

*И. Е. Дорогова<sup>1\*</sup>*

## **Принципиальная схема программно-математической модели движений земной коры для территории Российской Федерации**

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация  
\*e-mail: inna\_dorogova@mail.ru

**Аннотация.** В данной статье рассмотрена структура и принципы организации программно-математической модели движений земной коры, которая призвана обеспечить поддержание актуальности государственной системы отсчета, установление и поддержание взаимосвязи национальных систем отсчета с международными системами для территории Российской Федерации. Приведена общая схема модели движений земной коры, которая состоит из нескольких слоев, включает первый базовый слой, содержащий модель движения тектонических блоков, который дополняется слоями локальных решений. Для разработки модели понадобится время и достаточно подробные исходные данные о смещениях земной поверхности, поэтому наиболее рациональным способом построения такой модели является ее постепенное усложнение, выделены четыре приближения модели, каждое из которых получено путем усложнения предыдущего приближения программно-математической модели.

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

*I. E. Dorogova<sup>1\*</sup>*

## **Schematic schema of a software and mathematical model of the movements of the Earth's crust for the territory of the Russian Federation**

<sup>1</sup>Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation  
\*e-mail: inna\_dorogova@mail.ru

**Abstract.** This article discusses the structure and principles of the organization of a software-mathematical model of the movements of the Earth's crust, which is designed to ensure 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 general scheme of the model of movements of the Earth's crust, which consists of several layers, includes the first base layer containing a model of the movement of tectonic blocks, which is supplemented by layers of local solutions, is given. To develop a model, it will take time and sufficiently detailed initial data on the displacements of the Earth's surface. The most rational way to build such a model is its gradual complication. Four approximations of the model are identified. Each of which approximations is obtained by complicating the previous approximation of the software-mathematical model.

**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 полезна для решения многих научных и практиче-

ских задач, но в первую очередь призвана обеспечить поддержание актуальности государственной системы отсчета и корректной взаимосвязи с международными системами отсчета.

Рассмотрев мировой опыт решения задач установления и поддержания взаимосвязи национальных систем отсчета с международными системами [1-20], можно прийти к выводу, что существует два принципиальных подхода к решению проблемы установления взаимосвязи: 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.

### **Структура модели движений земной коры**

Возможная реализация модели движений земной коры в общем виде представлена на рис. 1, она состоит из нескольких слоев и должна включать базовый первый слой, содержащий модель движения тектонических блоков, который дополняется слоями локальных решений.

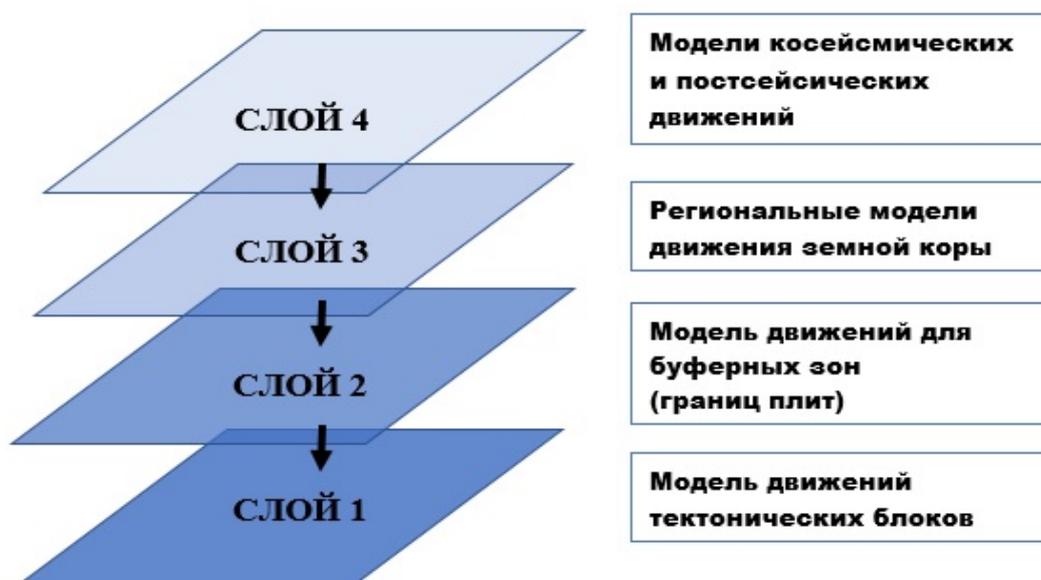


Рис. 1. Принципиальная схема модели движений земной коры

Для пользователя такая модель обычно представлена в виде регулярной сетки, в узлах которой содержатся значения параметров для определения составляющих скорости движения земной коры. Определение скорости движения произвольной точки в такой сетке выполняется с помощью билинейной интерполяции, то есть для определения параметров движения точки используются значения параметров движения ближайших четырех узлов сетки (рис. 2).

