

И. Е. Дорогова^{1}, А. В. Шаповалов¹*

Программное решение для построения сглаженного поля скоростей земной коры на территории Российской Федерации

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

* e-mail: inna_dorogova@mail.ru

Аннотация. В статье выполнен обзор принципа работы программного обеспечения для расчета сглаженного поля скоростей движений земной коры для территории Российской Федерации. Использование сглаженных решений позволяет пользователю нивелировать эффект скачков значений скоростей движения земной коры при переходе от параметров движения одной плиты к параметрам движения соседней плиты. Разработанный программный модуль на основе определенных расстояний от точки до границ соседних плит принимает решение о необходимости сглаживания и его типе (двойное/тройное сочленение) и реализует расчет сглаженных значений скоростей движения земной коры на основе выбранного типа сглаживания. Разработанное программное обеспечение может использоваться совместно с другими вычислительными модулями и обеспечивать решение многих задач геодезии и геодинамики. Приведенное в статье программное обеспечение планируется использовать в структуре разрабатываемых онлайн сервисов, а также как часть геокалькулятора, позволяющего выполнять преобразования координат между эпохами наблюдений.

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

I. E. Dorogova^{1}, A. V. Shapovalov¹*

A software solution for constructing a smoothed velocity field of the Earth's crust on the territory of the Russian Federation

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

* e-mail: inna_dorogova@mail.ru

Abstract. The article analyzes the principle of operation of the software for calculating the coordinated velocity field of the Earth's crust of the territory of the Russian Federation. The use of smoothed solutions allows the user to neutralize the effect of jumps in the values of the speeds of movement of the earth's crust during the transition from the motion parameters of one plate to the motion parameters of the neighboring plate. The developed software module, based on certain distances from a point to the boundaries of neighboring plates, makes decision on the need for smoothing and its type (double/triple articulation) and implements the calculation of smoothed values of the speeds of movement of the Earth's crust based on the selected type of smoothing. The developed software can be used in conjunction with other computing modules and provide solutions to many problems of geodesy and geodynamics. The software presented in the article to be used in the structure of the online services being developed, as well as a part of a geocalculator that allows coordinate transformations between epochs of observations.

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

Введение

Изучение движений земной коры является актуальными научным и практическим направлением, которое в последние годы приобретает актуальность также в связи с необходимостью учета этих движений для поддержания государственной координатной основы [1-5].

В работах [1, 6] обоснована необходимость создания программно-математической модели движений земной коры для Российской Федерации. За первое приближение такой модели можно принять программу, основанную на одной из современных моделей движения литосферных плит, например, NNR-MORVEL56, однако на границах плит при расчете скоростей, согласно такой модели, будут наблюдаться скачки значений вычисленных компонент скоростей. Для нивелирования этого эффекта требуется разработать методику сглаживания скоростей движений точек в буферных зонах на границах плит. Авторы статьи предлагают подход к решению этой проблемы и программный модуль для автоматизированного получения решений на границах плит.

Реализация программного модуля расчета скоростей движения земной коры по модели движения литосферных плит

Процесс разработки программного обеспечения для расчета скоростей с помощью средств различных библиотек, готовых модулей и функций языка Python приведен в работах [2, 7-10]. В качестве первого приближения используется модель движения плит NNR-MORVEL56, согласованная с моделью границ плит PB2002 (рис. 1) [11], представленной в формате файла GeoJSON [12], что позволяет определять принадлежность точки плите в автоматическом режиме. Для создания программно-математической модели движений тектонических блоков использовалась математическая основа, приведенная в работе [2].

