

УДК [551.24:004.4]+528.02  
DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-6-15-27

## Разработка геодинимического программного модуля для оценивания деформаций земной коры по результатам геодезических измерений

И. Е. Дорогова<sup>1</sup>\*, К. С. Духовников<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

\* e-mail: inna\_dorogova@mail.ru

**Аннотация.** В статье выполнен обзор возможностей свободной библиотеки Python Py calculix, содержащей ряд функций для вычисления деформаций методом конечных элементов. Рассмотрены поддерживаемые методы создания сетки, формы и порядок элементов, для которых может быть выполнен расчет с помощью встроенных функций библиотек. Описан процесс создания программного обеспечения Defor(M)aster, основные требования к интерфейсу, функциональным возможностям и представлению результатов. Разработанное программное обеспечение для расчета параметров деформации земной коры по результатам геодезических измерений протестировано и выполнена оценка достоверности расчета параметров деформации для контрольного объекта путем сравнения результатов, полученных в разработанном программном обеспечении, с результатами, полученными в программном комплексе ELCUT, который обладает схожими функциональными возможностями. Сравнительный анализ результатов, полученных в двух программах, говорит о схожем характере распределения и хорошей согласованности двух наборов параметров деформации. Также сформулированы направления для дальнейшего усовершенствования разрабатываемого программного обеспечения и расширения перечня его функциональных возможностей.

**Ключевые слова:** геодинамика, ГНСС-наблюдения, деформации земной коры, программное обеспечение, Python, метод конечных элементов, спутниковые измерения

### Введение

В настоящее время наблюдается общая тенденция развития программных продуктов с открытым исходным кодом, которая затронула также и сферу геодинимических исследований [1].

К значительным преимуществам программ с открытым кодом стоит отнести их бесплатное использование, а также возможность самостоятельно добавлять модули в данные программы. Такой подход открывает возможности для дополнения и совершенствования программных комплексов, позволяет создавать новые программные продукты или использовать готовые решения других разработчиков для усовершенствования программ.

Одним из наиболее распространенных языков для создания программного обеспечения различного назначения на данный момент является Python [2]. Этот язык программирования имеет большое количество библиотек для создания программ различной сложности. Библиотеки являют собой набор

функций, способных визуализировать результаты, проводить расчеты и возвращать конечный результат.

В результате анализа имеющегося программного обеспечения и программных ресурсов с открытым исходным кодом, позволяющих решать некоторые задачи геодинимических исследований по результатам повторных геодезических измерений в работе [1], было принято решение о разработке с использованием средств языка Python геодинимического модуля Defor(M)aster, позволяющего по результатам геодезических измерений выполнять расчет плоских деформаций земной коры.

Математическим аппаратом, лежащим в основе разрабатываемого программного обеспечения, является конечно-элементный анализ, теоретической базой – основные законы теории упругости.

В качестве основы для разработки программного обеспечения использовалась свободная библиотека Python Py calculix [3], содержащая ряд функций для вычисления деформаций методом конечных элементов.

### Теория вычисления деформаций методом конечных элементов

Методика определения деформаций земной коры по геодезическим данным на основе теории упругости основана на предположении о существовании непрерывно меняющегося во времени поля деформаций земной коры и ее поверхностной части, согласно которому каждой точке земной поверхности ставится в соответствие относящийся к определенному моменту времени тензор деформаций, получаемый по результатам повторных геодезических измерений [4–7].

Напряжение в любой точке тела характеризуется шестью величинами – компонентами напряжений: тремя нормальными напряжениями и тремя касательными напряжениями. Деформация в любой точке тела также характеризуется шестью величинами – компонентами деформаций: относительными удлинениями и сдвигами [4].

Основным физическим законом теории упругости является обобщенный закон Гука, согласно которому нормальные напряжения линейно зависят от деформаций.

Математическая задача теории упругости при равновесии заключается в том, чтобы, зная действующие внешние силы (нагрузки) и граничные условия, определить значения компонент напряжений и деформаций в любой точке тела, а также компонент вектора перемещения каждой частицы тела в виде функций от декартовых прямоугольных координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$  точек тела. Исходными для решения этой задачи являются следующие дифференциальные уравнения равновесия:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} + \rho F_x &= 0; \\ \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} + \rho F_y &= 0; \\ \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \rho F_z &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность материала;

$F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  – проекции на координатные оси действующей на каждую частицу тела силы тяжести [5].

К трем уравнениям равновесия (1) присоединяются 6 равенств в случае изотропного тела и еще 6 равенств, устанавливающих зависимости между компонентами деформаций и перемещений:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u_x}{\partial x}; & \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial u_y}{\partial y}; & \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial u_z}{\partial z}; \\ 2\varepsilon_{xy} &= \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}; & 2\varepsilon_{yz} &= \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y}; \\ 2\varepsilon_{xz} &= \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$  – компоненты вектора перемещений;

$\varepsilon_{xx}$ ,  $\varepsilon_{yy}$ ,  $\varepsilon_{zz}$  – относительные удлинения;

$\varepsilon_{xy}$ ,  $\varepsilon_{yz}$ ,  $\varepsilon_{xz}$  – деформации сдвига.

Для характеристики деформаций используют также матрицы, составленные из их компонент, называемые тензорами деформации:

$$T_\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Деформация в любой точке тела характеризуется шестью величинами относительных удлинений и деформаций сдвига. Соответственно горизонтальные деформации однозначно определяются с помощью четырех параметров [4].

Согласно теории деформации, любой участок поверхности, который находится в состоянии однородного деформирования, может быть охарактеризован двумя взаимно перпендикулярными направлениями, деформации по которым экстремальны.

