

И. Е. Дорогова^{1}, К. А. Демидов¹*

Разработка программной модели движений блоков земной коры для территории Российской Федерации

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

Аннотация. Рассмотрена реализация первого приближения 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. Для решения этих задач модель должна быть достаточно подробной и включать ряд локальных решений. В данной статье рассмотрена реализация первого базового слоя модели, основанного на модели движения литосферных плит MORVEL56. Приведены доводы в пользу выбранной модели движения литосферных плит, описана математическая составляющая и программная реализация модели для территории Российской Федерации. Результаты определения движений точек земной коры сопоставлены с результатами Plate Motion Calculator UNAVCO, отмечено совпадение вычисленных значений до сотых долей миллиметра.

Ключевые слова: геодинамика, модель движений земной коры, блоки земной коры, координатно-временное обеспечение, система отсчета

I. E. Dorogova^{1}, K. A. Demidov¹*

Development of a software model of movements of blocks of the Earth's crust for the territory of the Russian Federation

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

Abstract. The implementation of the first approximation of the software-mathematical model of the movements of the Earth's crust for the territory of the Russian Federation GEO Velocity Model is considered. 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. To solve these problems, the model must be sufficiently detailed and include a number of local solutions. This article discusses the implementation of the first base layer of the model based on the model of motion of lithospheric plates MORVEL56. The arguments in favor of the chosen model of the movement of lithospheric plates are given, the mathematical component and the software implementation of the model for the territory of the Russian Federation are described. The results of determining the movements of the points of the Earth's crust are compared with the results of the Plate Motion Calculator UNAVCO, the coincidence of the calculated values up to hundredths of a millimeter is noted.

Keywords: geodynamics, model of movements of the earth's crust, blocks of the earth's crust, coordinate-time support, reference system

Введение

Программно-математическая модель движений земной коры для территории Российской Федерации представляет собой программное обеспечение, позволяющее определить изменения координат для любой заданной точки территории государства, помимо непосредственно геодинамических задач [1-4] такая модель призвана обеспечить поддержание актуальности государственной системы отсчета и корректной взаимосвязи с международными системами отсчета [5].

Стоит отметить, что рассмотренная в статье программная реализация модели представляет возможность работы как с исследовательским интерфейсом, который позволяет управлять процессом расчета изменений координат (выбирать модель параметров движения литосферных плит, модель границ плит) [6, 7], так и с пользовательским интерфейсом, который позволяет не вникая в процесс расчета, на основе введенных координат точки или группы точек, получить их изменения на заданный интервал времени. некоторых матриц деформационных поправок. Такой подход предполагает последующее размещение программно-математической модели в виде сервиса для пересчета координат точек с учетом движений земной поверхности.

Выбор модели движения литосферных плит

Первое приближение модели движений земной коры для территории Российской Федерации предполагает использование в качестве основы модель движения тектонических блоков. После рассмотрения наиболее распространенных моделей движения литосферных плит на предмет возможности использования в качестве основы первого приближения модели предпочтение было отдано модели NNR-MORVEL56, как наиболее подробной и актуальной модели, опирающейся на современные представления о границах литосферных плит и согласованной моделью границ плит PB2002.

Модель движения литосферных плит ITRF2014 адаптирована к полю скоростей сети из 297 пунктов ITRF2014 и согласована со всеми предыдущими версиями, начиная с модели ITRF2000 (которая, в свою очередь, согласована с моделью NNR-NUVEL-1A), включает в себя координаты полюсов и угловые скорости вращения для 11 плит [8]. Такое количество плит не позволяет корректно описать движения земной коры для территории восточной части Российской Федерации, поэтому модель ITRF2014, также, как и более поздняя реализация ITRF2020 не подходят для использования в качестве основы программно-математической модели движения блоков земной коры на территории Российской Федерации, для этой цели требуется более подробная модель границ плит.

Модель MORVEL построена на основе геофизических, сейсмологических и геодезических данных из архивов и исследований десяти разных стран и использует гораздо больше данных, чем большинство моделей движения литосферных плит. MORVEL является наиболее полной и самосогласованной моделью движения геологических плит. Часть MORVEL, которая определяется по геологическим данным, математически изолирована от части, определенной по данным ГНСС-измерений, чтобы избежать обмена кинематической информацией между этими типами данных, которые усредняют движения плит в совершенно разных временных масштабах.

Одной из более поздних реализаций является модель MORVEL56, которая представляет собой улучшенную версию предыдущих реализаций, дополненную несколькими тектоническими блоками, границы которых были согласованы с PB2002. Для точного определения параметров движения литосферных плит, в модели NNR-MORVEL56 используются надежные, однозначные виды наблюдений, которые можно комбинировать для определения угловой скорости отдельной плиты, а именно: скорость спрединга морского дна; направления океанических трансформных разломов; измерения глобальных систем позиционирования; направления горизонтального сдвига во время землетрясений [9, 10].

