

УДК 004.942:528.2/.3

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ МЕТОДОМ ХРИСТОВА

П.С. ДОЛГИЙ

(Представлено: канд. техн. наук, доц. Г.А. ШАРОГЛАЗОВА)

*Отражена методика моделирования геодинамических процессов методом Христова, сделано обоснование выбора языка программирования для разработки программного продукта, описан полученный продукт и его отладка на основе реальных данных Полоцкого геодинамического профиля.*

Геодинамические явления происходят непрерывно на всей планете и подразделяются на глобальные (движение полюсов Земли), крупномасштабные (движение литосферных плит), а также региональные и локальные, связанные с изменением местоположения и вариациями силы тяжести относительно небольших участков земной коры [1].

Цель данной работы – разработка программного продукта для моделирования геодинамических процессов по результатам повторного нивелирования. В работе будет уделено внимание исследованию локальных современных вертикальных движений земной коры.

Для исследования локальных движений земной коры используют такие геодезические методы как повторное нивелирование, повторные линейно-угловые измерения, повторные спутниковые наблюдения. Способом, предоставляющим наиболее точные сведения о вертикальных движениях точек земной поверхности, остается повторное высокоточное нивелирование [2].

Современные исследования в геодинамике требуют комплексного междисциплинарного подхода. Важнейшие инструменты исследования в геодинамике – методы математического моделирования и информационные технологии [3].

Метод, используемый для моделирования современных вертикальных движений земной коры во времени основан на алгебраических полиномах и назван в честь болгарского геодезиста Владимира Христова.

Функция алгебраического полинома для линейной аппроксимации приобретает следующий вид:

$$H_k^i = H_k^0 + V_k (T_i - T_0). \quad (1)$$

Для квадратичной аппроксимации:

$$H_k^i = H_k^0 + V_k (T_i - T_0) + A_k (T_i - T_0)^2. \quad (2)$$

Для кубической аппроксимации:

$$H_k^i = H_k^0 + V_k (T_i - T_0) + A_k (T_i - T_0)^2 + B_k (T_i - T_0)^3. \quad (3)$$

Для определения коэффициентов  $H(0)$ ,  $V$ ,  $A$ ,  $B$  составляется система уравнений – одно уравнение для каждого измеренного превышения в каждую эпоху. Этим уравнениям придают веса  $P$ , определяемые как величины, обратно пропорциональные длине секций:

$$P_m = \frac{C}{L_m}, \quad (4)$$

где  $C$  – постоянная, равная отношению априорной погрешности единицы веса к погрешности на 1 км хода;  $L_m$  – длина линии в километрах [4; 5].

В результате получают систему нормальных уравнений, которую решают по формуле

$$X = (A^T P A)^{-1} A^T P L. \quad (5)$$

Прибавляя полученные значения поправок к приближенным высотам пунктов, получают уравненные высоты на начальную эпоху

$$H_0 = H^0 + \delta H^0. \quad (6)$$

Подставляя полученные значения скорости, ускорения и производной ускорения в уравнения, получают модельные значения высот на каждую эпоху. Вычитая модельные высоты смежных пунктов хо-

да, получают модельные превышения. Из вычисленных модельных значений высот вычитают полученные по результатам измерений. Среднеквадратическую ошибку модели вычисляют по формуле

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum \Delta h_{nk}}{n \cdot k}}, \quad (7)$$

$\Delta h_i$  – разность вычисленных и измеренных значений высот для каждого пункта за каждую эпоху измерений;  $n$  – номер пункта;  $k$  – номер эпохи измерений [4; 5].

На данный момент для моделирования современных вертикальных движений земной коры используется программный продукт ДК СВДЗК, разработанный в Полоцком государственном университете в 2008 году [6]. Этот продукт имеет высокую скорость вычислений, однако не имеет возможности выполнения кубической аппроксимации, модулей анализа и графического представления результатов.

Исходный код продукта к настоящему времени утерян, поэтому было решено выполнить разработку подобного программного продукта заново.

Для реализации продукта выбран язык программирования python версии 3.3. Язык является современным, в настоящий момент, согласно различным рейтингам [7–10], входит в пятерку наиболее популярных в мире. Разработку значительно упрощают лаконичность языка, широкое использование таких производительных языковых конструкций, как генераторы, лямбда-функции и другие, многофункциональная стандартная библиотека, а также возможность простой установки дополнительных модулей. Графический интерфейс пользователя разрабатывался на основе фреймворка PyQt5. По сравнению с другими фреймворками графического интерфейса для языка Python (PySide, Tkinter, wxWidgets) PyQt5 имеет наиболее полный набор графических элементов, наиболее полную документацию, хорошо описан в технической литературе. Разработчиком PyQt5 является компания Riberbank Computing. Продукт имеет лицензию GPL, которая предоставляет пользователю право копировать, модифицировать и распространять программы, а также гарантировать, что и пользователи всех производных программ получают вышеперечисленные права, при этом запрещая создавать на основе свободной программы под GPL другой проект, не предоставляя его исходники пользователям [11].

