

УДК 519.63, 550.37, 004.94

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ
В СРЕДЕ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ**

**DEVELOPMENT OF SOFTWARE TOOL FOR ELECTRIC FIELD
MODELING IN A MEDIUM WITH ARBITRARY INCLUSION**

Захарова Г. Р., Иванов А. Н., Викторов С. В., Мустафина С. А.

**Башкирский государственный университет, филиал,
г. Стерлитамак, Российская Федерация**

G. R. Zakharova, A. N. Ivanov, S. V. Viktorov, S. A. Mustafina

Bashkir State University, branch, Sterlitamak, Russian Federation

e-mail: g1u9l9a5@yandex.ru

Аннотация. В статье описан процесс разработки приложения для моделирования электрического поля в среде с включением произвольной формы. В работе приводятся математические выкладки численного решения прямой задачи о поле точечного источника в однородной среде с включением. Так как решение прямой задачи является частью расчета обратной задачи, приведенная модель может применяться и для уточнения расположения включения, его формы.

На основе полученной математической модели на языке Delphi в среде программирования Embarcadero RAD Studio 10.2 реализовано программное средство, с помощью которого, применяя метод интегральных представлений, можно найти решение прямой задачи об электрическом поле с произвольным включением. Форма и габариты включения задаются 3D моделью, созданной в любом из популярных средств объемного

моделирования. Приложение позволяет манипулировать загруженной моделью включения, выполняя операции поворота, масштабирования и смещения по всем координатам. Форма включения визуализируется в окне приложения в виде многогранника или роя вершин. По результатам численного расчета пользователь получает график линейного профиля приемника и 3D график профиля приемника по поверхности. Программный интерфейс позволяет изменять положения приемника и источника в исследуемой среде, задавать характеристики среды и включения. Полученные графики могут быть экспортированы в различные форматы для дальнейшего анализа.

Таким образом, разработанное программное средство может применяться в процессе геологоразведки для определения размера и формы включений, выявления неоднородностей среды, деформаций и повреждений трубопроводов, а также локализации аварийных участков.

Abstract. The article describes the process of developing an application for electric field modeling in medium with an arbitrary inclusion. The paper presents mathematical calculations of numerical solution of the direct problem of a point source field in a homogenous medium with inclusion. Since the solution of the direct problem is a part of the calculation of the inverse problem, this model can also be used to clarify the location of the inclusion, its shape.

On the basis of the obtained mathematical model in the Delphi language in Embarcadero RAD Studio 10.2 programming environment, a software tool is implemented that can be used to solve the direct problem of an electric field with an arbitrary inclusion using the integral representation method. A 3D model created in any of the popular 3D modeling tools sets the shape and dimensions of the inclusion. The app allows to manipulate the loaded inclusion model, performing the operations of rotation, scaling and displacement for all coordinates. The inclusion form is visualized in the application window as a polyhedron or a swarm of vertices. Based on the results of numerical

calculation, a user obtains a graph of the receiver's linear profile and a 3D profile of the receiver over the surface. The program interface allows to change the positions of the receiver and source in the medium, set the characteristics of the medium and the inclusion. The resulting graphs can be exported to various formats for further analysis. Thus, the developed software can be used in geological prospecting to determine the size and shape of inclusions, detection of inhomogeneities of the medium, deformations and damage to pipelines, as well as the location of emergency areas.

Ключевые слова: прямая задача электроразведки, метод интегральных представлений, 3D модели, STL модели, функция Грина, краевая задача.

Key words: direct problem of electroinvestigation, method of integrated representations, 3D models, STL models, Green's function, boundary value problem.

Геоэлектрические методы основаны на вычислении значений потенциала электрического поля в исследуемой среде. Для этого используют систему «источник тока – приёмник», состоящую из электродов, удаленных на некоторое расстояние. На основе данных, полученных с приемника, формируется картина распределения электрического потенциала. На основе априорных знаний об электропроводности среды можно рассчитать теоретическое значение потенциала в каждой точке пространства.