NNR-MORVEL56 представляет из себя модель движения литосферных плит, которая состоит из 56 плит. В модель входят 25 плит из ранних версий MORVEL, которые покрывают 97,2% Земли, а также к ним были добавлены 31 небольшая литосферная плита из модели плит Питера Бёрда [11]. Таким образом, модель покрывает всю земную поверхность.

При определении скоростей смещения точек с использованием различных моделей также было обнаружено, что скорости, посчитанные по модели MORVEL2010 отличаются от скоростей, посчитанных по модели MORVEL56 на одну-две сотые доли мм/год. Такое небольшое расхождение объясняется, вероятно, тем, что модели используют одинаковые параметры движения для плит, входящих в состав двух моделей, а разница получается за счет корректировки параметров движения плит для обеспечения условия «No net rotation» при вводе в модель MORVEL56 дополнительных плит. Таким образом, для разработки программного решения укрупненного описания модели движений земной коры наиболее подходящей представляется модель NNR MORVEL56.

Программная реализация модели

Для разработки такого программного обеспечения на Python были использованы различные библиотеки и готовые модули функций, которые облегчают некоторые операции.

Для создания программно-математической модели движений тектонических блоков использовалась математическая основа, приведенная в работе [12]. Для вычисления скорости движения произвольной точки V_X, V_Y, V_Z применяли формулы:

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{R}(t_0), \quad (1)$$

$$\mathbf{R}(t_0) = \begin{bmatrix} \frac{X}{\rho} \\ \frac{Y}{\rho} \\ \frac{Z}{\rho} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

где $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – компоненты скорости вращения плиты;
 X, Y, Z – координаты пункта;
 ρ – количество секунд в радиане.

Для вычисления компонент скоростей V_E, V_N, V_U применялись формулы:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} -\sin L & -\sin B \cos L & \cos B \cos L \\ \cos L & -\sin B \sin L & \cos B \sin L \\ 0 & \cos B & \sin B \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} V_E \\ V_N \\ V_U \end{bmatrix} = \mathbf{R}^T \cdot \begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix}. \quad (4)$$

где \mathbf{R} – матрица преобразования топоцентрических координат в экваториальные;

\mathbf{R}^T – транспонированная матрица поворота.

Для возможности в автоматическом режиме определять принадлежность пункта к той или иной плите, необходимо также задать файл с полигонами, соответствующими границам литосферных плит. Для этого были использованы границы литосферных плит, опубликованные профессором кафедры наук о Земле, планетах и космосе Калифорнийского университета Питера Берда (модель RB2002) [11], данная модель используется в программе по умолчанию, но имеется возможность выбрать другую модель. Визуальное представление границ модели RB2002 приведено на рис. 1.

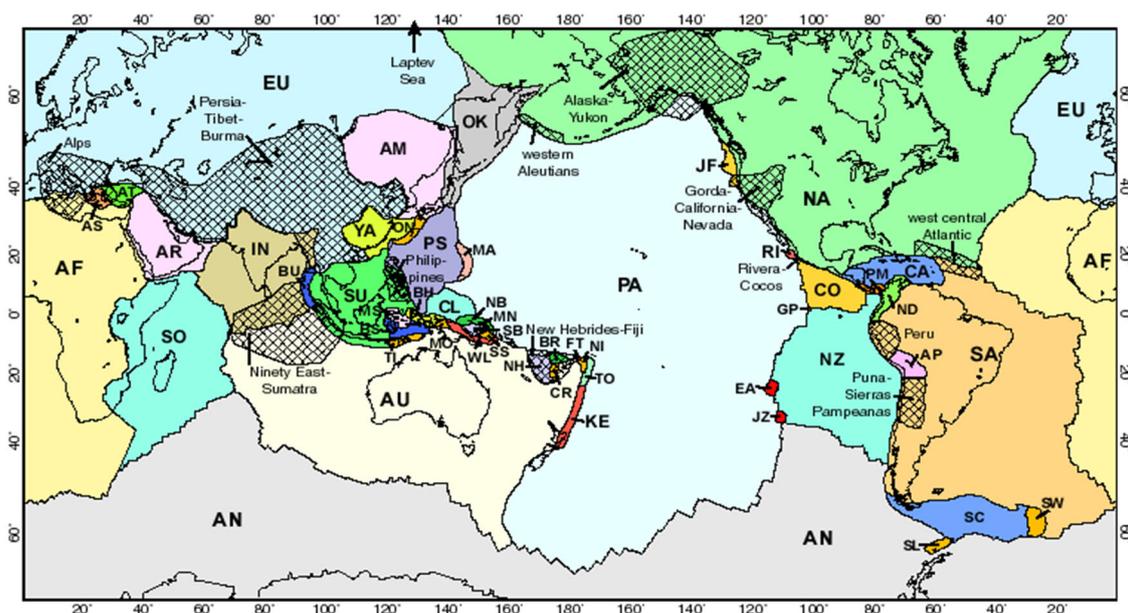


Рис.1. Границы литосферных плит по Питеру Берду (RB2002)