Эти направления называются направлениями максимального и минимального растяжений. Максимальное  $E_1$  и минимальное  $E_2$  растяжения – относительные изменения длин отрезков во вторую эпоху по сравнению с первой, поэтому  $E_1$  и  $E_2$  являются безразмерными величинами. Максимальный сдвиг  $\gamma_m$  – сдвиговый компонент деформации, ха-

рактически характеризующий формоизменение элемента земной поверхности.

$$E_1 = \frac{1}{2} \left( \Delta + \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2} \right); \quad E_2 = \frac{1}{2} \left( \Delta - \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2} \right);$$

$$\gamma_m = E_1 - E_2 = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2}. \quad (4)$$

При решении геодезических задач в качестве математического аппарата определения параметров деформации применяется метод конечных элементов [8]. Суть метода конечных элементов заключается в том, что исследуемая область представляется в виде дискретных элементов небольших размеров, обычно треугольной формы, в узлах которых вычисляются значения деформаций. Нагрузки, которым подвержены небольшие элементы земной поверхности, заменяют на точечные. Предполагается, что деформация внутри каждого элемента однородна и может быть описана с помощью достаточно простых функций. Приведенный метод может применяться и для изучения как горизонтальных,

так и вертикальных движений земной поверхности [9].

Метод конечных элементов применяется, когда на исследуемой непрерывной области известны значения изучаемых параметров только для нескольких точек, принадлежащих данной области, возникает необходимость аппроксимации изучаемых параметров на всю исследуемую область. Для более точной аппроксимации область разбивается на подобласти малых размеров, называемые конечными элементами, и задача аппроксимации решается внутри каждого такого элемента. Таким образом, можно получить численное решение для любой точки конечного элемента, а значит, и всех точек исследуемой области.

При использовании этого метода площадь полигона разбивается на совокупность конечных элементов (рис. 1). Внутри элементов получают распределения параметров деформации, и значения этих параметров в любой точке, принадлежащей области полигона, становятся известными [4].

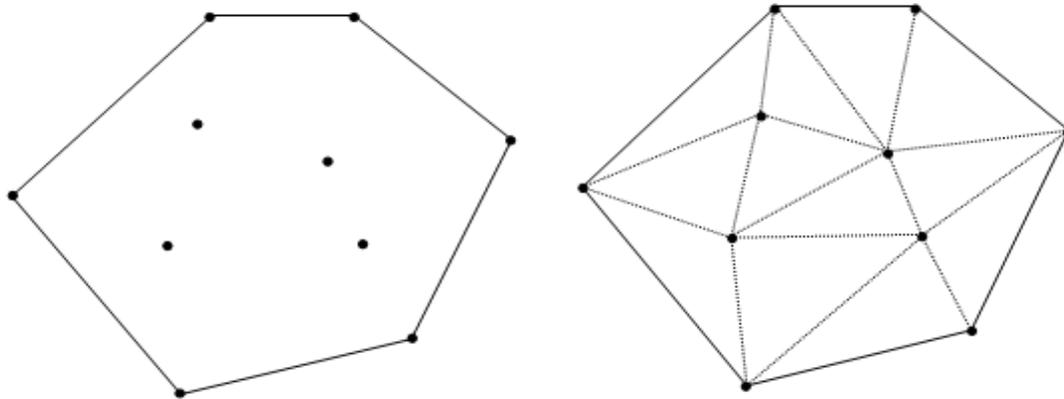


Рис. 1. Выделение конечных элементов внутри области

**Требования к разрабатываемому программному обеспечению и возможности библиотеки Python Pyculix для вычисления деформаций методом конечных элементов**

В качестве основы для разработки программного обеспечения использовалась свободная библиотека Python Pyculix [3], содержащая ряд функций для вычисления деформаций методом конечных элементов.

Основные типы проблем, с которыми работает библиотека: плоское напряжение, плоская деформация, осесимметричные модели.

Формы элементов, для которых может быть выполнен расчет с помощью встроенных функций библиотеки: треугольная, четырехугольная.

Порядок элементов, используемых для расчета параметров: первый (только угловые узлы); второй (угловые и средние узлы). Ис-

пользование элементов второго порядка позволяет получать более точные результаты.

Возможные элементы для построения геометрии объекта: прямые линии, дуги, скругления / наложения, области.

Виды нагрузок в библиотеке: давление, сила тяжести, скорость вращения, давление воды.

Временные шаги: поддерживается несколько временных шагов в устойчивом состоянии.

Методы создания сетки: Calculix CGX (CalculiX GraphiX) или Calculix GMSH (Geometry Mesh Solver with Holes), запускаются в фоновом режиме для автоматизированного создания сетки элементов.

Решение: с помощью модуля Calculix CCX (Comand CalculiX) в фоновом режиме [10].

Для применения библиотеки Pycalculix были изучены основные модули и функции, составляющие данную библиотеку, и выбран ряд функций, использование которых позволило упростить написание программного кода [11]. К числу таких модулей и функций относятся: модуль FeaModel, предназначенный для построения сетки конечных элементов; функция mesh модуля FeaModel, которая позволяет задавать размер элементов сетки; функция set\_eshape модуля FeaModel, задающая размер элементов сетки; модуль Geometry, описывающий геометрию модели; модуль Part, с помощью которого записываются координаты точек, полученные из введенных в форму значений, а также задается начало системы координат; функция set\_constr, с помощью которой в обработку были переданы введенные значения смещений; модуль Problem, который позволяет задать задачу расчета деформаций по полученным смещениям (этот модуль принимает на вход только выбранный тип деформации, в нашем случае – struct); модуль Material, позволяющий задавать плотность материала, модуль Юнга, коэффициент Пуассона и модуль сдвига, необходимые для выполнения расчета деформаций; модуль Plot, позволяющий визуализировать и выводить на экран полученные промежуточные результаты (геометрию полигона, построенную сетку конечных элементов) и поля распределения деформационных параметров.

Перед выполнением работ по разработке программного обеспечения было составлено техническое задание с подробным описанием требований к создаваемой программе.

Общие требования к разрабатываемому программному обеспечению:

- программа способна формировать сетку конечных элементов для заданной местности с опорой на заданные точки;

- программа должна выполнять автоматическое вычисление деформационных параметров для большого объема данных, а также визуализировать параметры в виде полей распределения.