Интерес представляют задачи, в которых исследуемая область содержит включения, отличающиеся по своим свойствам от окружающей среды. Такими включениями, в частности, могут быть скважины, трубопроводы, залежи минералов, полости, нефтеносные пласты и пр. Электрическое поле, проходя через границу раздела сред, претерпевает изменения, которые фиксируются приборами как отклонение от

нормального распределение потенциала. Такое отклонение принято называть «аномальным» потенциалом включения. Характер этого изменения можно описать как суммирующее влияние вторичных источников, расположенных на поверхности включения [1].

Пусть в однородном изотропном полупространстве Ω_0 с удельной электрической проводимостью σ_0 содержится локальное включение Ω_1 произвольной формы с удельной электрической проводимостью σ_1 . Требуется вычислить в точке приемника $P(x, y, z) \in \Omega_0$ значение потенциала поля, инициированного точечным источником $A(x_A, y_A, z_A) \in \Omega_0$.

Математическая модель, описывающая потенциальное поле точечного источника постоянного тока интенсивности I , представляется в виде следующей краевой задачи эллиптического типа [2]:

$$\Delta u_0(P) = -\frac{I}{\sigma_0} \delta(P - A), \text{ при } P \in \Omega_0; \quad (1)$$

$$\Delta u_1(P) = 0, \text{ при } P \notin \Omega_0; \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial u_0}{\partial z} \right|_{z=0} = 0; \quad (3)$$

$$u_0(P)|_S = u_1(P)|_S; \quad (4)$$

$$\sigma_0 \left. \frac{\partial u_0}{\partial z} \right|_S = \sigma_1 \left. \frac{\partial u_1}{\partial z} \right|_S; \quad (5)$$

$$u_i(P) \rightarrow 0 \text{ при } P \rightarrow \infty, \quad i = \overline{0,1}, \quad (6)$$

где Δ – оператор Лапласа; δ – функция Дирака; условие (3) определяет изолированность дневной поверхности, (4) и (5) – соответственно условия непрерывности потенциала и плотности тока, (6) – условие регулярности решения на бесконечности.

Построим математическую модель подзадачи для функции точечного источника – функции Грина G , в котором однородное полупространство выбрано в качестве вмещающей включение среды.

$$\Delta G_Q(Q, P) = -\delta(P - Q); \quad (7)$$

$$\left. \frac{\partial G_0}{\partial z} \right|_{z=0} = 0; \quad (8)$$

$$G(P) \rightarrow 0 \text{ при } P \rightarrow \infty. \quad (9)$$

Задача (1) – (6) решается с помощью метода интегральных представлений, который формируется на основе интегральных преобразований с построением функции Грина для вмещающего пространства.

В соответствии с применяемым методом выпишем интегральное представление решения прямой задачи и интегральное уравнение относительно неизвестных граничных значений потенциала на границе включения произвольной формы. Для этого рассмотрим следующую формулу:

$$\int_{\Omega} [\Delta u(Q) \cdot G(P, Q) - \Delta G(P, Q) \cdot u(Q)] d\Omega_Q = \int_{\partial\Omega} \left[\frac{\partial u(Q)}{\partial n} \cdot G(P, Q) - \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n} \cdot u(Q) \right] d\{\partial\Omega_Q\}.$$

Применим формулу Грина для обеих областей исходной задачи. Для области Ω_0 формула Грина примет вид:

$$\int_{\Omega_0} [\Delta u_0(Q) \cdot G(P, Q) - \Delta G(P, Q) \cdot u_0(Q)] d\Omega_0 = \int_{\partial\Omega} \left[\frac{\partial u_0(Q)}{\partial n} \cdot G(P, Q) - \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n} \cdot u_0(Q) \right] d\{\partial\Omega_0\}.$$

Далее

$$\int_{\Omega_0} \left[-\frac{I}{\sigma_0} \delta(P - A) \cdot G(P, Q) - \delta(P - Q) \cdot u_0(Q) \right] d\Omega_0 = \int_{z=0} \left[\frac{\partial u_0(Q)}{\partial n} \cdot G(P, Q) - \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n} \cdot u_0(Q) \right] d\{z=0\} + \int_S \left[\frac{\partial u_0(Q)}{\partial n} \cdot G(P, Q) - \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n} \cdot u_0(Q) \right] d\{S\}.$$

