

И. Е. Дорогова^{1}, Г. В. Сутурин¹*

Разработка программного обеспечения для билинейной интерполяции на основе цифровой модели движений земной коры

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

Аннотация. В статье выполнен обзор принципов работы, интерфейса и возможностей разработанного авторами программного обеспечения для расчета компонент скоростей движений земной коры для территории Российской Федерации. Программа включает два универсальных модуля, предназначенных для построения сетки заданной дискретности по замкнутому контуру и выполнения билинейной интерполяции по значениям, полученным в узлах регулярной сетки. Эти модули могут использоваться в совокупности с другими вычислительными модулями и обеспечивать решение многих задач геодезии, связанных с построением полей распределения величин и определения их локальных значений. Приведенное в статье программное обеспечение планируется использовать в структуре разрабатываемых онлайн сервисов. Это позволит пользователю, обратившемуся к сервису, получать значения компонент скоростей движения земной коры для любой произвольной точки или массива точек. Также разработанные модули будут добавлены в онлайн геокалькулятор, позволяющий выполнять преобразования координат из одной системы в другую, что позволит обеспечить функцию пересчета координат между эпохами.

Ключевые слова: геодинамика, деформации земной коры, движения земной поверхности, программное обеспечение, регулярная сетка, билинейная интерполяция

I. E. Dorogova¹, G. V. Suturin¹

Software development for bilinear interpolation based on a digital model of the movements of the Earth's crust

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

Abstract. The article provides an overview of the principles of operation, interface and capabilities of the software developed by the authors for calculating the components of the velocities of movements of the Earth's crust for the territory of the Russian Federation. The program includes two universal modules designed to build a grid of a given discreteness along a closed contour and perform bilinear interpolation from the values obtained at the nodes of a regular grid. These modules can be used in conjunction with other computing modules and provide solutions to many problems of geodesy related to the construction of fields of magnitude distribution and determination of their local values. The software to be used in the structure of the online services being developed. This will allow the user to get the values of the components of the velocities of the Earth's crust for any arbitrary point or array of points. Also, the developed modules will be added to the online geocalculator, which allows converting coordinates from one system to another, which will provide the function of recalculating coordinates between epochs.

Keywords: geodynamics, crustal deformations, movements of the Earth's surface, software, regular grid, bilinear interpolation

Введение

Задача построения регулярной сетки значений для заданного контура и билинейной интерполяции на основе этих значений является достаточно распространенной как в геодезии, так и в смежных областях науки и практики. В геодезии такие задачи решаются в ходе исследований и моделирования рельефа, гравитационного поля, полей деформаций земной коры и многих других направлений. Актуальной является задача автоматизации процесса построения такой сетки и выполнения билинейной интерполяции по данным, расположенным в узлах сетки. Авторы статьи разработали такой программный модуль, в данном исследовании продемонстрирован его функционал и пример использования для определения скоростей точек земной поверхности [1-3] на основе цифровой модели движений земной коры, которая рассмотрена в статьях [4, 5].

Принципы реализации программного модуля билинейной интерполяции

Для реализации программного модуля был использован язык программирования Python. Разработанный модуль `geomesh_module` включает две основных функции, первая из которых отвечает за создание регулярной сетки, вторая функция выполняет билинейную интерполяцию по сетке (рис. 1).



```
test2.py x
1 import geomesh_module
2
3 grid = geomesh_module.create_grid( bounds_path: 'D:/bounds.geojson', visual=True,
4 grid_size=60, intersection=True)
5
6 result = geomesh_module.bilinear_interpolation( path_to_grid: 'D:/60_minutes.xlsx',
7 latitude: 55, longitude: 65)
8 |
```

Рис.1. Функции для создания регулярной сетки и билинейной интерполяции

Параметрами функции создания регулярной сетки (рис. 2) являются путь к файлу границ, необходимость визуализации (по умолчанию – отключена) и шаг сетки (по умолчанию – 60 минут), на рисунке также обозначены типы данных для назначаемых параметров и тип возвращаемого функцией объекта.

