/год	V_E , м/год	V_N , м/год
NOYA	-0,0001	0,0009	0,0000	-0,0001	-0,0001	-0,0010
EKTG	-0,0010	0,0009	0,0000	0,0000	-0,0010	-0,0009
IRKO	-0,0012	0,0020	-0,0041	0,0005	0,0029	0,0015
VLDV	0,0159	-0,0041	0,0097	0,0002	0,0062	-0,0043
BARE	0,0104	-0,0015	0,0055	-0,0033	0,0049	0,0018

Рассмотрев полученные разности, можно сказать, что программа работает корректно и на первых двух пунктах (не подвергавшихся сглаживанию скоростей движения и не относящихся к буферным зонам) результаты получения скоростей смещения пунктов совпадают. На следующих трех пунктах, находящихся в непосредственной близости к границам литосферных плит, можно заметить разности до 1,5 см в скоростях, определенных разными методами. Значительные разности между величинами скоростей смещений этих пунктов, определенных RGS-Centre и UNAVCO говорят о том, что на данных территориях модели движения плит хуже согласуются с результатами натурных наблюдений (возможно из-за локальных

особенностей движений земной коры). А значительные разности между скоростями, определенными в RGS-Centre и программно-математической модели говорят о том, что сглаживание скоростей на этих территориях также не отражает действительной картины распределения скоростей смещений, а лишь позволяет предварительно сгладить общее поле скоростей смещений, которое затем должно быть дополнено локальными моделями, опирающимися на реально наблюдаемые скорости смещений, полученные из многолетних наблюдений.

Возможности использования модели для преобразования координат

Разработанная модель движений земной коры используется при вычислении координат пунктов в системе ГСК-2011 на различные эпохи наблюдений, которое также реализовано в программно-математической модели.

Пример схемы преобразования на заданную эпоху наблюдений координат из системы ГСК-2011 в СК-42/СК-95 приведен на рис. 2. Системы СК-42/СК-95 используются как статистические, поэтому в этих системах координаты пунктов на эпоху наблюдений равны координатам соответствующих пунктов на эпоху 2011.0, в системе ГСК-2011 реализован пересчет координат пунктов на эпоху наблюдений с использованием программно-математической модели движений земной коры.



Рис. 2. Схема преобразования координат точки из государственных систем СК-42/СК-95 в государственную геодезическую систему координат ГСК-2011 на эпоху XXXX.XX

В системах ITRF 2008/2014/2020 для перехода между эпохами наблюдений используются модели движения земной коры, соответствующие выбранной системе. Например, на рис.3 представлена схема преобразования координат на произвольную эпоху наблюдений между системами ГСК-2011 и ITRF2020. ITRF2008 является промежуточной системой для реализации перехода, использованы параметры связи этой системы с ITRF2020 на эпоху 2015.00, а также соответствующие этим системам модели движения земной коры ITRF2020 и ITRF2008. Промежуточные преобразования необходимы чтобы осуществить переход согласно [13], в котором приведены параметры связи между системами ITRF2008 и ГСК-2011 на эпоху 2011.00.

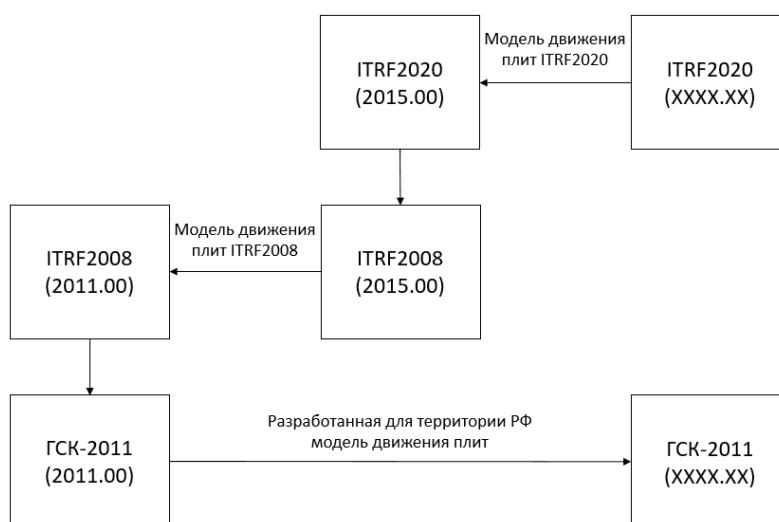


Рис. 3. Схема преобразования координат точки из международной системы ITRF2020 в государственную геодезическую систему координат ГСК-2011 на эпоху XXXX.XX

Перспективы усовершенствования программно-математической модели

На данный момент реализовано первое приближение программно-математической модели. Разработка последующих приближений [7] предполагает наличие многолетних проверенных данных, которые позволят уточнить модель и разработать локальные подмодели, работа в этом направлении уже ведется.