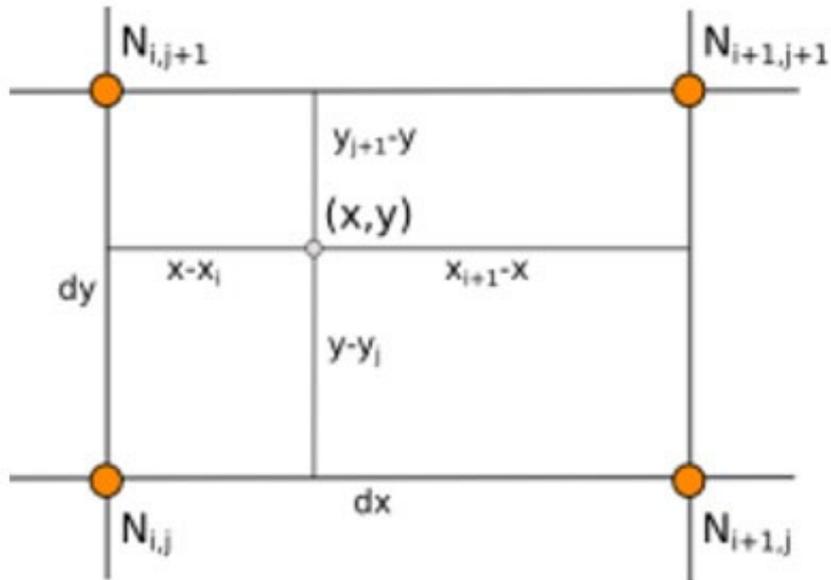


Рис. 2. Схема билинейной интерполяции

Коэффициенты для набора параметров каждого узла в соответствии с рис. 2 определяются по следующим выражениям:

$$\begin{aligned}
 W_{i,j} &= ((x_{i+1}-x)/dx) \cdot ((y_{j+1}-y)/dy) \\
 W_{i+1,j} &= ((x-x_i)/dx) \cdot ((y_{j+1}-y)/dy) \\
 W_{i,j+1} &= ((x_{i+1}-x)/dx) \cdot ((y-y_j)/dy) \\
 W_{i+1,j+1} &= ((x-x_i)/dx) \cdot ((y-y_j)/dy)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Компоненты смещения точки, для которой выполнялась интерполяция, могут быть определены с использованием вычисленных коэффициентов:

$$\begin{aligned}
 de &= W_{i,j} \cdot de_{i,j} + W_{i+1,j} \cdot de_{i+1,j} + W_{i,j+1} \cdot de_{i,j+1} + W_{i+1,j+1} \cdot de_{i+1,j+1} \\
 dn &= W_{i,j} \cdot dn_{i,j} + W_{i+1,j} \cdot dn_{i+1,j} + W_{i,j+1} \cdot dn_{i,j+1} + W_{i+1,j+1} \cdot dn_{i+1,j+1}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Нередко государства разрабатывают программное обеспечение для автоматизации процесса билинейной интерполяции по данным сетки, тогда для того, чтобы определить параметры движения точки, пользователю достаточно ввести ее координаты [6, 9-10, 12].

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 литосферных плит;

– второе приближение: реализация модели, параметры движения блоков в которой согласованы и уточнены по многолетним геодезическим данным с разработкой решений для границ литосферных плит;

– третье приближение: реализация модели, содержащей помимо параметров, обусловленных движениями литосферных плит, региональную составляющую параметров взаимосвязи систем;

– четвертое приближение: «умная» реализация модели, способная самостоятельно определять и обновлять параметры по предоставленным данным.

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

### ***Первое приближение модели движений земной коры***

Детализированное первое приближение программно-математической модели для описания движений блоков земной коры на территории Российской Федерации представлено на рис. 3.

