

И. Е. Дорогова^{1}, К. А. Демидов¹*

Разработка геодинимического калькулятора для определения параметров движения земной коры

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

Аннотация. В статье выполнен обзор некоторых программных продуктов, позволяющих определять составляющие скоростей смещений точек земной поверхности по их координатам (геодинамических калькуляторов). Онлайн-сервисы и программные продукты рассмотрены с точки зрения функциональных возможностей, поддерживаемых моделей и вариантов границ плит, а также ограничений использования. В результате анализа функциональных возможностей имеющегося программного обеспечения авторами сформулированы требования к разрабатываемому программному обеспечению: основные функциональные возможности и круг задач, решаемых по результатам геодезических измерений, возможность доработки функций в будущем. Для разработки калькулятора использованы актуальные и подробные данные о современных границах литосферных плит, опубликованные Питером Бердом, параметры движения литосферных плит из наиболее распространенных моделей, известный математический аппарат определения составляющих скоростей точек по параметрам движения, а также средства библиотек языка Python.

Ключевые слова: геодинамика, программное обеспечение, деформации земной коры, ГНСС измерения

I. E. Dorogova^{1}, K. A. Demidov¹*

Software, services and open source for solving problems of geodynamics

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

Abstract. The article provides an overview of some software products that allow determining the components of the displacement velocities of points on the Earth's surface by their coordinates (geodynamic calculators). Online services and software products are considered in terms of functionality, supported models and variants of plate boundaries, as well as usage restrictions. As a result of the analysis of the functionality of the available software, the authors formulated the requirements for the software being developed: the main functionality and the range of tasks to be solved based on the results of geodetic measurements, the possibility of updating the functions in the future. To develop the calculator, we used up-to-date and detailed data on the modern boundaries of lithospheric plates published by Peter Bird, the motion parameters of lithospheric plates from the most common models, the well-known mathematical apparatus for determining the component velocities of points based on motion parameters, as well as Python libraries.

Keywords: geodynamics, software, crustal deformations, GNSS measurements

Введение

Геодинимический калькулятор представляет собой программное обеспечение для моделирования и количественной оценки процессов, связанных с динамикой

земной поверхности. С помощью таких калькуляторов можно рассчитывать скорости смещения тектонических плит и точек земной поверхности, а также прогнозировать их изменения, используя различные модели движения земной коры.

С точки зрения изучения функциональных возможностей интересно рассмотреть, какими инструментами обладают существующие геодинамические калькуляторы, и для каких задач геодинамики возможно использовать такое программное обеспечение. Основной целью статьи является рассмотрение требуемого функционала, этапов и инструментов для разработки геодинамического калькулятора, позволяющего определять параметры движения земной коры по геодезическим данным. Задачи исследования:

- выполнить обзор существующих геодинамических калькуляторов, выявить функциональные потребности для разрабатываемого калькулятора;
- подобрать инструменты, с помощью которых может быть создан геодинамический калькулятор;
- реализовать геодинамический калькулятор в виде самостоятельного программного обеспечения, проверить его работу.

Обзор наиболее популярных геодинамических сервисов и калькуляторов

Помимо непосредственно геодинамических калькуляторов существует также ряд сервисов и программного обеспечения, в которые встроены функции вычисления или информация о составляющих скоростей смещений. К ним можно отнести International GNSS Service (IGS) [1], Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS) [2], научное программное обеспечение GAMIT/GLOBK [3], Bernese GNSS [4], GipsyX [5, 6] и др. Описание функциональных возможностей перечисленных программных продуктов и сервисов приведено в [7].

Ниже рассмотрим наиболее популярные сервисы, которые являются именно геодинамическими калькуляторами, то есть выполняют единственную функцию – определение компонент скоростей смещений точек земной поверхности по заданным моделям движения. Для работы в любом геодинамическом калькуляторе обычно требуется ввести координаты точки, выбрать модель движения литосферных плит (если есть такая возможность), а также выбрать тектоническую плиту, на которой расположена точка, либо определить плиту автоматически.