Введем в рассмотрение вспомогательные коэффициенты [3]:

$$\int_{\Omega_0} \delta(P-Q) \cdot f(P,Q) = \begin{cases} f(P), P \in \Omega_i \\ f(P)/2, P \in \partial\Omega_i \\ 0, P \notin \{\Omega_i, \partial\Omega_i\} \end{cases}, \quad \nu_i = \begin{cases} 1, P \in \Omega_i \\ 1/2, P \in \partial\Omega_i \\ 0, P \notin \{\Omega_i, \partial\Omega_i\} \end{cases}.$$

Используя введенные вспомогательные коэффициенты, в результате получаем следующую формулу для области Ω_0 :

$$-\frac{I}{\sigma_0} G(P,A) + \nu_0 u_0(P) = \int_S \left[\frac{\partial u_0(Q)}{\partial n} \cdot G(P,Q) - \frac{\partial G(P,Q)}{\partial n} \cdot u_0(Q) \right] d\{S\}.$$

Аналогично применяем формулу Грина и вспомогательные коэффициенты для области Ω_1 :

$$\int_{\Omega_1} [\Delta u_1(Q) \cdot G(P,Q) - \Delta G(P,Q) \cdot u_1(Q)] d\Omega_1 = \int_{\partial\Omega_1} \left[\frac{\partial u_1(Q)}{\partial n} \cdot G(P,Q) - \frac{\partial G(P,Q)}{\partial n} \cdot u_1(Q) \right] d\{\partial\Omega_1\}.$$

Далее

$$\int_{\Omega_1} [\Delta u_1(Q) \cdot G(P,Q) - \Delta G(P,Q) \cdot u_1(Q)] d\Omega_1 = \int_S \left[\frac{\partial u_1(Q)}{\partial n} \cdot G(P,Q) - \frac{\partial G(P,Q)}{\partial n} \cdot u_1(Q) \right] d\{S\},$$

$$\nu_1 u_1(P) = \int_S \left[\frac{\partial u_1(Q)}{\partial n} \cdot G(P,Q) - \frac{\partial G(P,Q)}{\partial n} \cdot u_1(Q) \right] d\{S\}.$$

Умножив полученные равенства для областей Ω_0 и Ω_1 соответственно на σ_0 и σ_1 , и сложив их, получим следующую формулу:

$$-I \cdot G(P,A) + \sigma_0 \cdot \nu_0 \cdot u_0(P) + \sigma_1 \cdot \nu_1 \cdot u_1(P) = \int_S \left[\sigma_0 \cdot \frac{\partial u_0(Q)}{\partial n} \cdot G(P,Q) - \sigma_0 \cdot \frac{\partial G(P,Q)}{\partial n} \cdot u_0(Q) + \sigma_1 \cdot \frac{\partial u_1(Q)}{\partial n} \cdot G(P,Q) - \sigma_1 \cdot \frac{\partial G(P,Q)}{\partial n} \cdot u_1(Q) \right] d\{S\}.$$

Упростив последнее равенство, получим формулу интегрального представления в обобщенном виде:

$$\sigma_0 \cdot \nu_0 \cdot u_0(P) + \sigma_1 \cdot \nu_1 \cdot u_1(P) = (\sigma_0 - \sigma_1) \int_S \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n} \cdot u(P) d\{S\} + I \cdot G(P, A).$$

Предполагая, что источник находится в однородной среде ($P \in \Omega_0$), тогда вспомогательные коэффициенты примут вид $\nu_0 = 1$, $\nu_1 = 0$, мы получим:

$$u(P) = \frac{(\sigma_0 - \sigma_1)}{\sigma_0} \int_S \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n} \cdot u(P) d\{S\} + \frac{I}{\sigma_0} \cdot G(P, A). \quad (10)$$

Формула (10) – это формула интегрального представления решения.

