

Программное обеспечение, сервисы и открытый код для решения задач геодинамики

И. Е. Дорогова^{1}, К. С. Духовников¹*

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, располагающих функционалом, полезным при решении задач геодинамических исследований. Рассмотрено коммерческое программное обеспечение, научные комплексы программ, онлайн-сервисы, программное обеспечение с открытым исходным кодом. Подробно рассмотрены имеющиеся программные продукты, позволяющие выполнять анализ и моделирование деформаций (двумерное и трехмерное) методом конечных элементов. В результате анализа имеющегося программного обеспечения авторами намечена цель для дальнейших работ – разработка геодинамического модуля с использованием средств языка Python, решающего широкий круг задач по результатам геодезических измерений. Первой задачей, решение которой будет реализовано в модуле, является конечно-элементный анализ деформаций земной коры, не имеющий существенных ограничений по числу точек геометрической модели, основанный на приведенных в статье разработках с открытым исходным кодом.

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

Software, services and open source software for solving geodynamic problems

I. E. Dorogova^{1}, K. S. Dukhovnikov¹*

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

* e-mail: inna_dorogova@mail.ru

Abstract. The article reviews some software products that have functionalities useful in solving geodynamic research problems. Commercial software, scientific software complexes, online services, open-source software are considered. The available software products allowing the analysis and modelling of deformations (two and three dimensional) by the finite elements method are considered in particular detail. As a result of the analysis of the available software, the authors have identified a goal for further work - the development of a geodynamic module using the Python programming language, which solves a wide range of tasks based on the results of geodetic measurements. The first problem to be solved in the module is the finite element analysis of Earth's crust deformations, which does not have significant limitations on the number of points of the geometric model, based on the open-source developments in the article.

Keywords: geodynamics, GNSS measurements, crustal deformations, software

Введение

В настоящее время автоматизация является неотъемлемой частью геодезии, так как позволяет обрабатывать огромные объемы данных за считанные секунды. По всему миру специалисты в разных областях геодезии разрабатывают

приложения для обработки геодезических измерений. Геодинамические исследования являются одним из направлений научного и практического применения геодезических методов, поэтому в современном геодезическом программном обеспечении появляются все новые возможности для решения задач геодинамики. С точки зрения возможностей интересно рассмотреть, какими инструментами обладают существующие сервисы, и для каких задач геодинамики можно применить программное обеспечение и онлайн-сервисы. Основной целью статьи является обзор возможностей программного обеспечения для решения задач геодинамики:

- коммерческого программного обеспечения;
- научного программного обеспечения;
- онлайн-сервисов;
- программного обеспечения с открытым исходным кодом.

Обзор возможностей коммерческого программного обеспечения

Коммерческое программное обеспечение при решении задач геодинамики главным образом используется для обработки результатов ГНСС-измерений, для этих целей используют целый ряд программного обеспечения с приблизительно одинаковым функционалом: Trimble Business Center (Trimble Navigation); Giodis (JAVAD GNSS); КРЕДО ГНСС; South Geomatic Office (South Surveying and Mapping Technology) и др.

Trimble Business Center [1] представляет собой мощный, универсальный и функциональный пакет программного обеспечения для камеральной обработки геодезических данных. Поддерживает широкий ряд форматов ГНСС-данных, облаков точек, BIM-моделей. Содержит большую библиотеку систем координат всего мира, в том числе систем координат РФ (СК-95, СК-42, ГСК-2011, МСК). Большинство процессов обработки автоматизировано и требует лишь настройки параметров.

Giodis [2] представляет собой программное обеспечение для высокоточной геодезической обработки ГНСС-измерений. Использует передовые научные подходы для решения широкого круга практических задач и имеет два модуля пост-обработки. Первый использует метод многосессной (multi-session) и сетевой (multi-site) обработки независимых ГНСС-измерений и позволяет получить сантиметровую точность для базовых линий до 2 000 км. Это дает возможность даже в условиях сильной разреженности станций сети IGS на территории России получать в любой ее точке геоцентрические координаты с точностью на уровне первых сантиметров. Другой модуль Giodis выполняет обработку вторых разностей ГНСС-измерений, что позволяет достичь миллиметровой точности на расстояниях до нескольких десятков километров, и используется для деформационного мониторинга и других высокоточных приложений.