Примеры геодинамических калькуляторов:

- UNAVCO Plate Motion Calculator (США) [8] – онлайн-сервис сайта геодезического центра геолого-геофизических исследований (GAGE), позволяющий по координатам пункта определять скорости его смещения. Одно из главных преимуществ данного калькулятора – большой выбор моделей движения литосферных плит (NUVEL-1A, ITRF2014 и др.). Также имеется возможность самостоятельного выбора плиты, по параметрам движения которой следует определять скорость пункта, возможность задавать собственные параметры вращения, заносить в исходные данные сразу несколько точек через разделитель;

- Lamont-Doherty Plate Velocity Calculator (США) [9] – очень простой онлайн-калькулятор от Колумбийской Климатической школы, для расчетов скоростей смещения точек использует только модель NUVEL-1;

– University of Tokyo Plate Motion Calculator (Япония) [10] – онлайн-калькулятор от Токийского университета, для определения компонент скоростей движения точек используется несколько вариаций одной модели движения плит: NUVEL-1 NNR, NUVEL-1A NNR, HS3-NUVEL1, а также MORVEL и NNR-MORVEL56;

– Rice University Plate Motion Calculator (США) [11] – онлайн-калькулятор от американского университета Райса, для вычислений используется модель HS3-NUVEL1A, есть также возможность задать собственные параметры движения;

– University of Wisconsin-Madison Plate Motion Calculator (США) [12] – онлайн-калькулятор от Висконсинского университета в Мэдисоне, в основе калькулятора модели движения плит MORVEL и NNR-MORVEL56, имеется возможность вычисления скоростей смещения точек относительно выбранной неподвижной плиты.

Данные сервисы предоставляют информацию и модули для вычисления скоростей совершенно бесплатно, что является плюсом, однако, имеются и некоторые недостатки: все калькуляторы были разработаны за рубежом и многие из них используют модели, не учитывающие некоторые литосферные плиты, движения которых было бы полезно учитывать для территории Российской Федерации [13] (Амурская, Охотоморская), большинство калькуляторов предоставляют возможность использовать для вычислений параметры одной-двух моделей движения плит или их вариаций, имеются некоторые особенности в работе калькуляторов на границах литосферных плит (нулевые значения скоростей) и др.

Перечисленные недостатки хочется учесть при разработке нового геодинамического калькулятора. Таким образом, сформулирован примерный перечень моментов, которые хотелось бы улучшить и проработать более подробно при реализации калькулятора:

– расширение перечня поддерживаемых моделей движения литосферных плит;

– применение в качестве основы для определения принадлежности точки к литосферным плитам одной из наиболее подробных моделей границ PB2002;

– расширение функциональных возможностей калькулятора: вычисление изменения координат точек между эпохами, чтение исходных данных из файла (для объемных массивов данных) и др.;

– универсальность: добавление возможности загружать авторские модели движения литосферных плит и границ плит;

– гибкость: предусмотреть возможность незначительного изменения программы для добавления новых данных и методов расчета, возможность добавлять инструменты и библиотеки в любой момент.

Инструменты и теоретическая основа для разработки геодинамического калькулятора

Для создания геодинамического калькулятора был использован язык программирования Python; вычислительные методы и средства библиотек Math, PyGeodesy, Tkinter (интерфейс), NumPy, Folium, GeoPandas, Shapely, база данных

Tectonicplates (мировые тектонические плиты и границы) от профессора кафедры наук о Земле, планетах и космосе Калифорнийского университета Питера Берда [14], которую оцифровали и представили в среде Python [15].

В качестве математического аппарата для работы калькулятора использовались общеизвестные формулы определения составляющих вектора скорости [16, 17]:

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

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

где ω_x , ω_y , ω_z – компоненты скорости вращения плиты; X , Y , Z – координаты пункта, ρ – количество секунд в радиане.

Также для определения составляющих скоростей в горизонтальной системе координат V_E , V_N , V_U были использованы формулы для перехода к соответствующим компонентам скоростей:

$$\begin{bmatrix} V_E \\ V_N \\ V_U \end{bmatrix} = R^T \cdot \begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где R – матрица преобразования координат, V_X , V_Y , V_Z – компоненты вектора скорости движения точки.

Матрица преобразования координат для формулы (3) определяется выражением:

$$R = \begin{bmatrix} -\sin L & -\sin B \cos L & \cos B \cos L \\ \cos L & -\sin B \sin L & \cos B \sin L \\ 0 & \cos B & \sin B \end{bmatrix}, \quad (4)$$

Для того, чтобы вычислять скорости точек, в калькуляторе необходимо задать значения скоростей вращения плит. Для разных моделей эти значения различаются, как и количество плит, для которых определены значения скоростей. Для проверки работы калькулятора в него были добавлены значения скоростей для модели движения литосферных плит ITRF2014 [18].