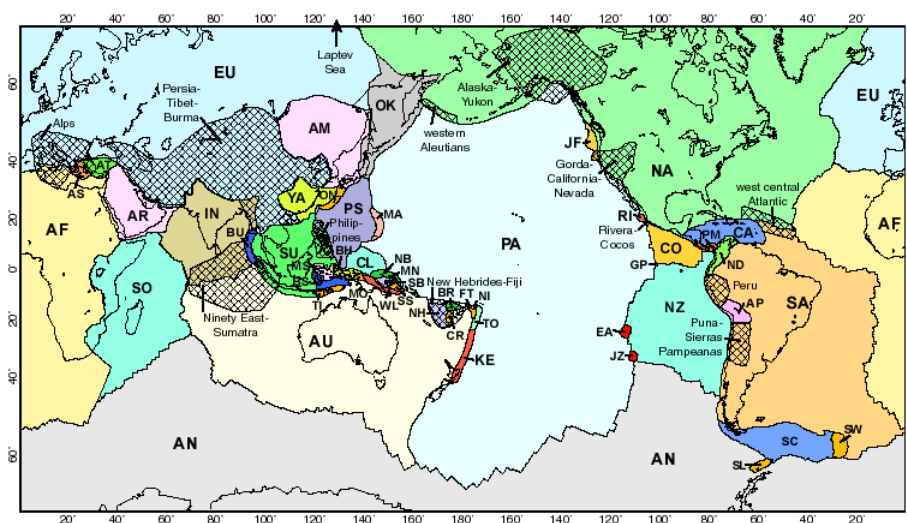


Рис. 1. Границы литосферных плит по Питеру Берду (PB2002) [11]

С использованием перечисленных математических и программных инструментов была разработана программно-математическая реализация модели движения блоков земной коры. Подробнее интерфейс и процесс создания программы представлен в работах [7, 9, 10].

Программное обеспечение позволяет менять выбор модели движения литосферных плит, тогда внутри программы осуществляется переименование и/или объединение плит согласно выбранной модели.

Суть работы расчетного модуля заключается в определении принадлежности пункта определенной плите (согласно выбранной модели), а также определении наименьших расстояний до границы плиты, которой принадлежит точка и соседних плит, этот процесс реализован как поиск точек границ, ближайших к выбранной точке. Определенные расстояния понадобятся для принятия решений о расчете сглаженных значений скоростей, которые также реализованы в программной модели.

Реализация программного модуля сглаживания скоростей земной коры

Созданная описанным способом модель будет содержать зоны резкой смены компонент скоростей смещений. Для устранения резких скачков значений и получения сглаженного поля скоростей движений точек при переходе на границе литосферных плит от одних параметров к другим могут быть введены буферные зоны.

Идея метода сглаживания скачков скоростей на границах плит заключается в том, что создается буферная зона, внутри которой задается закон постепенного перехода скоростей, от тех, что характерны для одной плиты к тем, что характерны для другой.

Границы большинства плит на территории России имеют однозначно определенные очертания, поэтому для них возможен выбор буферной зоны равномерной ширины, размер буферной зоны может назначаться пользователем программно-математической модели, по умолчанию был назначен размер зоны 500 км.

Для Амурской литосферной плиты была задана буферная зона, характеризующаяся переменной шириной и определяемая зоной покрытия вариантов границ плиты, которые представлены в работе [13].

На рис. 2 продемонстрирована буферная зона, полученная для Амурской литосферной плиты с учетом расширенной зоны неопределенности решений и ее границ. Представленная зона включает все крайние варианты границ этой литосферной плиты.

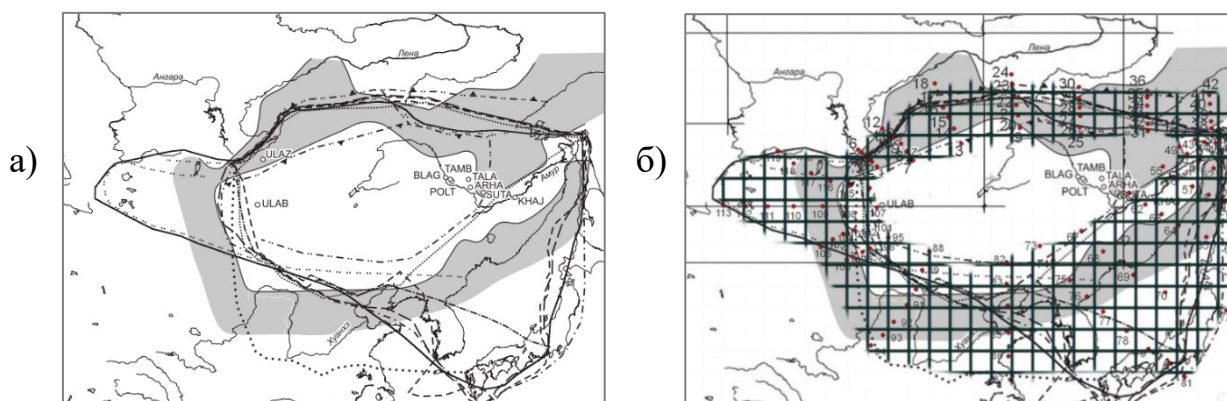


Рис.2. Выбор границ буферной зоны Амурской литосферной плиты
 а) варианты границ Амурской плиты [13], б) выбор буферной зоны для Амурской плиты (заштриховано)