КРЕДО ГНСС [3] – многофункциональное программное обеспечение от отечественного производителя. Предоставляет пользователю функциональную возможность обработки базовых линий (статика), сеансов Stop&Go, и траекторий. Система обеспечивает автоматический выбор оптимальной стратегии расчета,

или позволяет вручную максимально гибко управлять параметрами расчета. КРЕДО ГНСС поддерживает работу со всеми современными сигналами систем GPS, ГЛОНАСС, Galileo, Beidou. Кроме того, КРЕДО ГНСС позволяет выполнять расчет данных одиночного приемника (PPP) и расчет координат от нескольких баз (мультибазовое, или сетевое решение).

Приведенные программные продукты имеют понятный интуитивный интерфейс и рассчитаны на специалистов среднего уровня. Из минусов можно отметить ограниченный «стандартный» набор инструментов, не содержащий многих инструментов, полезных при решении геодинамических задач (например, таких, как расчет и визуализация деформационных характеристик), недоступность пользователя к открытому коду, что не дает возможности создавать надстройки для этих программ. К минусам также относится стоимость данных программных продуктов и отсутствие возможности использовать бесплатно даже ограниченный функционал.

В ряде коммерческого программного обеспечения имеются специализированные модули для решения задач геодинамического мониторинга (например, программный модуль КРЕДО РАСЧЕТ ДЕФОРМАЦИЙ), однако, их функционал подходит только для решения узкого круга задач геодезического мониторинга сооружений.

Обзор возможностей научного программного обеспечения

Научное программное обеспечение обладает расширенными функциональными возможностями в вопросах обработки геодезических измерений, анализа и интерпретации их результатов. Рассмотрим ниже некоторые научные программные комплексы.

GAMIT – программное обеспечение, разработанное Массачусетским технологическим институтом (США), Институтом океанографии Скриппса (США) и Гарвардским университетом (США) при поддержке Национального научного фонда США. Представляет собой набор программ, написанных на языке программирования FORTRAN, для обработки фазовых данных, оценки трехмерных относительных положений наземных станций и спутниковых орбит, атмосферных зенитных задержек и параметров ориентации Земли.

GLOBK – это модуль программного обеспечения GAMIT, включающий фильтр Калмана, основной целью которого является объединение разнородных геодезических данных. Он принимает в качестве данных или «квазинаблюдений» оценки и ковариационные матрицы для координат станций, параметров ориентации Земли, параметров орбиты и положений пунктов, полученных в результате анализа первичных наблюдений.

GAMIT/GLOBK [5] состоит из различных программ для обработки данных, последовательностью запуска которых можно управлять с помощью утилит Shell Unix. Комплекс, в основном, применяется для вычисления ежедневных решений координат, матриц дисперсии-ковариации, неоднозначностей, атмосферных задержек и параметров орбит.

Bernese GNSS [6] – разработка Астрономического института Бернского университета (Швейцария) для постобработки наблюдений ГНСС в научных исследованиях. Данное программное обеспечение изначально написано на языке программирования FORTRAN и дополняется на таких языках как Qt, C++, Perl. Используется Европейским центром определения параметров орбит CODE (Center for Orbit Determination in Europe) для поддержки международной (IGS) и европейской (EUREF/EPN) сетей. Bernese позволяет обрабатывать все основные наблюдения, полученные с помощью высокоточных геодезических приемников.