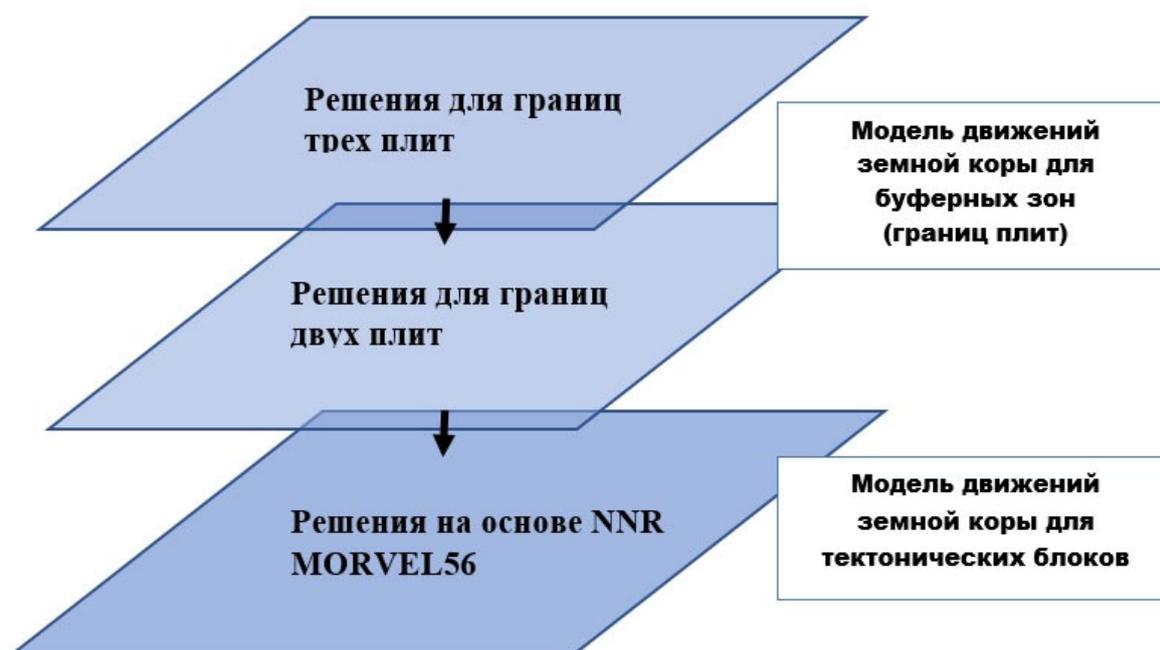


Рис. 3. Детализированная схема первого приближения модели

Первое приближение модели движений земной коры для территории Российской Федерации предполагает использование в качестве основы модели движения тектонических блоков, для этих целей могут использоваться различные модели, на рис. 3 предпочтение отдано одной из наиболее подробных и актуальных моделей движения литосферных плит – MORVEL56.

Первый слой такой модели содержит определение скоростей движения точек земной коры для всей территории Российской Федерации, каждый последующий слой реализуется для локальных территорий и в пределах этих территорий заменяет значения скоростей движения точек, посчитанные в предыдущих слоях, на собственные значения. В настоящее время первый слой модели реализован в виде программно-математической модели [21].

Вторым и третьим слоем в первом приближении модели движений земной коры являются решения, полученные для буферных зон на границах литосферных плит и решения для тройных сочленений, соответственно. Необходимость создания перечисленных слоев связана с особенностями движений пунктов на границах литосферных плит, а также необходимостью обеспечения плавного перехода от параметров движения одной плиты к параметрам другой, устранения резких скачков в значениях скоростей смещений пунктов. Этот этап предполагает обоснование выбора буферных зон,

На данный момент этот этап находится в разработке, выбраны размеры буферных зон и получены некоторые решения для границ литосферных плит, которые теперь предстоит автоматизировать и добавить в программно-математическую модель движений земной коры территории Российской Федерации.

### *Заключение*

Таким образом, в статье рассмотрена общая принципиальная схема программно-математической модели движений земной коры для территории Российской Федерации, а также приведена детализированная схема первого приближения такой модели, которое в настоящее время реализуется на основе модели движения литосферных плит MORVEL56.

Следующим слоем модели должны стать региональные деформации, связанные с учетом движения менее крупных блоков земной коры, активных геологических разломов, составление слоя предполагает использование материалов исследований на региональных и локальных геодинамических полигонах.

Такие районы требуют более гибкого подхода к разработке решений, разной степени подробности представления полученных результатов, приводят к усложнению и большей детализации разрабатываемой программно-математической модели.