Параметрами функции билинейной интерполяции по регулярной сетке (рис. 3) являются путь к файлу регулярной сетки, широта и долгота точки (при расчете одиночного значения), путь к файлу со значениями величин в узлах сетки (при расчете значений для массива точек), на рисунке также обозначены типы данных для назначаемых параметров и тип возвращаемого функцией объекта.

```

create_grid( bounds_path: 'D:/bounds.geojson', visual=True,
e.bilinear_
def create_grid(bounds_path: str,
                visual: bool = False,
                grid_size: Any = 60,
                intersection: bool = False) -> GeoDataFrame
Create Regular Grid

```

Рис. 2. Параметры функции регулярной сетки

```

bilinear_interpolation( path_to_grid: 'D:/60_minutes.xlsx',
def bilinear_interpolation(path_to_grid: str,
                           latitude: Any,
                           longitude: Any,
                           path_to_excel: str | None = None) -> DataFrame
Bilinear Interpolation

```

Рис. 3. Параметры функции билинейной интерполяции

Программа GeoMesh для билинейной интерполяции скоростей движений земной коры

Приведенные выше функции были использованы при разработке программного обеспечения GeoMesh, которое позволяет, используя программно-математическую модель, описанную в статьях [4, 6, 7], выполнять расчет значений компонент скоростей движений точек земной поверхности в узлах сетки заданной дискретности, а затем выполнять интерполяцию по вычисленным значениям компонент скоростей движения в узлах сетки. Необходимость такой модели обоснована в статьях [8, 9], в основе модели лежит расчет скоростей по параметрам движения блоков земной коры [10, 11]

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

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

где $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – компоненты скорости вращения плит;

X, Y, Z – координаты пункта;

ρ – количество секунд в радиане.

Составляющие скоростей V_E, V_N, V_U могут быть получены по формулам

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

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

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

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

V_X, V_Y, V_Z – компоненты вектора скорости движения точки.

Для удобства использования программы был разработан простой, но функциональный интерфейс, состоящий из двух блоков. Первый блок функций программы позволяет настроить процесс получения регулярной сетки значений, между которыми затем будет осуществляться интерполяция. Для этого в программе реализованы возможности: выбора эллипсоида и шага сетки (в минутах), загрузки файла границ, экспорта полученного файла координат узлов сетки.

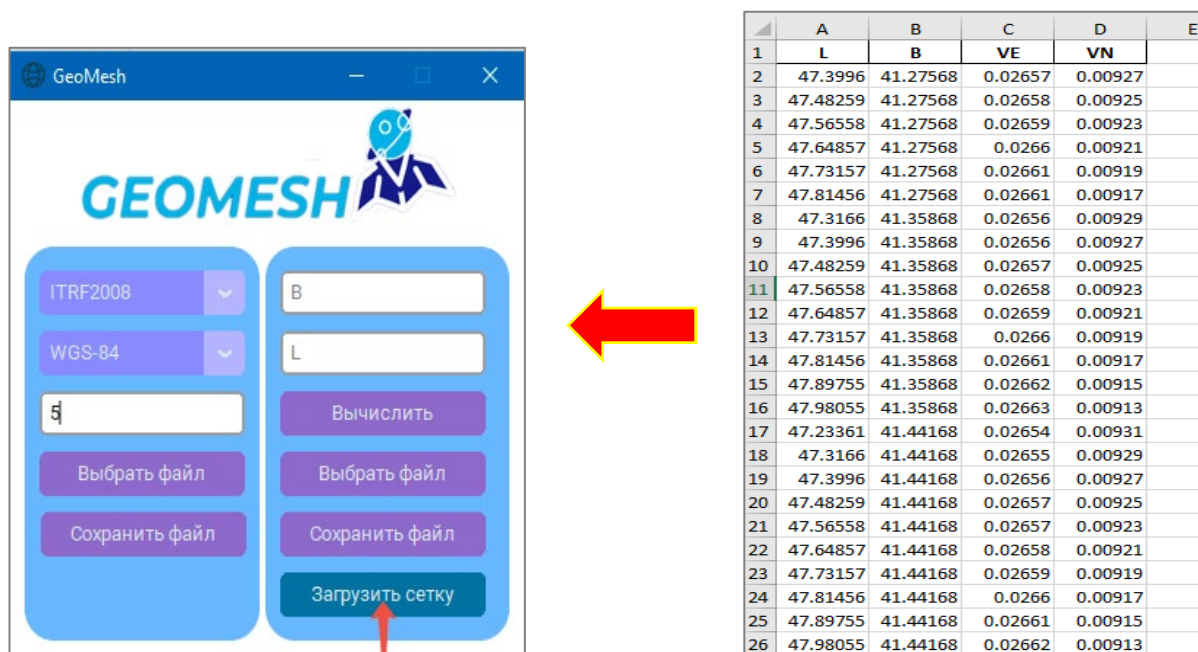
С помощью файла координат точек регулярной сетки можно выполнить вычисление любых величин по заданной формуле и поместить эти данные в узлы сетки. Для этого программа GeoMesh обращается к программно-математической модели движений земной коры, разработанной авторами статьи и описанной в работах [4, 6, 7].