Также Bernese GNSS поддерживает функции линейного моделирования. Модели, созданные с помощью Bernese, позволяют с высокой точностью учитывать движение литосферных плит, движение грунтов, а также морские приливы и отливы. Кроме того, моделирование с помощью Bernese Processing Engine (BPE) позволяет учитывать все зависящие от времени параметры путем частичного линейного непрерывного представления. В частности, поддерживается учет зенитной тропосферной задержки и ее градиента, параметров ориентации Земли и глобальных ионосферных моделей.

GipsyX [7] – разработан Лабораторией реактивного движения США (JPL) и поддерживается группами приложений и систем слежения за Землей. Программа GipsyX поддерживает обработку данных с пунктов GNSS сетей. Благодаря анализу, заложенному в программу, возможно получить данные о деформации земной поверхности, производить точное определение орбит спутников.

Программное обеспечение GipsyX облегчает комбинированную оценку с помощью фильтра Калмана как в постобработке, так и в реальном времени таких геодезических и геофизических параметров, как координаты и скорости станций, орбиты и часы спутников, ориентацию Земли, ионосферные и тропосферные задержки [8].

Основные вычислительные части GipsyX написаны на языке программирования C++, остальное авторы посчитали более оптимальным написать на языке программирования Python, после чего некоторые части были скомпилированы в такие языки как FORTRAN и Perl.

При помощи ПО GipsyX была обработана информация с более чем 2 000 станций, в которые входят станции IGS, после чего создана база данных на сайте JPL [9] со скоростями пунктов и графиками смещения пунктов в зависимости от времени. В настоящее время GipsyX лежит в основе всех операций по определению орбит в JPL и используется во многих научных исследованиях.

Несмотря на то, что Giodis Deformation Analyzer [10] является добавлением в коммерческое программное обеспечение Giodis, по уровню решаемых задач эта программа близка к научному программному обеспечению. Модуль решает задачи строгого апостериорного анализа деформаций, а также проверки стабильности референцных пунктов на объекте мониторинга, выполняет уравнивание сетей с использованием различных стратегий, позволяет совместно анализировать результаты нескольких циклов измерений.

Приведенные научные программные продукты имеют расширенные возможности анализа геодезических данных и будут полезны для исследований дви-

жений земной коры. Для научно-исследовательских целей у приведенных программных продуктов имеются специальные лицензии, предоставляемые на безвозмездной основе.

Обзор возможностей онлайн-сервисов

Помимо программного обеспечения, устанавливаемого на персональный компьютер, и используемого преимущественно для математической обработки результатов измерений, существует также множество онлайн-сервисов, которые могут быть полезны при решении ряда геодинамических задач. Вот несколько примеров таких сервисов.

UNAVCO Plate Motion Calculator [12] – онлайн-сервис, позволяющий пользователю получить по координатам пункта скорости его смещения. Смещение может рассчитываться по разным моделям движения литосферных плит (NUVEL-1A, ITRF2014 и др.). Также есть возможность выбора плиты, на которой находится пункт. Аналогичными возможностями обладают другие онлайн-калькуляторы – University of Tokyo Plate Motion Calculator, NR-MORVEL56 Plate Motion Calculator, основное отличие которых состоит в представленном наборе моделей литосферных плит.

International GNSS Service (IGS) [11] – онлайн-сервис, который содержит информацию о станциях IGS, координаты и скорости смещения пунктов.

Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS) [13] – информационная система данных о динамике земной коры. Сервис содержит «сырые» файлы измерений, тропосферные и ионосферные задержки и др. Система работает и поддерживается сообществом специалистов по космической геодезии и геодинамике в рамках проекта космической геодезии NASA.

Ocean Tide Loading Provider [14] – сервис для вычисления приливной нагрузки.

Приведенные сайты позволяют получить информацию для более точной обработки в коммерческих и научных ПО. Приведенные сайты предоставляют информацию и модули обработки совершенно бесплатно, что является большим плюсом. Существует также ряд сервисов, на которых можно найти общую информацию о географических, геологических, геофизических характеристиках территорий.