В настоящее время разрабатывается первое уточнение модели по результатам многолетних наблюдений пунктов ФАГС, многие из которых в момент начала работы над программно-математической моделью только закладывались. За прошедшее время на этих пунктах накопился архив наблюдений, который может быть использован для уточнения модели.

Также проводится исследование возможностей применения результатов измерений дифференциальных геодезических станций для разработки локальных решений для сейсмоактивных регионов. Запланирована разработка алгоритмов учета комейсмических и постсейсмических смещений территорий.

Параллельно ведется работа в направлении автоматизации получения данных и отдельных вычислительных процессов модели для обеспечения перспективы перехода к «умной» реализации модели, способной частично самостоятельно определять и обновлять параметры по полученным данным.

Заключение

Таким образом разработка программно-математической модели скоростей движений земной коры для территории Российской Федерации является сложным многоступенчатым процессом. На пути к конечному результату предполагается разработка ряда приближений, содержащих новые данные и подмодели. Этот процесс необходим для поддержания актуальности государственной системы отсчета и обеспечения ее взаимосвязи с мировыми системами отсчета. Разработанное на сегодняшний день первое приближение уже пригодно к ис-

пользованию и позволяет уточнять координаты пунктов на территории государства. После разработки более подробных региональных и локальных решений для сейсмоактивных регионов должна увеличиться точность определения скоростей движения земной коры для этих регионов, а разработка локальных решений для постсейсмических и косейсмических деформаций и привлечение данных дифференциальных геодезических станций позволит сделать программно-математическую модель динамической.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках СЧ НИР «ГЕОТЕХ-КВАНТ-3» с целью повышения точности координатно-временных определений на территории Российской Федерации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Карпик 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
- 2 Geoscience Australia. Australian Geospatial Reference System/ – URL: <https://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/australian-geospatial-reference-system> (дата обращения: 17.09.2023).
- 3 Geocentric Datum of Australia 2020. Technical Manual 1. Version 1.2 Intergovernmental Committee on Surveying and Mapping. – 77 p.
- 4 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).
- 5 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.
- 6 Дорогова И.Е., Разработка программно-математической модели движений земной коры для территории Российской Федерации // Геодезия и картография. – 2024. – No 7. – С. 2-11. DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1009-7-2-1.
- 7 Дорогова И. Е. Принципиальная схема программно-математической модели движений земной коры для территории Российской Федерации / И.Е. Дорогова // Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения: сборник материалов VII Национальной научно-практической конференции с международным участием, 21–24 ноября 2023 г., Новосибирск. В 3 ч. Ч. 3. – Новосибирск : СГУГиТ, 2024. – № 3. – С. 179-185. – DOI 10.33764/2687-041X-2024-3-179-185.
- 8 Дорогова И. Е., Шаповалов А. В. Программное решение для построения сглаженного поля скоростей земной коры на территории Российской Федерации // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XX Международный научный конгресс, 15– 17 мая 2024 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 1: Международная научная конференция «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2024. – С. 165-171 – DOI 10.33764/2618-981X-2024-1-165-171.
- 9 Дорогова И. Е., Сутурин Г. В. Разработка программного обеспечения для билинейной интерполяции на основе цифровой модели движений земной коры // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XX Международный научный конгресс, 15– 17 мая 2024 г., Новосибирск : сборник материалов

в 8 т. Т. 1: Международная научная конференция «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2024. – С. 158-164. – DOI 10.33764/2618-981X-2024-1-158-164.

10 World tectonic plates and boundaries // GitHub [сайт]. – 2025. – URL : <https://github.com/fraxen/tectonicplates> (дата обращения : 15.05.2025). – Режим доступа : общ. доступ. – Текст : электронный.

11 UNAVCO Plate Motion Calculator // University NAVSTAR Consortium [сайт]. – 2023. – URL: <https://www.unavco.org/software/geodetic-utilities/plate-motion-calculator/plate-motion-calculator.html> (дата обращения : 14.05.2025). – Режим доступа : общ. доступ. – Текст : электронный.

12 Центр точных эфемерид RGS Centre [сайт]. – URL: <https://rgs.cgkipd.ru/fags-coords> (дата обращения : 13.05.2025). – Режим доступа : общ. доступ. – Текст : электронный.

13 ГОСТ 32453–2017 Глобальная навигационная спутниковая система. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек. – М: Стандартинформ, 2017. – 20 с.

© И. Е. Дорогова, К. А. Демидов, 2025