Еще одним важным вопросом, который был решен в процессе разработки калькулятора, было определение принадлежности пункта к определенной плите в автоматическом режиме. Для этого в калькулятор были загружены границы литосферных плит из модели PB2002 от профессора Калифорнийского университета Питера Берда [14]. Для интеграции этих значений в программное обеспечение линии границ были преобразованы в полигоны и представлены в виде базы данных GeoJSON [15], который позволяет считывать информацию и загружать ее в калькулятор.

Для реализации калькулятора была выбрана кроссплатформенная интегрированная среда разработки для языка программирования Python – PyCharm Community Edition, предоставляющая комплекс средств для написания кода и визуальной отладки, которая уже была опробована при создании другого программного геодинамического модуля [19].

Дополнительной функцией калькулятора является пересчет координат между эпохами наблюдений, который реализуется по формулам:

$$\begin{aligned} X &= X_t - V_X \cdot (t - t_{нач}), \\ Y &= Y_t - V_Y \cdot (t - t_{нач}), \\ Z &= Z_t - V_Z \cdot (t - t_{нач}), \end{aligned} \quad (5)$$

где t – эпоха наблюдения, выраженная в годах и долях года; $t_{нач}$ – эпоха с которой необходимо произвести расчет, выраженная в годах и долях года.

Основная особенность разрабатываемого геодинамического калькулятора заключается в том, что в него планируется добавить возможность включения собственных моделей движения литосферных плит (авторских границ и параметров движения), что обеспечит универсальность калькулятора для пользователя.

Промежуточные результаты разработки калькулятора для определения параметров движения земной коры

С использованием вышеперечисленных библиотек, параметров и формул, был разработан геодинамический калькулятор. Интерфейс программы представлен на рисунке 1.

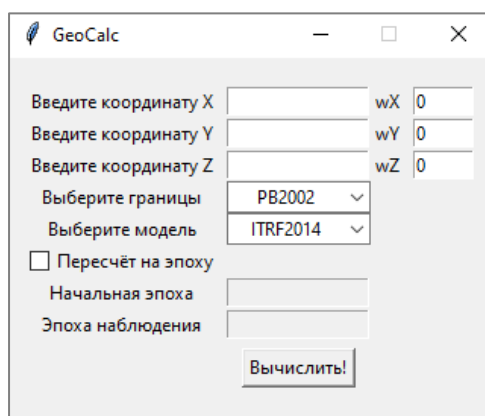


Рисунок 1. Главное окно геодинамического калькулятора

С помощью данного калькулятора можно вычислить по заданным пространственным прямоугольным координатам точки компоненты скорости ее смещения V_X , V_Y , V_Z , а также составляющие скорости смещения V_N , V_E , V_U . При этом в автоматическом режиме с использованием базы данных GeoJSON определяется плита, к которой принадлежит точка (согласно выбранной модели границ плит), ее название и код. Результат вычислений для произвольной точки представлен на рисунке 2.

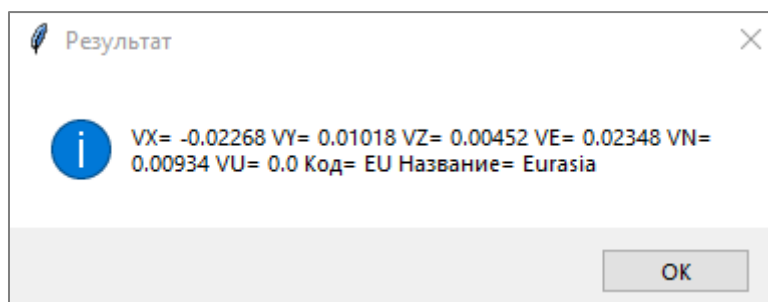


Рисунок 2. Результат вычислений скоростей смещения пункта

Также в калькуляторе реализована возможность выбора моделей движения и границ плит. В данный момент границы определены цифровой моделью границ плит Питера Берда. Для моделей движения есть выбор – «ITRF2014» и «Пользовательская модель», список встроенных моделей будет дорабатываться и расширяться. При выборе пользовательской модели в окно ω_x , ω_y , ω_z можно добавить собственные значения, которые будут использованы для определения компонент скорости смещения пункта.

Дополнительно добавлена возможность пересчета координат на эпоху наблюдения, для этого нужно активировать галочку возле надписи: «Пересчет на эпоху». При выборе этой функции программа посчитает координаты пункта с учетом эпохи и выдаст дополнительное окно, содержащее результат вычислений.

Заключение

По результатам исследования сделан вывод о том, что главным недостатком существующих калькуляторов является работа с определенным кругом заданных моделей (часто одной модели), актуальной является разработка калькулятора, позволяющего задавать авторские модели и параметры движения плит, а также способного обрабатывать большие массивы данных, и в исследовании рассмотрены инструменты для реализации такого калькулятора.