Чтобы найти значение потенциала на границе S , предположим, что приемник находится на поверхности включения ($P \in S$). Тогда вспомогательные коэффициенты имеют значения $\nu_0 = 1/2$, $\nu_1 = 1/2$ и формула примет вид:

$$u(P) = 2 \cdot \frac{(\sigma_0 - \sigma_1)}{(\sigma_0 + \sigma_1)} \int_S \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n} \cdot u(P) d\{S\} + 2 \cdot \frac{I}{(\sigma_0 + \sigma_1)} \cdot G(P, A). \quad (11)$$

Формула (11) – интегральное уравнение Фредгольма 2-го рода относительно неизвестных граничных значений потенциала $u(Q)$.

Таким образом, решение задач определяется формулой (10), которая представляет собой определенный интеграл в случае известных значений $u(P)$ на границе S . Они находятся из формулы (11), представляя собой интегральное уравнение Фредгольма 2-го рода.

Рассмотрим программную (практическую) реализацию формулы (11) для решения прямой задачи в поле точечных источников постоянного электрического тока в кусочно-однородной среде при наличии в ней локального включения.

Приведем алгоритм практической реализации метода интегральных представлений [3].

Шаг 1. Построение функции Грина $G(P, A)$ и ее производной $\frac{\partial G(P, Q)}{\partial n_Q}$ по вектору нормали n в каждой точке Q .

Для случая однородного полупространства функция Грина $G(P, Q)$ имеет вид:

$$G(P, A) = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \sqrt{(x_P - x_A)^2 + (y_P - y_A)^2 + (z_P - z_A)^2}} + \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \sqrt{(x_P - x_A)^2 + (y_P - y_A)^2 + (z_P - z_{A^*})^2}} .$$

Шаг 2. Построение и решение интегрального уравнения Фредгольма 2-го рода.

Для численной реализации решения интегрального уравнения воспользуемся квадратурным методом [4].

Введем обозначения:

$$\lambda = 2 \cdot \frac{(\sigma_0 - \sigma_1)}{(\sigma_0 + \sigma_1)} ; F(P) = 2 \cdot \frac{I}{(\sigma_0 + \sigma_1)} \cdot G(P, A) ; K(P, Q) = \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n} .$$

Тогда формула интегральных уравнений (11) примет вид:

$$u(P) = \lambda \cdot \int_S K(P, Q) \cdot u(Q) d\{S\} + F(P) . \quad (12)$$

Представим формулу (12) в дискретном виде. Для этого построим разбиение поверхности включения S в виде массива из N 3-мерных точек. Для перебора размещаемых на поверхности точек P и Q сопоставим в точке приемника P индекс i ($P \rightarrow i$), а в точке вторичного источника Q индекс j ($Q \rightarrow j$). Тогда формула (12) примет вид:

$$u(P_i) - \lambda \cdot \sum_{j=0}^N \left[\int_{\Delta_j} K(P_i, Q_j) d\{\Delta_j\} \cdot u(Q_j) \right] = F(P_i), \quad i = \overline{0, N} .$$

Упрощая полученное выражение, выразим $K(P, Q)$, то есть

$$\overline{K_{i,j}} = \int_{\Delta_j} K_{i,j} d\{\Delta\}, \quad i = \overline{0, N},$$

где Δ – элементарная площадка разбиения.

Тогда формула (11) примет вид системы линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных значений потенциала u на границе S :

$$u_i - \lambda \cdot \sum_{j=0}^N \overline{K_{i,j}} \cdot u_j = F_i, \quad i = \overline{0, N}. \quad (13)$$

Уравнение представляет собой СЛАУ относительно неизвестных значений потенциала на границе разрыва кусочно-постоянной функции $\sigma(x, y, z)$ и в расширенном виде представляется следующим образом:

$$\begin{pmatrix} 1 - \lambda \cdot \overline{K_{0,0}} & -\lambda \cdot \overline{K_{0,1}} & \cdots & -\lambda \cdot \overline{K_{0,N}} \\ -\lambda \cdot \overline{K_{1,0}} & 1 - \lambda \cdot \overline{K_{1,1}} & \cdots & -\lambda \cdot \overline{K_{1,N}} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ -\lambda \cdot \overline{K_{N,0}} & -\lambda \cdot \overline{K_{N,1}} & \cdots & 1 - \lambda \cdot \overline{K_{N,N}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_0 \\ u_1 \\ \cdots \\ u_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_0 \\ F_1 \\ \cdots \\ F_N \end{pmatrix}.$$

Шаг 3. Формула интегрального представления решения (13) раскрывается квадратурным методом прямоугольников:

$$u(P) = \frac{(\sigma_0 - \sigma_1)}{\sigma_0} \sum_{i=0}^N \left(\frac{\partial G(P, Q)}{\partial n} \cdot u_i \right) \cdot \Delta + \frac{I}{\sigma_0} \cdot G(P, A).$$

Предлагаемый в работе метод является универсальным методом понижения геометрической сложности исследуемой среды. Также этот метод может быть использован для поэтапного усложнения геометрии модели.