Для расчетов использовалась библиотека numpy. Данная библиотека, написанная на C, предназначена для научных вычислений. Библиотека не позволяет создавать коллекции данных с различными типами, как в «сыром» Python, следовательно, не требуется проверка типов при операциях с этими данными и производительность возрастает в разы [12]. В разработанном нами программном продукте библиотека numpy использовалась не только для сложных операций, таких как умножение и обращение матриц, но и для более простых, например, вычисление суммы массива [13].

Для визуализации расчетов использована библиотека matplotlib. Данная библиотека имеет возможность как отображать построенные изображения в отдельном окне, так и встраивать их в окна различных фреймворков графического интерфейса python [14].

Для написания кода использовалась интегрированная среда разработчика JetBrains PyCharm edu, являющаяся самой совершенной средой разработки на языке python, поддерживающая подсветку синтаксиса, автодополнение и т.д.

Интерфейс программного продукта реализован при помощи вкладок. На первой вкладке выполняется ввод либо импорт исходных данных с возможностью редактирования. Далее необходимо выбрать исходный пункт и ввести его высоту. После выполнения расчетов в окне программы отображаются высоты и превышения, вычисленные по методу Христову, разность между вычисленными и измеренными значениями, а также графическое представление результатов – пространственно-временные графики движения пунктов нивелирования в двумерном и трехмерном виде, графики накопления разностей превышений, а также графики поведения каждого из реперов в отдельности.

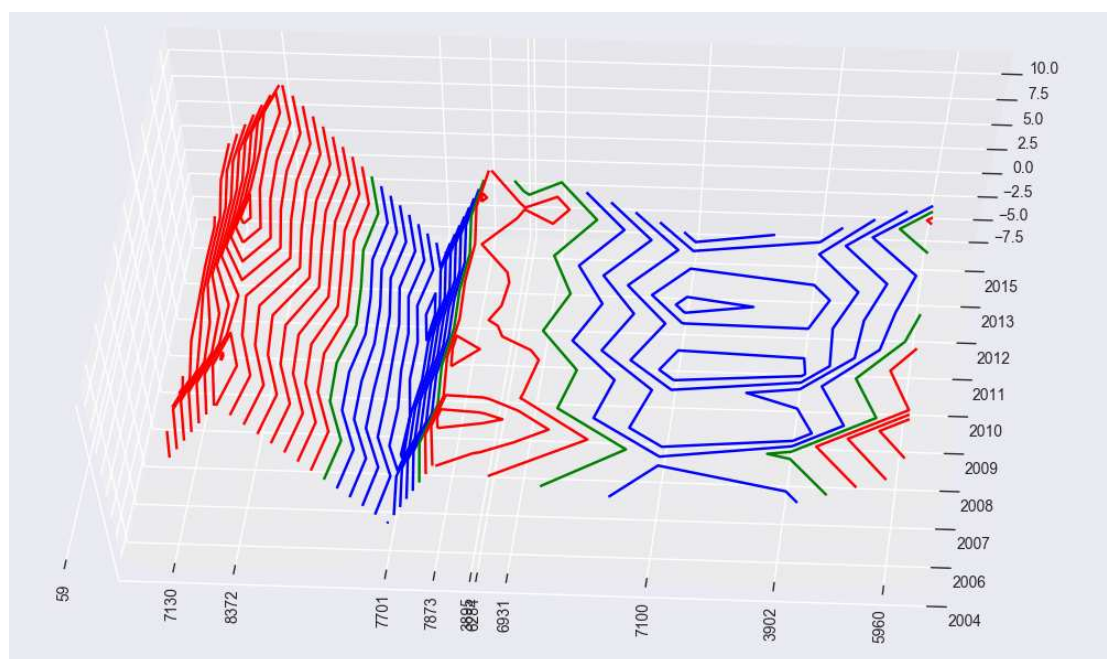
Отладка программного продукта выполнялась на основе реальных измерительных данных Полоцкого геодинимического профиля, расположенного к северо-западу от г. Полоцк. В данной работе использовались данные 10 циклов (с 2004 по 2015 годы за исключением 2005 и 2014) высокоточного нивелирования на 11 нивелирных пунктах (1 исходный). Таким образом, исходные данные были представлены 100 измерениями [15].

Прибавив вычисленные поправки к полученным по результатам измерений высотам, получили уравненные высоты на эпоху 2003 года (формула (6)). Подставив полученные высоты и значения коэффициентов в формулы ((1)–(3)), вычислили модельные значения высот. Вычитая модельные значения высот конечных пунктов для каждой линии из высот начальных пунктов, получили модельные превышения. Далее сравнили модельные значения высот с измеренными. По формуле (7) нашли среднюю квадратическую ошибку (СКО) для каждой модели. Значения, которые превышают двойную СКО, не согласуются с моделью с вероятностью 95%.