На территории Российской Федерации наблюдаются участки, на которых пересекаются границы сразу трех литосферных плит (рис. 3). В зонах тройных сочленений возникает неоднозначность решений определения компонент скоростей движений земной коры, вызванная наложением двух буферных зон. Соответственно для таких участков должны быть предложены алгоритмы, согласно которым отдается предпочтение одному из решений буферных зон или получается новое решение, основанное на значениях, определенных для каждой из пересекающихся буферных зон, описывающих движения вдоль границ двух литосферных плит.

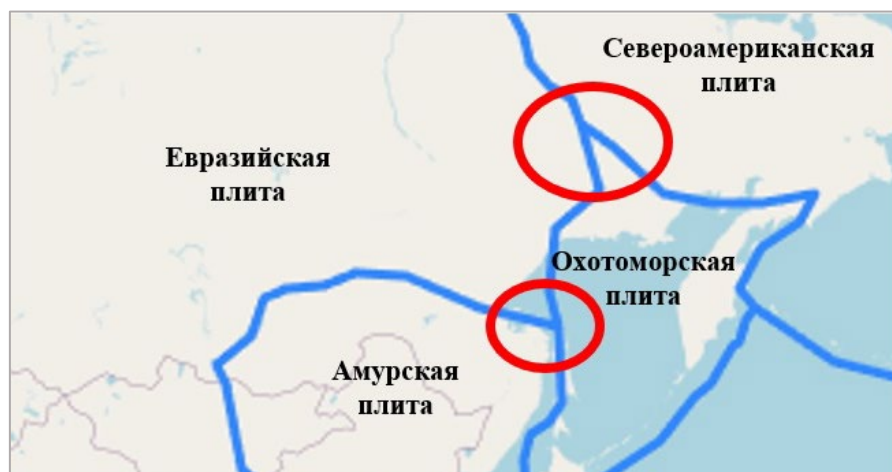


Рис. 3. Тройные сочленения плит на территории Российской Федерации

В такой ситуации закономерным является назначение нового решения для определения компонент скоростей движений земной коры, такое решение может быть получено с использованием значений скоростей, определенных для каждой из буферных зон, по следующим формулам

$$w_E = w_E^I ((S_{2zp} + S_{3zp}) / 2S_{сум}) + w_E^{II} ((S_{1zp} + S_{3zp}) / 2S_{сум}) + w_E^{III} ((S_{1zp} + S_{2zp}) / 2S_{сум}), \quad (3)$$

$$w_N = w_N^I ((S_{2zp} + S_{3zp}) / 2S_{сум}) + w_N^{II} ((S_{1zp} + S_{3zp}) / 2S_{сум}) + w_N^{III} ((S_{1zp} + S_{2zp}) / 2S_{сум}), \quad (4)$$

где $w_E^I, w_E^{II}, w_E^{III}, w_N^I, w_N^{II}, w_N^{III}$ – компоненты скоростей точки, определенные для первой, второй и третьей буферных зон;

$S_{1zp}, S_{2zp}, S_{3zp}$ – расстояние от точки до первой, второй и третьей границ литосферных плит, соответственно;

$S_{сум}$ – сумма расстояний до границ литосферных плит.

Таким образом, основной принцип работы модуля сглаживания скоростей можно описать в виде схемы, представленной на рис. 4, он состоит из определения расстояний до границ соседних плит; аналитической части, на основе вычисленных значений проверяющей условия необходимости сглаживания и типа буферной зоны (двойное/тройное сочленение); вычислительной части, реализующей расчет сглаженных значений скоростей движения земной коры на основе решений, принятых в аналитическом блоке.