Процесс вычисления решения программным средством выполняется по следующим последовательным этапам [6].

Этап 1. Подготовка исходных данных. На текущем этапе задаются значения электропроводности вмещающего пространства и включения, координат точечного источника и его силы тока, геометрические

преобразования над включением (смещение, масштабирование и поворот относительно исходных координат).

Геометрические характеристики включения вносятся в программный продукт путем загрузки текстового файла, содержащего поверхность включения в виде треугольных конечных элементов. Значения в файле отделены между собой символами табуляции. В файле построчно описываются следующие числовые значения:

- 1) x координата центра грани поверхности;
- 2) y координата центра грани поверхности;
- 3) z координата центра грани поверхности;
- 4) проекция вектора нормали к грани поверхности на ось Oх;
- 5) проекция вектора нормали к грани поверхности на ось Oу;
- 6) проекция вектора нормали к грани поверхности на ось Oz;
- 7) площадь грани поверхности;
- 8) x координата центра 1 вершины поверхности;
- 9) y координата центра 1 вершины поверхности;
- 10) z координата центра 1 вершины поверхности;
- 11) x координата центра 2 вершины поверхности;
- 12) y координата центра 2 вершины поверхности;
- 13) z координата центра 2 вершины поверхности;
- 14) x координата центра 3 вершины поверхности;
- 15) y координата центра 3 вершины поверхности;
- 16) z координата центра 3 вершины поверхности.

Рассчитанные значения загружаются в неизменном виде в таблицу, расположенную во вкладке «Файл» (рисунок 1).

Следует отметить, что указанные выше числовые значения содержатся в структуре формата STL, который является самым распространенным форматом хранения 3D моделей.

Таким образом, создавая собственные 3D тела или поверхности, можно производить моделирование влияния включения на прохождение

электрического поля во вмещающем пространстве с неограниченно сложными по форме включениями. Так как расчет в программе ведётся по центрам треугольных граней, исключается проблема нахождения значений производной по нормали в точках излома поверхности включения, в которых эта производная не определена.