Для интеграции этих значений в программное обеспечение были использованы свободные материалы в виде базы данных GeoJSON [13], которые позволяют считывать информацию из файла и загружать ее в программную реализацию модели. Для обеспечения этой возможности данные были поделены на категории внутри одного списка, такие как «тип», «слой», «код плиты», «название плиты», «координаты границ».

С использованием вышеперечисленных инструментов, была разработана программно-математическая реализация модели движения блоков земной коры под названием «GEO Velocity Model». интерфейс программы представлен на рис. 2. Подробнее процесс создания программной части рассмотрен в [14, 15].

Введите координату X wX 0
Введите координату Y wY 0
Введите координату Z wZ 0
Выберите границы PB2002
Выберите модель ITRF2014
 Пересчёт на эпоху
Начальная эпоха
Эпоха наблюдения
Вычислить!

Рис. 2. Исследовательский интерфейс «GEO Velocity Model»

Для определения смещений принимаются параметры выбранной модели движения плит, выше в качестве наиболее наиболее подходящей представляется модель NNR MORVEL56, эту модель мы использовали для реализации первого приближения модели движений земной поверхности для территории Российской Федерации. Согласно модели MORVEL56 территория Российской Федерации располагается на четырех литосферных плитах: Евразийской, Северо-Американской, Амурской и Охотской. Принадлежность к тектонической плите для точки определяется в автоматическом режиме на основании загруженной модели границ плит. Пример результата вычислений компонент скоростей для точки представлен на рис. 3.

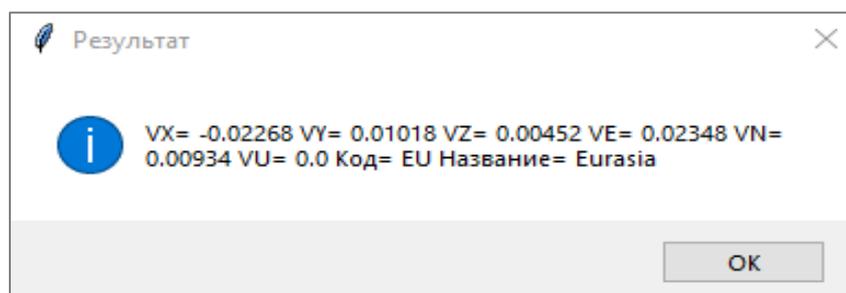


Рис. 3. Результат вычислений скоростей смещения пункта

Используя информацию о плитах, приведенную в формате GeoJSON, можно построить карту с графическим указанием границ плит, по окончании расчетов для отдельной точки программно-математической моделью формируется такая карта с нанесенным пунктом, для которого были рассчитаны скорости. На этой карте указывается положение пункта, а также границы литосферных плит.

Для проверки работы программно-математической модели были посчитаны скорости пунктов ФАГС (фундаментальной астрономо-геодезической сети) с помощью разработанной программно-математической модели GEO Velocity Model и калькулятора Plate Motion Calculator UNAVCO [16]. Результаты расчета в двух программных продуктах совпали до 0,01 мм, однако несколько отличаются от приведенных на сайте Центра точных эфемерид [17], особенно для пунктов, расположенных на Охотской литосферной плите, причем данная особенность наблюдается при вычислениях с использованием различных моделей движения литосферных плит. Возможно, впоследствии при накоплении достаточного объема многолетних данных наблюдений пунктов ФАГС модель будет скорректирована и согласована с этими данными.