С помощью полученных таким образом значений в узлах сетки во втором блоке программы можно выполнять билинейную интерполяцию для любых произвольных точек. Программный модуль билинейной интерполяции позволяет: импортировать файл значений в узлах регулярной сетки, вводить координаты ис-

комой точки/загружать файл с координатами искомых точек, получать искомое значение/файл значений для экспорта.

Результаты

В результате описанных действий в программе GeoMesh была получена регулярная сетка точек для территории Российской Федерации, которая затем подгружалась в программу для расчета компонент скоростей движений земной коры (рис. 4) и на выходе получалась пятиминутная сетка значений компонент скоростей движений точек земной коры для территории Российской Федерации.



	A	B	C	D	E
1	L	B	VE	VN	
2	47.3996	41.27568	0.02657	0.00927	
3	47.48259	41.27568	0.02658	0.00925	
4	47.56558	41.27568	0.02659	0.00923	
5	47.64857	41.27568	0.0266	0.00921	
6	47.73157	41.27568	0.02661	0.00919	
7	47.81456	41.27568	0.02661	0.00917	
8	47.3166	41.35868	0.02656	0.00929	
9	47.3996	41.35868	0.02656	0.00927	
10	47.48259	41.35868	0.02657	0.00925	
11	47.56558	41.35868	0.02658	0.00923	
12	47.64857	41.35868	0.02659	0.00921	
13	47.73157	41.35868	0.0266	0.00919	
14	47.81456	41.35868	0.02661	0.00917	
15	47.89755	41.35868	0.02662	0.00915	
16	47.98055	41.35868	0.02663	0.00913	
17	47.23361	41.44168	0.02654	0.00931	
18	47.3166	41.44168	0.02655	0.00929	
19	47.3996	41.44168	0.02656	0.00927	
20	47.48259	41.44168	0.02657	0.00925	
21	47.56558	41.44168	0.02657	0.00923	
22	47.64857	41.44168	0.02658	0.00921	
23	47.73157	41.44168	0.02659	0.00919	
24	47.81456	41.44168	0.0266	0.00917	
25	47.89755	41.44168	0.02661	0.00915	
26	47.98055	41.44168	0.02662	0.00913	

Рис. 4. Загрузка точек регулярной сетки в вычислительный модуль

Полученную таким образом регулярную модель скоростей смещений земной коры планируется использовать в структуре разрабатываемых онлайн сервисов совместно с программным блоком билинейной интерполяции. Это позволит пользователю получать значения компонент скоростей движения земной коры для любой произвольной точки или массива точек. Также разработанные модули будут добавлены в онлайн геокалькулятор, позволяющий выполнять преобразования координат из одной системы в другую, что позволит обеспечить функцию пересчета координат между эпохами.

Заключение

Описанные в статье два программных модуля обладают универсальностью и могут использоваться в связке с различными вычислительными модулями, решая таким образом широкий круг задач геодезии и смежных областей исследований. В данной статье приведен пример их использования для разработки программного обеспечения расчета скоростей движения точек земной поверхности

на основе регулярной сетки. В приведенном примере была выбрана пятиминутная сетка значений, но шаг сетки может настраиваться в зависимости от потребностей. Полученная таким образом регулярная модель может использоваться для многих научных и практических задач, встраиваться в программные продукты, в том числе в геокалькуляторы и онлайн сервисы.

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., Дербенев К.В. Глобальные вихревые движения блоков земной поверхности / И.Е. Дорогова, К.В. Дербенев // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2012. – Т. 1. – № 1. – С. 237-240.

2 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.

3 Дорогова И.Е., Колесникова Е.И. Использование сетей постоянно действующих референционных станций для геодинамических исследований территорий субъектов Российской Федерации / И.Е. Дорогова, Е.И. Колесникова // Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения. – 2023. – № 3. – С. 27-32. – DOI: 10.33764/2687-041X-2023-3-27-32.

4 Дорогова И. Е., Демидов К. А. Разработка программной модели движений блоков земной коры для территории Российской Федерации / И.Е. Дорогова, К.А. Демидов // 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. – С. 192-198. – DOI 10.33764/2687-041X-2024-3-192-198.

5 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.

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

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

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

10 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.

11 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.

© И. Е. Дорогова, Г. В. Сутурин, 2024