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

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 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). – Режим доступа : общ. доступ. – Текст : электронный

2 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). – Режим доступа : общ. доступ. – Текст : электронный
- 3 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).
- 4 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](https://www.linz.govt.nz/system/files_force/media/file_attachments/tr05-realisation-of-nzgd2000-2000.pdf) (дата обращения: 15.09.2022). – Режим доступа : общ. доступ. – Текст : электронный
- 5 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](https://github.com/linz/nzgd2000-deformation-model/tree/master/documentation/ITRF_to_NZGD2000.docx) (дата обращения: 17.09.2022). – Режим доступа : общ. доступ. – Текст : электронный
- 6 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). – Режим доступа : общ. доступ. – Текст : электронный
- 7 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 геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения, 2023. – № 1. – С. 155-161. – DOI: 10.33764/2687-041X-2023-1-155-161.
- 8 Geoscience Australia. Australian Geospatial Reference System/ – URL: <https://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/australian-geospatial-reference-system> (дата обращения: 17.09.2022). – Режим доступа : общ. доступ. – Текст : электронный
- 9 GDA Transformation products and tools. – URL: <https://www.icsm.gov.au/datum/gda-transformation-products-and-tools> (дата обращения: 17.09.2022). – Режим доступа : общ. доступ. – Текст : электронный
- 10 ICSM transformation grids. – URL: [https://github.com/icsm-au/transformation\\_grids/tree/373affdf4c00bd7f0b1d43a012551d1c9b31b498](https://github.com/icsm-au/transformation_grids/tree/373affdf4c00bd7f0b1d43a012551d1c9b31b498) (дата обращения: 21.04.2023). – Режим доступа : общ. доступ. – Текст : электронный
- 11 Geocentric Datum of Australia 2020. Technical Manual 1. Version 1.2 Intergovernmental Committee on Surveying and Mapping. – 77 с
- 12 TKY2JGD. – URL : <https://github.com/mugwort-rc/TKY2JGD> (дата обращения : 11.08.2023). – Режим доступа : общ. доступ. – Текст : электронный
- 13 Mikio TOBITA Datum transformation software TKY2JGD from Tokyo Datum to a geocentric reference system // IUGG2003, Japan as G04/08P/D-027 on July 8, 2003. – DOI: 10.13140/RG.2.2.17427.99368.
- 14 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. – URL : [https://fig.net/resources/proceedings/2017/07\\_refframe\\_japan/03%20S2-2%20Anonius%20Wijanarto.pdf](https://fig.net/resources/proceedings/2017/07_refframe_japan/03%20S2-2%20Anonius%20Wijanarto.pdf) (дата обращения : 11.05.2023). – Режим доступа : общ. доступ. – Текст : электронный
- 15 Дорогова И.Е., Мелкова А.И. Сравнение существующих моделей движения амурской литосферной плиты // Интерэкспо Гео-Сибирь 2018. – № 1. – С. 116-122.
- 16 Sujata Dhar, Nagarajan Balasubramanian, Onkar Dikshit and Harald Schuh. Stable and up-graded horizontal datum for India // CURRENT SCIENCE. – VOL. 123. – NO. 1, 10 JULY 2022. – P 43-51. – doi: 10.18520/cs/v123/i1/43-51.
- 17 Chen K.H., Chuang R.Y. and Ching K.E., 2020, Realization approach of non-linear post-seismic deformation model for Taiwan semi-kinematic reference frame // Earth, Planets and Space (2020). – 72:75. – DOI: 10.1186/s40623-020-01209-y.

18 Suryati Mohd Shariff, Tajul Ariffin Musa, Kamaludin Omar & Rusli Othman The Geocentric Datum of Malaysia: Preliminary Assessment and Implications // Geoinformation for Informed Decisions. – URL : [https://doi.org/10.1007/978-3-319-03644-1\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-03644-1_5) (дата обращения : 11.05.2023). – Режим доступа : общ. доступ. – Текст : электронный.

19 N. J. Jaffar, T.A. Musa , W.A.W. Aris ASSESSMENT OF GEOCENTRIC DATUM OF MALAYSIA 2000 (GDM2000) // 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.

20 M. Azhari et al. Semi-kinematic geodetic reference frame based on the ITRF2014 for Malaysia // J. Geod. Sci. 2020; 10:91–109 DOI: <https://doi.org/10.1515/jogs-2020-0108>.

21 Дорогова И. Е., Демидов К.А. Разработка геодинимического 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.

© И. Е. Дорогова, 2024