Функциональные требования:

- ручной ввод координат и скоростей пунктов или их чтение из файла;

- построение сетки конечных элементов треугольной формы на заданной местности для дальнейшего расчета деформаций по методу конечных элементов;

- определение параметров деформаций земной коры внутри каждого конечного элемента по известным формулам теории упругости;

- построение изображений полей распределения деформаций земной коры на заданном участке;

- вывод построенных изображений.

Требования к интерфейсу:

- ввод данных: координаты ( $X$ ,  $Y$ ) и скорости смещения пунктов ( $dx$ ,  $dy$ );

- ручное добавление точек или их чтение из файла;

- удаление точек;

- вывод построенных изображений.

Код программы был написан в Microsoft Visual Studio Code [12], который представляет собой редактор кода, оптимизированный для создания и отладки современных приложений. Microsoft Visual Studio Code позволяет удобнее и быстрее форматировать написанный код.

### **Создание модуля обработки данных и вычисления деформаций**

PyCalculix содержит множество модулей для построения деформаций разного характера по сетке конечных элементов [11]. Для построения сетки использовался модуль FeaModel.

В этом модуле задаются:

- имя конечного файла;
- единицы измерения;
- форма конечных элементов (треугольная или квадратная);
- геометрия модели (которая заранее описывается при помощи модулей Part и Geometry);
- размер элементов сетки и тип построения.

В модуль Part в программе записываются координаты точек, полученные из введенных в форму значений, а также задается начало системы координат.

При помощи загруженной функции mesh модуля FeaModel в программе реализована возможность устанавливать размер элементов сетки. Значение параметра, устанавливающего размеры можно задавать в пределах от 0,0001 до 1. Также эта функция позволяет задать тип построения сетки (адаптирован для разных типов фигур).

Для получения требуемого результата в модуль FeaModel были заданы следующие значения:

- имя конечного файла feaex;
- единицы измерения – метры;
- вид конечных элементов – треугольник;
- размер элементов сетки – 1,0, тип построения – fineness.

С помощью модуля Plot реализованы вывод и геометрическое представление на экране полученных промежуточных и итоговых результатов (геометрии полигона, построенной сетки конечных элементов, полей распределения компонент деформации).

При помощи функции set\_constr реализована передача в обработку значений смещений пунктов, которые были введены в программу пользователем.

По полученным смещениям программа выполняет расчет деформации, используя описание задачи из модуля Problem, в котором задан тип деформации (для разрабатываемой программы – тип struct), а также плотность материала, модуль Юнга, коэффициент Пуассона и модуль сдвига, сохраняющиеся в модуле Material.

Полученные результаты могут быть представлены в виде полей распределения соответствующих характеристик деформаций. Визуальное представление параметров де-

формации дает возможность наглядно оценить особенности их распределения.

### **Создание интерфейса программного обеспечения**

Для создания интерфейса программы был использован набор библиотек Python – PyQt5 [13].

PyQt5 реализован в виде набора Python-модулей. Эта библиотека имеет более 620 классов и 6 000 функций и методов и является одной из самых мощных библиотек графического интерфейса пользователя.

Написание кода включало импортирование нужных модулей из библиотеки PyQt5. Затем был создан класс с обозначением типа вводимых в программу данных: целочисленные номера для имен точек и числа с плавающей запятой – для координат и скоростей пунктов.

Далее был создан основной класс для осуществления действий с программой: добавлен массив, в котором будут храниться записанные данные, создан тип поля (лайаут), в котором будут находиться все типы кнопок и других полей (виджетов), также была добавлена функция исполнения и имя программы. Затем был написан код, отвечающий за основное окно программы, в котором будут выполняться все действия.

В основное окно были добавлены:

- пустая группа полей, в которую будут добавляться точки;
- главный слой, который будет отвечать за равномерное расположение виджетов;
- виджет, позволяющий листать точки;
- добавление форм для заполнения их данными.

В наполнение основного окна также были включены кнопки добавления точки и кнопка обработки.

Для обеспечения возможности заполнения форм данных о каждой точке был написан код, создающий пустую форму с заданными параметрами, которая будет доступна для заполнения пользователем, реализована автоматическая нумерация точек.

Для удобства последующей обработки предусмотрено добавление введенных дан-

ных в массив и кнопка удаления. Также реализован корректный выход из программы.

**Оценка достоверности результатов обработки данных и расчета параметров деформаций в разработанном программном обеспечении**

Для оценки достоверности результатов расчета параметров деформаций в разработанном программном обеспечении было выполнено их сравнение с результатами, полученными в программном комплексе ELCUT [14].

ELCUT – это программный комплекс, предназначенный для двумерного и трехмерного моделирования и инженерного анализа методом конечных элементов. ELCUT является проприетарным программным обеспечением и распространяется как коммерческая программа «ELCUT Профессиональный». Имеется бесплатная (freeware) программа для учебных целей и демонстрационного применения «ELCUT Студенческий». Программа ELCUT совместима с известными САД-системами через импорт и экспорт файлов в формате \*.dxf. Программное обеспечение ELCUT может быть встроено в другую программу или связано с внешней программой.

Комплекс ELCUT содержит модули для решения разных задач. Во всех версиях программы включены редактор геометрии, редактор данных, компонент решения задач и постпроцессор. Тип решения, редактор данных и запускаемый постпроцессор зависят

от типа решаемой задачи. Также в состав ELCUT входит несколько надстроек, в том числе LabelMover для параметрического анализа.

Программа широко применяется и для расчета деформаций земной коры [4, 7, 15–18], однако демонстрационная версия имеет существенные ограничения по числу обрабатываемых точек (не более 20).

Сравнение производилось по компонентам деформации, полученным в двух программах при расчете одного и того же контрольного объекта. Список исходных координат и смещений точек контрольного объекта представлен в таблице.