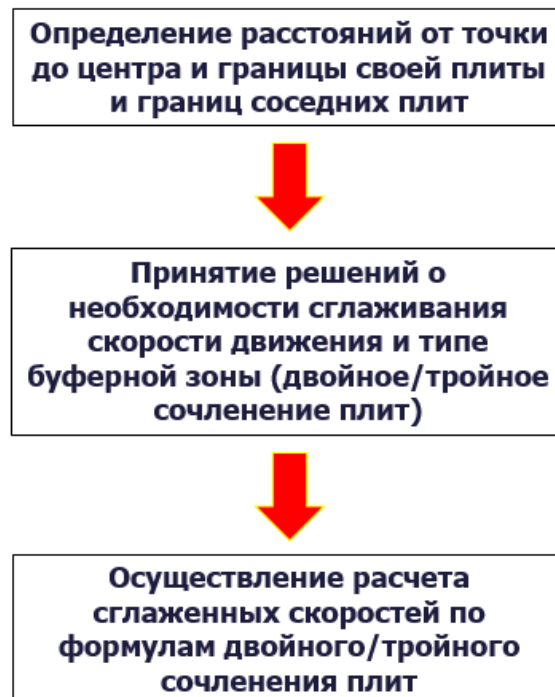


Рис. 4. Схема этапов работы программного обеспечения

Заключение

Разработанный программный блок для определения скоростей движения точек земной поверхности и построения сглаженного поля скоростей земной коры для территории Российской Федерации является важным элементом программно-математической модели движений земной коры для территории страны. Полученная таким образом модель может использоваться для решения многих научных и практических задач, встраиваться в программные продукты, в том числе в геокалькуляторы и онлайн сервисы. Одной из приоритетных задач разрабатываемой программно-математической модели скоростей движений земной коры является поддержание актуальности государственной системы отсчета и обеспечение ее взаимосвязи с мировыми системами отсчета. В качестве следующих слоев, уточняющих модель, предполагается разработка более подробных региональных решений для сейсмоактивных регионов, а также локальных решений для постсейсмических и косейсмических деформаций.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках СЧ НИР «ГЕОТЕХ-КВАНТ-2» с целью повышения точности координатно-временных определений на территории Российской Федерации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 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 геопрограммное 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. – 2023. – № 3. – С. 179-185. – DOI 10.33764/2687-041X-2024-3-179-185.

2 Дорогова И. Е., Демидов К. А. Разработка программной модели движений блоков земной коры для территории Российской Федерации / Дорогова И.Е., Демидов К.А. // Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопрограммное 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. – С. 192-198. – DOI 10.33764/2687-041X-2024-3-192-198.

3 Дорогова И.Е. Выявление блоковой структуры области земной коры, испытывающей горизонтальные движения вращательного характера / И.Е. Дорогова // Геодезия и картография. – 2013. – № 5. – С. 36-39.

4 Дорогова И.Е. Применение методов кластерного анализа для исследования блоковой структуры земной коры / И.Е. Дорогова // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 180-185.

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

6 Дорогова И.Е., Блинкова Е.С. О необходимости ввода территориальных реализаций государственной системы координат, обусловленных геодинамическими особенностями территории / И.Е. Дорогова, Е.С. Блинкова // Регулирование земельно-имущественных отноше-

ний в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения. – 2023. – № 3. – С. 27-32. – DOI: 10.33764/2687-041X-2023-1-155-161.

7 Дорогова И.Е., Духовников К.С. Разработка геодинамического программного модуля для оценивания деформаций земной коры по результатам геодезических измерений / И.Е. Дорогова, К.С. Духовников // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2022. – Т. 27. – № 6. – С. 15-27. – DOI: 10.33764/2618-981X-2023-1-1-216-223.

8 Дорогова И.Е., Духовников К.С. Программное обеспечение, сервисы и открытый код для решения задач геодинамики / И.Е. Дорогова, К.С. Духовников // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2022. – Т. 1. – С. 138-145. – DOI: 10.33764/2618-981X-2022-1-138-145.

9 Дорогова И.Е., Демидов К.А. Разработка геодинамического калькулятора для определения параметров движения земной коры / И.Е. Дорогова, К.А. Демидов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2023. – Т. 1. – № 1. – С. 216-223. – DOI: 10.33764/2618-981X-2023-1-1-216-223.

10 Дорогова И.Е., Демидов К.А. GEOCALC: Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2023662485, 08.06.2023. Заявка № 2023661780 от 08.06.2023.

11 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.

12 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.

13 Дорогова И.Е., Мелкова А.И. Сравнение существующих моделей движения Амурской литосферной плиты / И.Е. Дорогова, А.И. Мелкова // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2018. – № 1. – С. 116-122.

© И. Е. Дорогова, А. В. Шаповалов, 2024