Обзор возможностей программного обеспечения с открытым кодом

Программы с открытым кодом являются бесплатными, их исходный код выложен в сети Интернет в открытом доступе, в последние годы такого программного обеспечения становится все больше, и оно позволяет решать все более широкий спектр различных прикладных задач.

Одним из примеров такого обеспечения, широко распространенного в геодезическом сообществе, является RTKLib [15] – бесплатное приложение с открытым кодом для обработки «сырых» измерений, разработанное Токийским океанографическим университетом. Комплекс поддерживает большинство систем спутникового позиционирования, таких как ГЛОНАСС, SBAS, GPS и др., ре-

жимы позиционирования, как для реального времени, так и для пост-обработки, и поддерживает стандартные форматы и протоколы.

При работе с утилитой RTKPost открываются большие возможности для уточнения результатов обработки ГНСС наблюдений, так как имеется возможность добавлять в обработку файлы точных эфемерид, приливной нагрузки и т. д. По своей сути, RTKLib можно отнести к научному программному обеспечению с открытым кодом, что особенно ценно для малобюджетных научных исследований.

В некотором из приведенного выше научном программном обеспечении имеется возможность выполнять анализ деформаций и строить соответствующие поля распределений деформационных характеристик по результатам геодезических измерений. Однако, в ряде случаев возникает необходимость простого и быстрого построения таких полей по уже обработанным данным. Для этих целей могут использоваться комплексы, разработанные для расчета различных физических полей, например, программный комплекс ELCUT.

ELCUT [16] – компьютерная программа для проведения инженерного анализа и двумерного моделирования методом конечных элементов. ELCUT также хорошо подходит для целей геодинамики и позволяет выполнять анализ деформаций земной коры. Программа не является бесплатной и может выдаваться бесплатно только в качестве учебной версии, при этом она имеет ограничение по количеству точек геометрической модели.

Также был выполнен поиск программ с открытым кодом, решающих аналогичную задачу, некоторые из них представлены ниже.

Русcalculix [17] представляет собой библиотеку Python3, которая использует программу Calculix для решения моделей методом конечных элементов, с помощью которой можно вычислить и визуализировать напряжения деталей, деформации, смещения и силы реакции.

PyLith – программное обеспечение с открытым исходным кодом, написанное на языке Python, использующее метод конечных элементов для двумерного и трехмерного моделирования деформации земной коры.

Также многие авторские программы для решения геодинамических задач представлены на персональных сайтах зарубежных специалистов, занимающихся вопросами геодинамики. Например, профессор кафедры наук о Земле, планетах и космосе Калифорнийского университета Питер Берд разработал пакет программных продуктов с открытым кодом на языке FORTRAN, и затем перевел их на язык программирования Python. На его сайте можно скачать полный пакет программ [18].

Важной работой Питера Берда стало построение модели границ тектонических плит (PB2002), проверить ее работу можно в программе OMEGAxR. Другие программы, приведенные на сайте [18], обладают следующими возможностями: в программном продукте NeoKinema производится расчет моделей деформации орогенных зон по данным геологии, ГНСС данным, и полям скоростей; программа Shells производит расчет и построение карт движений тектонических плит, а также учет деформаций по методу конечных элементов (программа нахо-

дится в разработке); в программном продукте Esurr производится расчет сейсмичности регионов на границах плит; в программном продукте GEAR1 проводится глобальный прогноз сейсмичности, программа SCEC выполняет расчет тензоров деформации [18].

Заключение

Проанализировав возможности рассмотренных программных продуктов, можно сделать выводы о том, что:

– коммерческое программное обеспечение имеет весьма ограниченный функционал, подходящий преимущественно для геодезического мониторинга сооружений, в то время как научное программное обеспечение обладает множеством функций, которые открывают дополнительные возможности для исследований в области геодинамики, но, зачастую, оно является сложным в освоении и требует специального обучения;

– к значительным преимуществам программ с открытым кодом стоит отнести абсолютно бесплатное использование, а также возможность самостоятельно добавлять модули в данные программы. Такой подход открывает возможности для большого числа исследователей, у которых нет доступа к научным ПО;

– развитие программных продуктов с открытым кодом в геодинимике позволит создавать новые бесплатные программные продукты или использовать готовые решения других разработчиков для усовершенствования программ (одним из наиболее распространенных языков для разработки современных программ в области геодинамики является Python).