Координаты и смещения точек контрольного объекта

Пункт	Координаты		Смещения	
	X, м	Y, м	dx, м	dy, м
1	595 241,368	691 237,459	0,088	-0,06
2	594 864,729	694 028,133	0,075	-0,171
3	592 775,252	698 802,723	0,068	-0,039
4	590 467,723	693 758,113	0,041	-0,081
5	591 749,385	687 303,374	-0,036	0,053
6	592 456,178	686 220,353	-0,048	0,038
7	595 848,288	685 224,467	-0,039	0,066

Данные из таблицы были введены в обе программы и произведена обработка.

На рис. 2–5 представлены результаты обработки в разработанной программе.

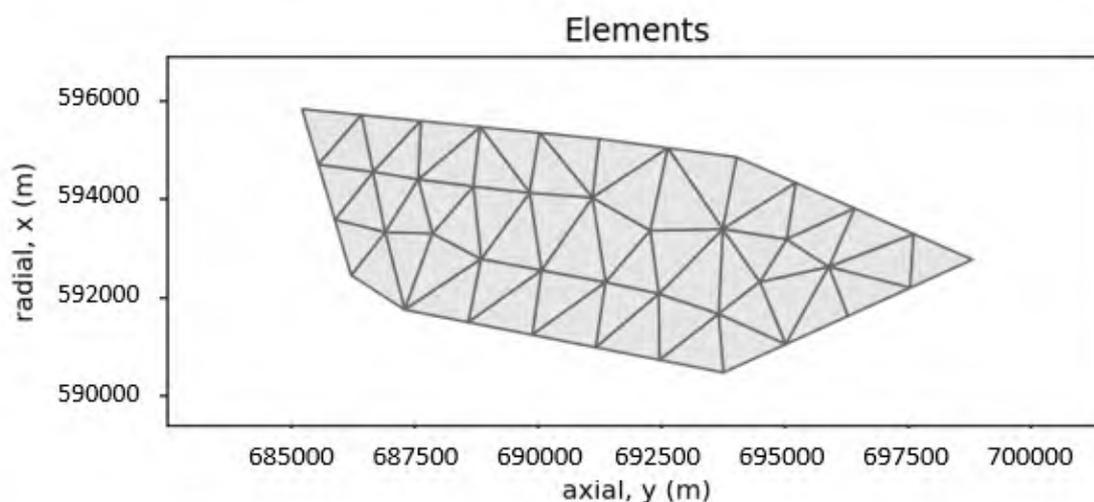


Рис. 2. Сетка конечных элементов для контрольного объекта в Defor(M)aster

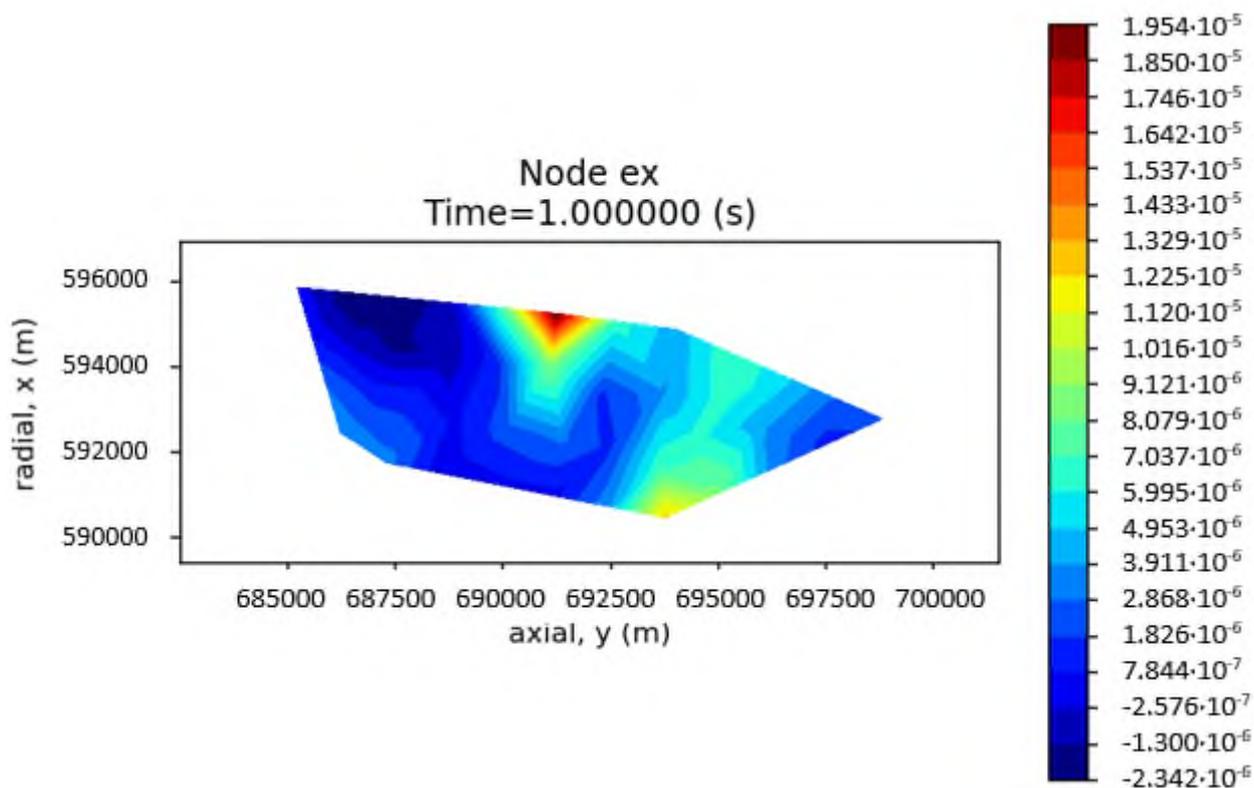


Рис. 3. Деформация по оси X в Defor(M)aster

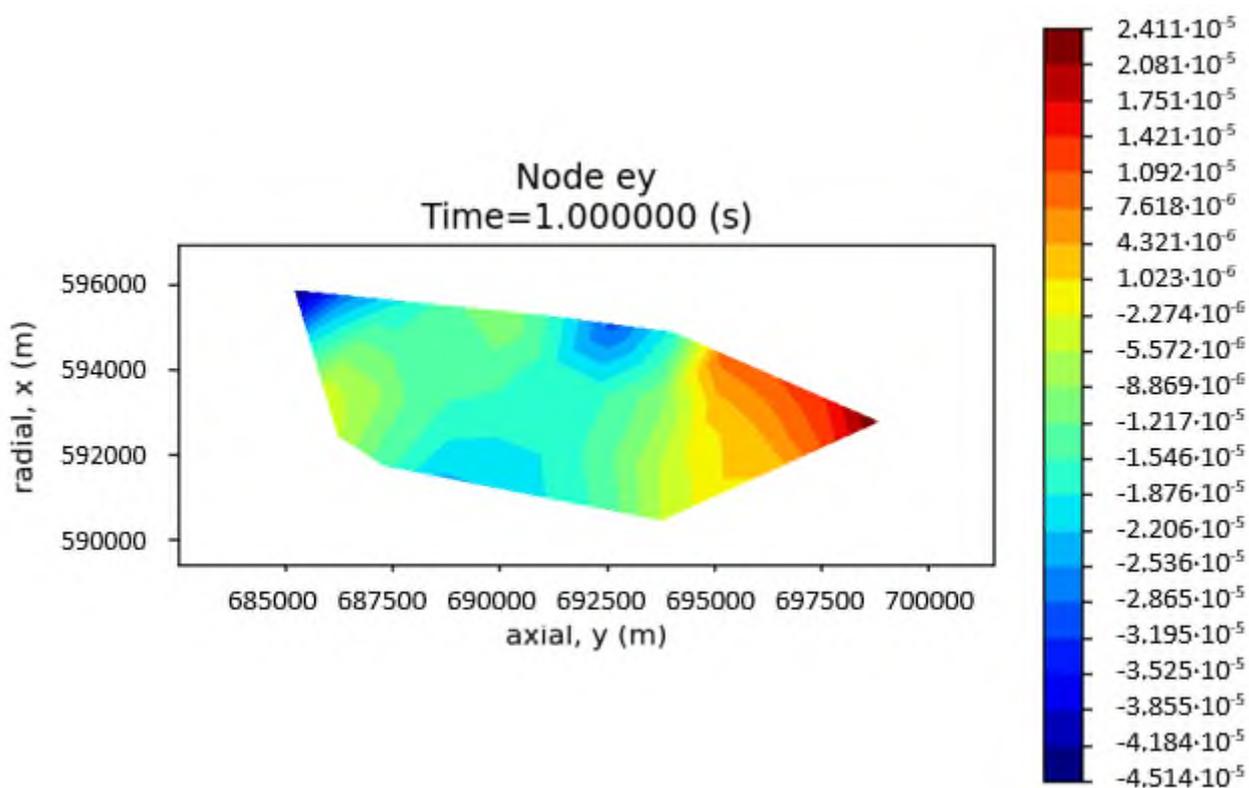


Рис. 4. Деформация по оси Y в Defor(M)aster

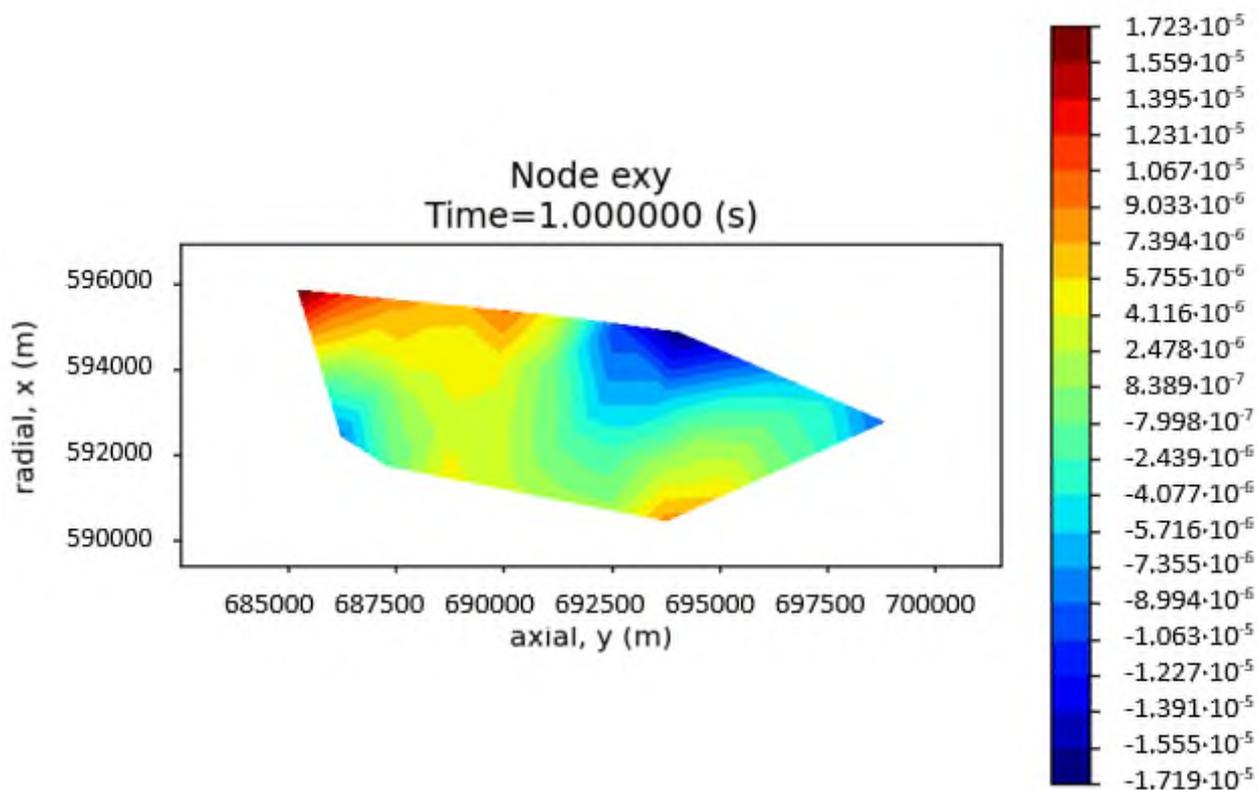


Рис. 5. Сдвиговая деформация в Defor(M)aster

На рис. 6–9 представлены аналогичные результаты обработки в программном комплексе ELCUT.