Заключение

Анализируя полученные результаты можно сделать вывод, что программно-математическая модель GEO Velocity Model является точным и надежным модулем для вычисления скоростей пунктов, а также определения их принадлежности к литосферным плитам согласно заданной модели. Также в программе реализована возможность выполнения расчета скоростей движений не только для одной точки, а для файла с координатами точек

Следующим этапом разработки программно-математической модели являлась реализация решений для границ тектонических плит. Необходимость разработки отдельных решений для определения скоростей движения точек на границах тектонических плит обусловлена тем, что модели движения литосферных демонстрируют хорошую согласованность результатов с геодезическими данными только для центральных областей тектонических блоков. На границах литосферных плит происходят процессы взаимодействия геологических структур, приводящие к движениям земной коры плохо согласующимся с математической моделью движения плит. Второй причиной отдельного рассмотрения территорий границ литосферных плит является необходимость сглаживания скачков скоростей, возникающих при смене параметров движения между соседними точками на границе плит. Поэтому было принято решение сгладить резкий переход от одних параметров движения к другим путем ввода буферных зон на границах плит, для которых скорости движения точек определяются с использованием сглаживающих функций.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

6. Дорогова И.Е., Дербенев К.В. Глобальные вихревые движения блоков земной поверхности // Интерэкспо Гео-Сибирь 2012. – Т. 1. – № 1. – С. 237-240.
7. Дорогова И.Е. Выявление блоковой структуры области земной коры, испытывающей горизонтальные движения вращательного характера // Геодезия и картография, 2013. – № 5. – С. 36-39.
8. Дорогова И.Е. Изучение горизонтальных движений земной коры вращательного характера по данным геодезических наблюдений // Геодезия и картография, 2013. – № 4. – С. 37-40.
9. Дорогова И.Е., Мелкова А.И. Сравнение существующих моделей движения амурской литосферной плиты // Интерэкспо Гео-Сибирь 2018. – № 1. – С. 116-122.
10. Дорогова И.Е., Блинкова Е.С. О необходимости ввода территориальных реализаций государственной системы координат, обусловленных геодинамическими особенностями территории // Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопрограммное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения, 2023. – № 1. – С. 155-161. – DOI: 10.33764/2687-041X-2023-1-155-161.
11. Дорогова И.Е., Духовников К.С. Разработка геодинамического программного модуля для оценивания деформаций земной коры по результатам геодезических измерений // Вестник СГУГиТ, 2022. – Т. 27. – № 6. – С. 15-27. – DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-6-15-27.
12. Дорогова И.Е., Духовников К.С. Программное обеспечение, сервисы и открытый код для решения задач геодинамики // Интерэкспо Гео-Сибирь 2022. – Т. 1. – С. 138-145. – DOI: 10.33764/2618-981X-2022-1-138-145.
13. Shuanggen, J. A revision of the parameters of the NNR-NUVEL-1A plate velocity model / J. Shuanggen, Z. Wenyaо. – Текст : непосредственный // Journal of Geodynamics. – 2004. – № 38. – С. 85–92. – ISSN 0264-3707.
14. Argus, D. Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame / D. Argus, R. Gordon, C. DeMets. – Текст : непосредственный // American Geophysical Union. – 2011. – № 11. – 13 с. – ISSN 0094-8276.
15. MORVEL and NNR-MORVEL56 information // MORVEL and NNR-MORVEL56 plate velocity estimates and information [сайт]. – 2023. – URL : <http://www.geology.wisc.edu/~chuck/MORVEL/index.html> (дата обращения : 11.05.2023). – Режим доступа : общ. доступ. – Текст : электронный.
16. Bird, P. An updated digital model of plate boundaries / P. Bird. – Текст : непосредственный // An electronic journal of the Earth sciences. – 2003. – № 10. – 52 с. – ISSN 1525-2027.
17. Гиенко, Е. Г. Применение глобальных спутниковых навигационных систем в геодезии и навигации : учебное пособие / Е. Г. Гиенко, К. М. Антонович, Л. А. Липатников. – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. – С. 8–28. – ISBN 978-5-907052-77-2. – Текст : непосредственный.
18. World tectonic plates and boundaries // GitHub [сайт]. – 2023. – URL : <https://github.com/fraxen/tectonicplates> (дата обращения : 04.05.2023). – Режим доступа : общ. доступ. – Текст : электронный.
19. Дорогова И. Е., Демидов К.А. Разработка геодинамического калькулятора для определения параметров движения земной коры // Интерэкспо Гео-Сибирь 2023. – Т. 1. – № 1. – С. 216-223. – DOI: 10.33764/2618-981X-2023-1-1-216-223
20. Дорогова И.Е., Демидов К.А. GEOCALC: Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2023662485, 08.06.2023. Заявка № 2023661780 от 08.06.2023.
21. UNAVCO Plate Motion Calculator // University NAVSTAR Consortium [сайт]. – URL: <https://www.unavco.org/software/geodetic-utilities/plate-motion-calculator/plate-motion-calculator.html> (дата обращения : 11.05.2023). – Режим доступа : общ. доступ. – Текст : электронный.
22. Центр точных эфемерид RGS Centre [сайт]. – URL: <https://rgs-centre.ru/fags-coords> (дата обращения : 11.05.2023). – Режим доступа : общ. доступ. – Текст : электронный.

© И. Е. Дорогова, К. А. Демидов, 2024