В работе представлена первая версия разрабатываемого калькулятора, описаны инструментальные средства, методы и база, которая лежит в основе работы калькулятора. На сегодняшний день функционал программы достаточно ограниченный, но планируется его постепенная доработка, намечены функции, которые будут доработаны и добавлены в последующих версиях:

- возможность не только задавать отдельные авторские параметры вращения, но и подгружать файлы с описанием авторских моделей параметров движения плит, а также границ литосферных плит;
- возможность подгружать исходные данные одним файлом (полезная функция для больших массивов данных),
- возможность задавать как пространственные прямоугольные, так и пространственные геодезические координаты точек для расчета скоростей,
- добавление возможности подгружать модели других геодинамических эффектов,
- добавление решений расчета компонент скоростей для территорий границ литосферных плит.

Исследование выполнено в рамках СЧ НИР «ГЕОТЕХ-Квант» с целью создания сервисов и программного обеспечения для обработки геодезических данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 International GNSS Service (IGS). – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : общий доступ. URL: <https://igs.org/> (дата обращения 25.04.2023).
- 2 Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS). – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : для авторизованных пользователей. URL: <https://cddis.nasa.gov/> (дата обращения 25.04.2023).
- 3 GAMIT/GLOBK – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : общий доступ. URL: <http://geoweb.mit.edu/gg/> (дата обращения 25.04.2023).
- 4 Bernese GNSS Software. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : общий доступ. URL: <http://www.bernese.unibe.ch/> (дата обращения 25.04.2023).
- 5 JPL GipsyX. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : общий доступ. URL: <https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov/> (дата обращения 25.04.2023).
- 6 Bertiger, W. GipsyX/RTGx, a new tool set for space geodetic operations and research. / W. Bertiger, Y. Bar-Sever, A. Dorsey, B. – Текст : непосредственный. // *Advances in Space Research*. – 2020. – Т. 66, № 3. – С. 469 – 489.
- 7 Дорогова, И. Е. 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. – EDN EEQHNX.
- 8 UNAVCO Plate Motion Calculator. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : общий доступ. URL: <https://www.unavco.org/software/geodetic-utilities/plate-motion-calculator/plate-motion-calculator.html> (дата обращения 25.04.2023).
- 9 Lamont-Doherty Plate Velocity Calculator. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : общий доступ. URL: <https://www.ldeo.columbia.edu/~menke/plates2.html> (дата обращения 25.04.2023).
- 10 University of Tokyo Plate Motion Calculator. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : общий доступ. URL: http://ofgs.aori.u-tokyo.ac.jp/~okino/platecalc_new.html (дата обращения 25.04.2023).
- 11 Rice University Plate Motion Calculator. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : общий доступ. URL: <https://tectonics.rice.edu/calculators/hs3.html> (дата обращения 25.04.2023).
- 12 University of Wisconsin-Madison Plate Motion Calculator. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : общий доступ. URL: http://www.geology.wisc.edu/~chuck/MORVEL/motion-frame_nnrm56.html (дата обращения 25.04.2023).
- 13 Дорогова, И. Е. Сравнение существующих моделей движения Амурской литосферной плиты / И. Е. Дорогова, А. И. Мелкова // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. – 2018. – № 1. – С. 116-122.

- 14 Bird, P. An updated digital model of plate boundaries / P. Bird. – Текст: непосредственный // An electronic journal of the Earth sciences. – 2003. – №10. – 52 с.
- 15 World tectonic plates and boundaries. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : общий доступ. URL: <https://github.com/fraxen/tectonicplates> (дата обращения 25.04.2023).
- 16 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. – EDN SEPJDZ.
- 17 Дорогова, И. Е. Глобальные вихревые движения блоков земной поверхности / И. Е. Дорогова, К. В. Дербенев // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2012. – Т. 1, № 1. – С. 237-240. – EDN PCNEHN.
- 18 ITRF2014 plate motion model / Z. Altamimi, L. Metivier, P. Rebischung [и др.]. – Текст: непосредственный // Geophysical Journal International. – 2016. – с. 1906–1912.
- 19 Дорогова, И. Е. Разработка геодинамического программного модуля для оценивания деформаций земной коры по результатам геодезических измерений / И. Е. Дорогова, К. С. Духовников // Вестник СГУГиТ. – 2022. – № 6. – С. 15-27. – DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-6-15-27.

© И. Е. Дорогова, К. А. Демидов, 2023