Сравнение полученных полей распределения деформационных характеристик земной

коры позволяет сделать вывод о хорошей согласованности результатов обработки в двух программных продуктах; полученные компоненты деформации схожи как по величине, так и по характеру распределения.

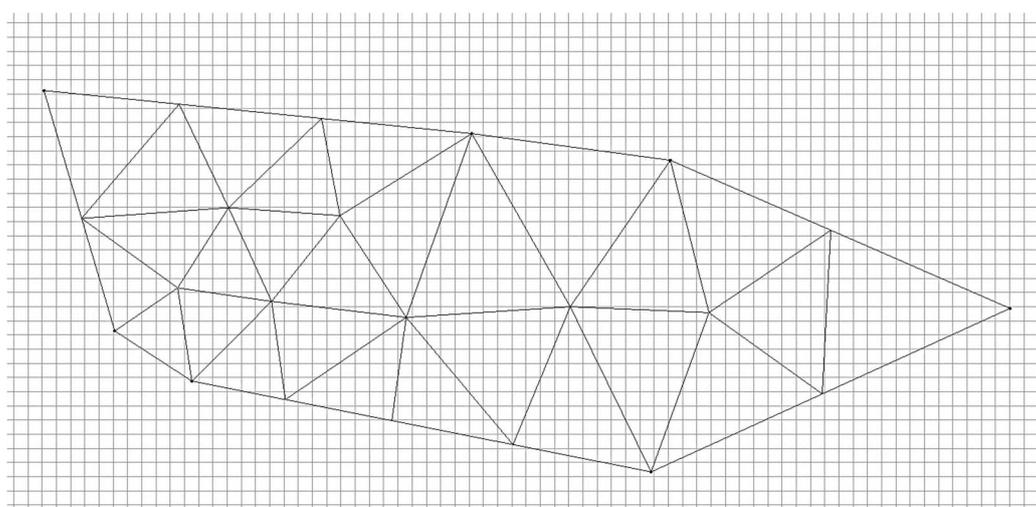


Рис. 6. Сетка конечных элементов контрольного объекта в ELCUT

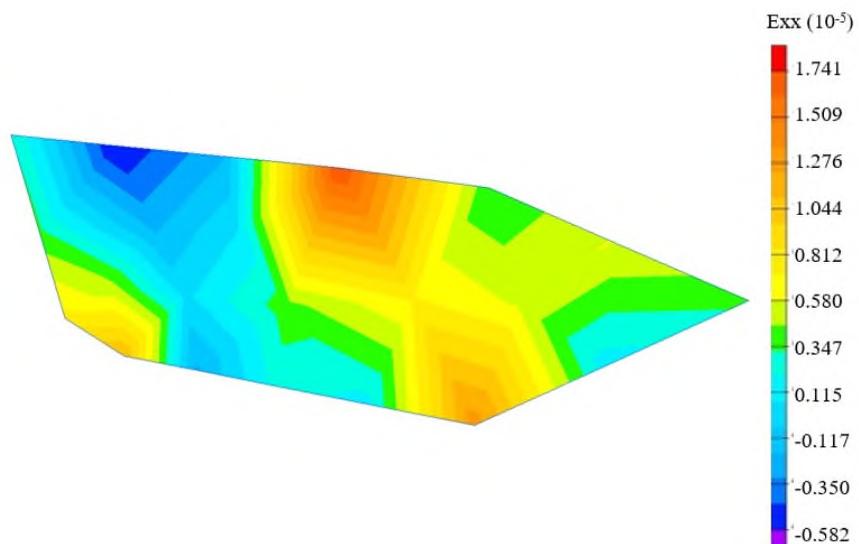


Рис. 7. Деформация по оси  $X$  в ELCUT

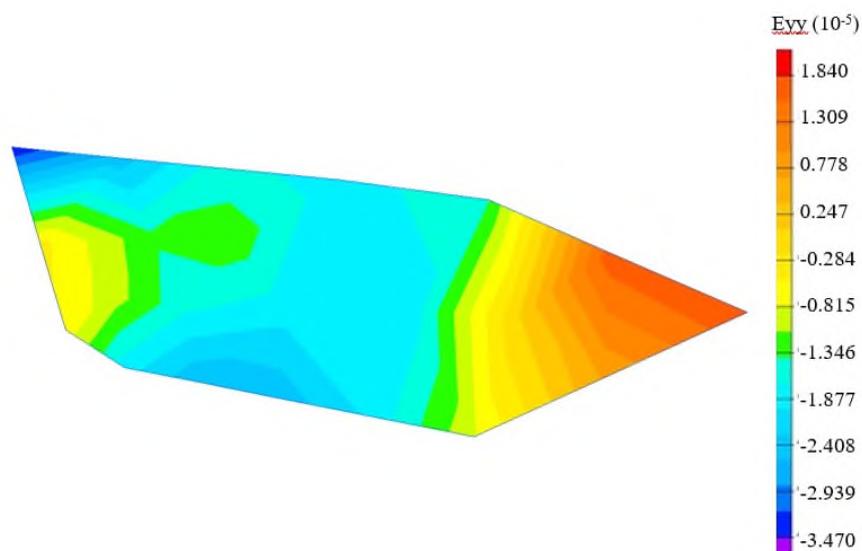


Рис. 8. Деформация по оси  $Y$  в ELCUT

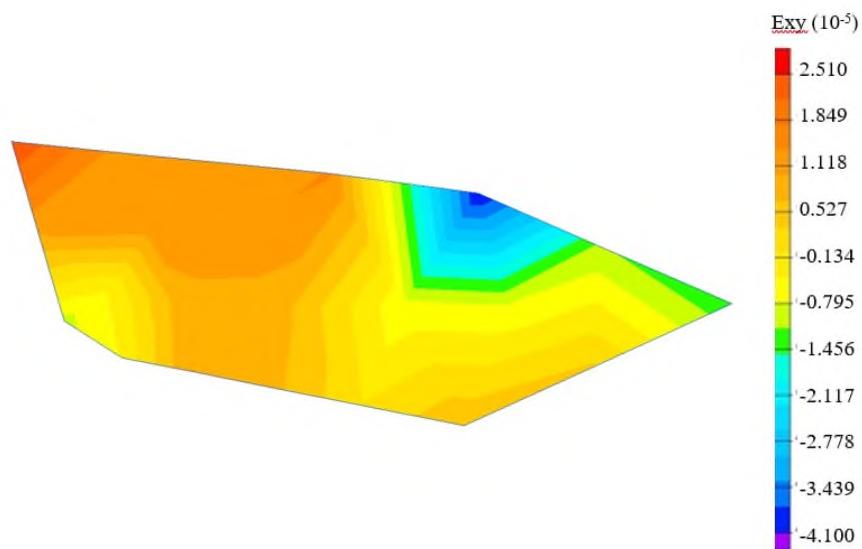


Рис. 9. Сдвиговая деформация в ELCUT

### Заключение

Проанализировав полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

– разработанная программа успешно прошла тестирование и удовлетворяет всем основным требованиям технического задания;

– для проверки корректности работы программы выполнено сравнение результатов расчета деформаций тестового объекта в разработанном программном обеспечении и программном комплексе ELCUT. Результаты продемонстрировали значительное сходство полей деформаций, построенных в двух программах, совпадают как значения исследуемых величин, так и характер их распределения;

– из основных отличий результатов отмечены следующие: в программном комплексе ELCUT сетка конечных элементов включает в себя меньшее количество элементов, чем в разработанной программе. За счет того, что в разработанной программе создается большее количество элементов, карта деформаций получается подробнее, чем в программе ELCUT; в отличие от демонстрационной версии ELCUT разработанная программа не имеет ограничений по числу обрабатываемых пунктов.

Разработанное программное обеспечение можно применять для расчета деформационных характеристик земной поверхности и последующего анализа моделей деформации. Также данный программный модуль планируется внедрить в разрабатываемую систему онлайн-сервисов координатно-временного обеспечения.

Также сформулированы направления для дальнейшего совершенствования разрабатываемого программного обеспечения. Предполагается обеспечить следующие возможности:

– добавление точек, не участвующих в построении контура полигона, но участвующих в расчете деформационных характеристик земной коры;

– выбор формы и регулирование размеров конечных элементов непосредственно пользователем либо выбор расчета в автоматическом режиме;

– выбор способа ввода точек: вручную или импорт из заранее подготовленного файла;

– ручной ввод физических свойств грунтов или выбор типа грунтов из библиотеки, а также возможность их задания по умолчанию;

– расширение перечня деформационных характеристик, рассчитываемых программой.

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

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дорогова И. Е., Духовников К. С. Программное обеспечение, сервисы и открытый код для решения задач геодинамики // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVIII Междунар. науч. конгр., 18–20 мая 2022 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2022. – С. 138–145. – DOI 10.33764/2618-981X-2022-1-138-145.