В результате анализа имеющегося программного обеспечения авторами намечена цель для дальнейших работ – разработка геодинимического модуля с использованием средств языка Python, решающего широкий круг задач по результатам геодезических измерений. Первой задачей, решение которой будет реализовано в модуле, является конечно-элементный анализ деформаций земной коры, не имеющий существенных ограничений по числу точек геометрической модели. В качестве основы для разработки предполагается использовать перечисленные программы с открытым исходным кодом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Trimble Business Center tutorials. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: для авториз. пользователей. URL: <https://geospatial.trimble.com> (Дата обращения 25.04.2022).
2. JAVAD GNSS, ПО Giodis. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : общий доступ. URL: <http://javadgnss.ru/products/po/giodis> (дата обращения 25.04.2022).
3. КРЕДО ГНСС. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : общий доступ. URL: <https://credo-dialogue.ru/produkty/korobochnye-produkty/691-credo-gnss-naznachenie.html> (дата обращения 25.04.2022).
4. South Geomatic Office. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : общий доступ. URL: <https://www.southinstrument.com/company/index.html> (дата обращения 25.04.2022).
5. GAMIT/GLOBK – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : общий доступ. URL: <http://geoweb.mit.edu/gg/> (дата обращения 25.04.2022).
6. Bernese GNSS Software. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : общий доступ. URL: <http://www.bernese.unibe.ch/> (дата обращения 25.04.2022).

7. JPL GipsyX. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : общий доступ. URL: <https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov/> (дата обращения 25.04.2022).
8. 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.
9. GNSS Time Series, Jet Propulsion Laboratory. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : общий доступ. URL: <https://sideshow.jpl.nasa.gov/post/series.html> (дата обращения 25.04.2022).
10. Benvenuti, E. Finite Element Modelling of Coupled Fluid-Flow and Geomechanical Aspects for the Sustainable Exploitation of Reservoirs: The Case Study of the Cavone Reservoir. / E. Benvenuti, G. Maurillo. – Текст : непосредственный. // *Geosciences*. – 2019. – Т. 9, № 5. – С. 213.
11. International GNSS Service (IGS). – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : общий доступ. URL: <https://igs.org/> (дата обращения 25.04.2022).
12. 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 25.04.2022).
13. Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS). – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : для авторизованных пользователей. URL: <https://cddis.nasa.gov/> (дата обращения 25.04.2022).
14. Ocean tide loading provider. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: общий доступ. URL: <http://holt.oso.chalmers.se/> (дата обращения 25.04.2022).
15. RTKLIB. – [Электронный ресурс] / An Open-Source Program Package for GNSS Positioning. – Режим доступа: общий доступ. URL: <http://www.rtklib.com/> (Дата обращения 25.04.2022).
16. ELCUT Студенческий версия 6.5. – [Электронный ресурс] / ООО «Тор». – Санкт-Петербург, 2021 – Режим доступа: для авториз. пользователей. URL: https://elcut.ru/free_soft_r.htm (дата обращения 25.04.2022).
17. Pycalculix. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: общий доступ. URL: <https://pyri.org/project/pycalculix/> (дата обращения 25.04.2022).
18. Kvas, A. A satellite-only global gravity field model GOCO06s / A. Kvas, J. M. Brockmann, S. Krauss, T. Schubert, T. Gruber, U. Meyer, T. Mayer-Gürr, W. D. Schuh, A. Jäggi, R. Pail – Текст : непосредственный. // *Earth Syst. Sci. Data*. – 2021. С. 13, 99 – 118.

© И. Е. Дорогова, К. С. Духовников, 2022