Можно заметить, что с увеличением степени аппроксимации уменьшается число несогласующихся значений. Также примечательно, что во всех трех моделях наибольшее количество несогласующихся значений приурочены к реперу 8372, что, скорее всего, объясняется существованием тектонических разломов по обе стороны от него [15]. Это также подтверждается и на пространственно-временном графике (рисунок 1).

Таблица 1. – Характеристики различных моделей, описывающих движение нивелирных пунктов Полоцкого геодинимического профиля

| Характеристика модели                             | Модель   |              |            |
|---|----------|--------------|------------|
|   | линейная | квадратичная | кубическая |
| СКО, мм   | 1,135    | 0,860        | 0,768      |
| Число несогласующихся с вероятностью 95% значений | 6        | 5            | 3          |



**Рисунок 1. – Пространственно-временной график движения нивелирных пунктов Полоцкого геодинимического профиля в трехмерном виде. Синим цветом обозначены отрицательные значения; красным – положительные, зеленым – нулевые**

Далее мы рассмотрели накопление разностей превышений для различных моделей. В одних и тех же координатных осях строились два графика: для измеренных значений и для модельных. Рассматривая два графика, можно понять, насколько хорошо согласуется модель с измеренными значениями. Изучив графики для разностей между различными эпохами, мы выяснили следующее:

- графики для более поздних эпох во всех моделях согласуются с измерениями лучше, чем для более ранних;
- графики для моделей с более высокими степенями аппроксимации согласуются с измерениями лучше, чем с более низкими.

Несмотря на то, что среднеквадратическая ошибка кубической аппроксимации наименьшая среди всех моделей, а графики накопления разностей превышений наилучшим образом согласуются с измеренными значениями, можно сделать *вывод*, что кубическая модель наилучшим образом описывает движение нивелирных пунктов. Однако такой вывод нельзя считать окончательным. Необходимо продолжить исследование при наличии большего количества эпох измерений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пеллинен, Л.П. Высшая геодезия (теоретическая геодезия). – М. : Недра, 1978. – 264 с.

2. Шароглазова, Г.А. Применение геодезических методов в геодинамике / Г.А. Шароглазова. – Новополоцк : ПГУ, 2002. – 192 с.
3. Шароглазова, Г.А. Многодисциплинарный подход к моделированию геодинамических процессов / Г.А. Шароглазова П.С. Долгий // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Строительство. Прикладные науки. – 2018. – № 8. – С. 180–184.
4. Кафтан, В.И. Временной анализ геопространственных данных: кинематические модели : дис. ... д-ра техн. наук / В.И. Кафтан. – М., 2003. – 284 л.
5. Остач, О.М. Методическое руководство по геодезическим работам на геодинамических полигонах / О.М. Остач, В.Н. Дмитроиченков. – М. : ЦНИИГАИК, 1984.
6. Анализ применения метода Христова к исследованию вертикальных движений земной коры / Г.А. Шароглазова [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. Строительство. – 2008. – № 12.
7. Исследование StackOverflow: JavaScript – самый популярный язык программирования | Dev.by // ИТ в Беларуси | Dev.by [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dev.by/lenta/main/stackoverflow-2017>. – Дата доступа: 02.02.2018.
8. Топ-10 языков программирования в 2017 году по версии GitHub // Tproger – создано программистами для программистов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tproger.ru/articles/github-top-10-languages-2017/>. – Дата доступа: 01.02.2018.
9. PYPL PopularitY of Programming Language // PYPL PopularitY of Programming Language [Electronic resource]. – Mode of access: <http://pypl.github.io/PYPL.html>. – Date of access: 01.02.2018.
10. TIOBE Index | TIOBE – The Software Quality Company // TIOBE Index | TIOBE – The Software Quality Company [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.tiobe.com/tiobe-index/>. – Date of access: 01.02.2018.
11. Введение в PyQt5 [урок 1] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://python-3.ru/page/into-pyqt5> – Дата доступа: 05.03.2018.
12. Вандер Плас Дж. Python для сложных задач. Наука о данных и машинное обучение / Вандер Плас Дж. – СПб. : Питер, 2018. – 576 с.
13. NumPy – NumPy // NumPy – NumPy [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.numpy.org/>. – Date of access: 03.02.2018
14. Matplotlib: Python plotting – Matplotlib 2.2.2 documentation [Electronic resource]. – Mode of access: <https://matplotlib.org/>. – Date of access: 05.08.2018.
15. Инструментальные исследования современной геодинамики в Полоцком регионе : отчет о НИР / Полоц. гос. ун-т ; рук. Г.А. Шароглазова. – Новополоцк, 2013. – 83 с. – № ГБ 0314.