2. Язык программирования Python: официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.python.org/> (дата обращения 25.08.2022).

3. PyCalculix: описание проекта [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pypi.org/project/pycalculix/> (дата обращения 25.08.2022).

4. Мазуров Б. Т., Дорогова И. Е. Геодинамика и геодезические методы ее изучения : учеб. пособие. – Новосибирск : СГГА, 2014. – 175 с.

5. Амензаде Ю. А. Теория упругости. Учебник для университетов. – Изд. 3-е, доп. – М. : Высшая школа, 1976. – 272 с.

6. Дорогова И. Е., Дербенев К. В. Глобальные вихревые движения блоков земной поверхности // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 1. – С. 244–247.

7. Мазуров Б. Т., Дорогова И. Е., Дербенев К. В. Горизонтальные движения земной коры вращательного характера, наблюдаемые на геодинамических полигонах // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVIII Междунар. науч. конгр., 18–20 мая 2022 г., Новосибирск : сб. материалов в 8 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2022. – С. 239–243.
8. Дорогова И. Е. Изучение горизонтальных движений земной коры вращательного характера по данным геодезических наблюдений // Геодезия и картография. – 2013. – № 4. – С. 37–40.
9. Liu L., Yujiang L., Lingyun J., Liangyu Z. Finite element simulation of stress change for the Ms7.4 Maduo earthquake and implications for regional seismic hazard // Earthquake Research Advances. – 2021. – Vol. 2, Issue 2. – P. 100046.
10. Руководство по PyCalculix [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://justinablack.com/pycalculix/> (дата обращения 25.08.2022).
11. PyCalculix: исходный код [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/spacether/pycalculix/> (дата обращения 25.08.2022).
12. Редактор кода Microsoft Visual Studio Code [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://visualstudio.microsoft.com/> (дата обращения 12.09.2022).
13. PyQt5: описание проекта [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pypi.org/project/PyQt5/> (дата обращения 15.08.2022).
14. ELCUT Студенческий версия 6.5 ООО «Тор» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://elcut.ru/free\\_soft\\_r.htm](https://elcut.ru/free_soft_r.htm) (дата обращения 12.09.2022).
15. Дорогова И. Е. Интерпретация наблюдений за движениями земной коры на техногенном полигоне // ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск : СГГА, 2011. Т. 1. – С. 203–207.
16. Халимончик Д. А., Силаева А. А., Панжин А. А. Исследование современных движений земной коры Кольского полуострова и Карелии по данным спутниковых наблюдений // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVIII Междунар. науч. конгр., 18–20 мая 2022 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2022. – С. 38–44. – DOI 10.33764/2618-981X-2022-1-38-44.
17. Панжин А. А., Мазуров Б. Т., Панжина Н. А. Геодинамический мониторинг и моделирование поля деформаций на Коркинском угольном месторождении // Изв. Тульского государственного ун-та. Науки о Земле. – 2021. – № 2. – С. 94–109.
18. Дорогова И. Е. Исследование смещений и деформаций бортов карьера по результатам повторных геодезических измерений // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 2. – С. 31–36.

### Об авторах

*Инна Евгеньевна Дорогова* – кандидат технических наук, доцент кафедры космической и физической геодезии.

*Константин Станиславович Духовников* – магистрант.

Получено 06.10.2022

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

## Development of a geodynamic software module for assessing deformations of the earth's crust based on the geodetic measurements results

*I. E. Dorogova<sup>1</sup>\*, K. S. Dukhovnikov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

\* e-mail: [inna\\_dorogova@mail.ru](mailto:inna_dorogova@mail.ru)

**Abstract.** The article provides an overview of the capabilities of the free Python library Pycalculix containing a number of procedures for calculating deformations by the finite element method. The methods of creating a grid, shapes and order of elements for which the calculation of deformations can be performed are considered. The process of creating the software Defor(M)aster, the basic requirements for the interface, functionality and

presentation of the results are described. The developed software for calculating the parameters of deformation of the Earth's crust based on the results of geodetic measurements has been tested. The reliability of the deformation parameters calculation for the control object was evaluated by comparing the results obtained in the developed software with the results obtained in the ELCUT software package. The analysis of the results indicates a similar distribution and good consistency of the two sets of deformation parameters. The directions of the improvement and software functionality expansion list of are formulated.

**Keywords:** geodynamics, GNSS measurements, crustal deformations, software, Python, finite element method, satellite measurements

## REFERENCES

1. Dorogova, I. E., & Dukhovnikov, K. S. (2022). Software, services and open source for solving geodynamic problems. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2022: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2022: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 138–145). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
2. Python programming language: official website. (n. d.). Retrieved from <https://www.python.org/> (accessed August 25, 2022).
3. PyCalculix: project description. (n. d.). Retrieved from <https://pypi.org/project/pycalculix/> (accessed August 25, 2022).
4. Mazurov, B. T., & Dorogova, I. E. (2014). *Geodinamika i geodezicheskie metody ee izucheniya [Geodynamics and geodetic methods of its study]*. Novosibirsk: SSGA Publ., 175 p. [in Russian].
5. Amenzade, Yu. A. (1976). *Teoriya uprugosti [Theory of elasticity]* (3rd ed.). Moscow: «Vysshaya shkola» Publ., 272 p. [in Russian].
6. Dorogova, I. E., & Derbenev, K. V. (2012). Global vortex movements of blocks of the Earth's surface. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2012: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2012: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 244–247). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
7. Mazurov, B. T., Dorogova, I. E., & Derbenev, K. V. (2012). Horizontal movements of the earth's crust of a rotational nature observed at geodynamic polygons. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2012: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2012: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 239–243). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
8. Dorogova, I. E. (2013). Study of horizontal movements of the earth's crust of a rotational character according to geodetic observations. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 4, 37–40 [in Russian].
9. Liu, L., Yujiang, L., Lingyun, J., & Liangyu, Z. (2021). Finite element simulation of stress change for the Ms7.4 Maduo earthquake and implications for regional seismic hazard. *Earthquake Research Advances*, 2(2), P. 100046.
10. Guide to PyCalculix. (n. d.). Retrieved from <http://justinablack.com/pycalculix/> (accessed August 25, 2022).
11. PyCalculix: source code. (n. d.). Retrieved from <https://github.com/spacether/pycalculix/> (accessed August 25, 2022).
12. Microsoft Visual Studio Code Editor. (n. d.). Retrieved from <https://visualstudio.microsoft.com/> (accessed September 12, 2022).
13. PyQt5: project description. (n. d.). Retrieved from <https://pypi.org/project/PyQt5/> (accessed August 15, 2022).
14. ELCUT Student version 6.5 LLC "Tor". (n. d.). Retrieved from [https://elcut.ru/free\\_soft\\_r.htm](https://elcut.ru/free_soft_r.htm) (accessed September 12, 2022).
15. Dorogova, I. E. (2011). Interpretation of observations of the movements of the Earth's crust at the techno-genetic polygon. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2011: T. 1 [Proceedings of GEO-Siberia-2011: Vol. 1]* (pp. 203–207). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
16. Halimonchik, D. A., Silaeva, A. A., & Panzhin, A. A. (2022). Investigation of modern movements of the Earth's crust of the Kola Peninsula and Karelia according to satellite observations. In *Sbornik materialov*

*Interexpo GEO-Sibir'-2022: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2022: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 38–44). Novosibirsk: SSUGT Publ. doi 10.33764/2618-981X-2022-1-38-44. [in Russian].

17. Panzhin, A. A., Mazurov, B. T., Panzhina, N. A. (2021). Geodynamic monitoring and modeling of the deformation field at the Korkinsky coal deposit. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle [Izvestiya Tula State University. Earth Sciences]*, 2, 94–109 [in Russian].

18. Dorogova, I. E. (2016). Investigation of displacements and deformations of quarry sides based on the results of repeated geodetic measurements. In *Sbornik materialov Interexpo GEO-Sibir'-2016: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2016: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 31–36). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].

#### Author details

*Inna E. Dorogova* – Ph. D., Associate Professor, Department of Space and Physical Geodesy.  
*Konstantin S. Dukhovnikov* – Graduate.

Received 06.10.2022

© *I. E. Dorogova, K. S. Dukhovnikov, 2022*