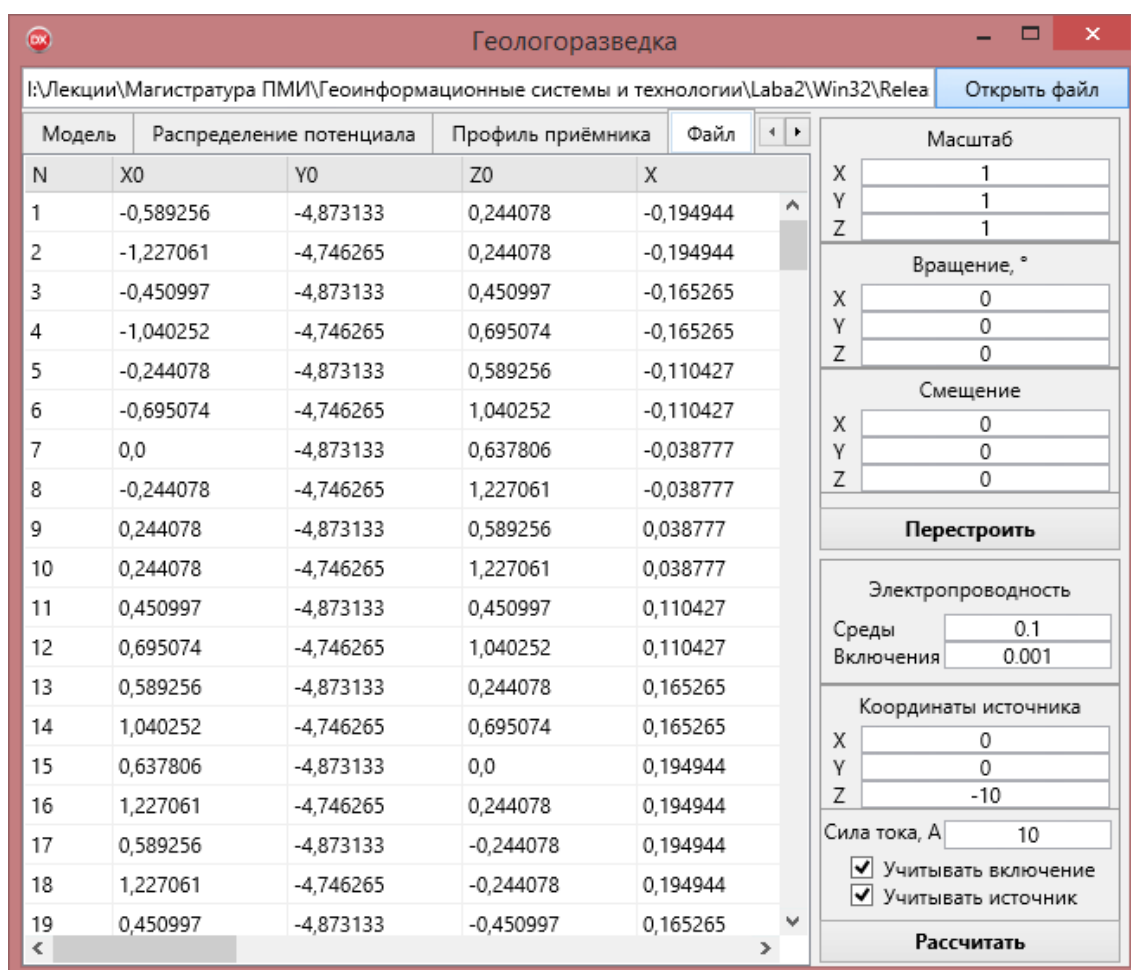


Рисунок 1. Таблица характеристик поверхности включения

При нажатии кнопки «Перестроить» (а также первоначально в момент загрузки самого файла) значения из таблицы загружаются в массив *arr* элементов типа *Col = array[1..16] of Double*, попутно подвергаясь модификации в соответствии с заданными геометрическими преобразованиями. Так, например, для масштабирования происходит поэлементное умножение на вектор коэффициентов. Масштаб при этом задаётся в долях единицы.

Для упрощения дальнейших вычислений вводится структура *Point*, характеризующая конкретную точку пространства. В соответствии с этим вводится пользовательский тип *Points = array[1..5] of Point*, а также соответствующий массив *arr_p*, дополняющий сведения массива *arr*.

Среди прочего может быть задано вращение модели включения относительно осей координат на определенные углы, задаваемые в градусах, с помощью функции *Rotation(x, y, z, vr_x, vr_y, vr_z: Double): Point*. С этой целью координаты точек представляются в виде соответствующей вектор-строки размера 1 x 3. Повороты относительно осей осуществляются путём последовательного умножения данного вектора на матрицы поворота, размеры которых 3 x 3. Умножение вектора на матрицу осуществляется функцией *MatrixRot(p: Point; mat: Matrix): Point*.

В результате построения на вкладке «Модель» на 3D графике будет отображено включение в виде множества треугольных граней или «роя» вершин. Также для наглядности показывается изолированность «дневной» поверхности, например 3d график загруженной модели сферической поверхности радиусом 10 м со смещением по оси Oz (рисунки 2 и 3).

Следует отметить, что точность расчета, как и его сложность, зависит от точности задания поверхности. Для этого при аппроксимации и сохранении 3D моделей в формате STL во всех средствах объемного моделирования задаются максимальные значения длины ребра треугольной грани, а также линейного и углового отклонений. Однако увеличение числа граней n приводит к значительному усложнению расчета, сложность которого описывается как $O(n^3)$.

Таким образом, необходимо найти компромисс между точностью результата и длительностью поиска решения.

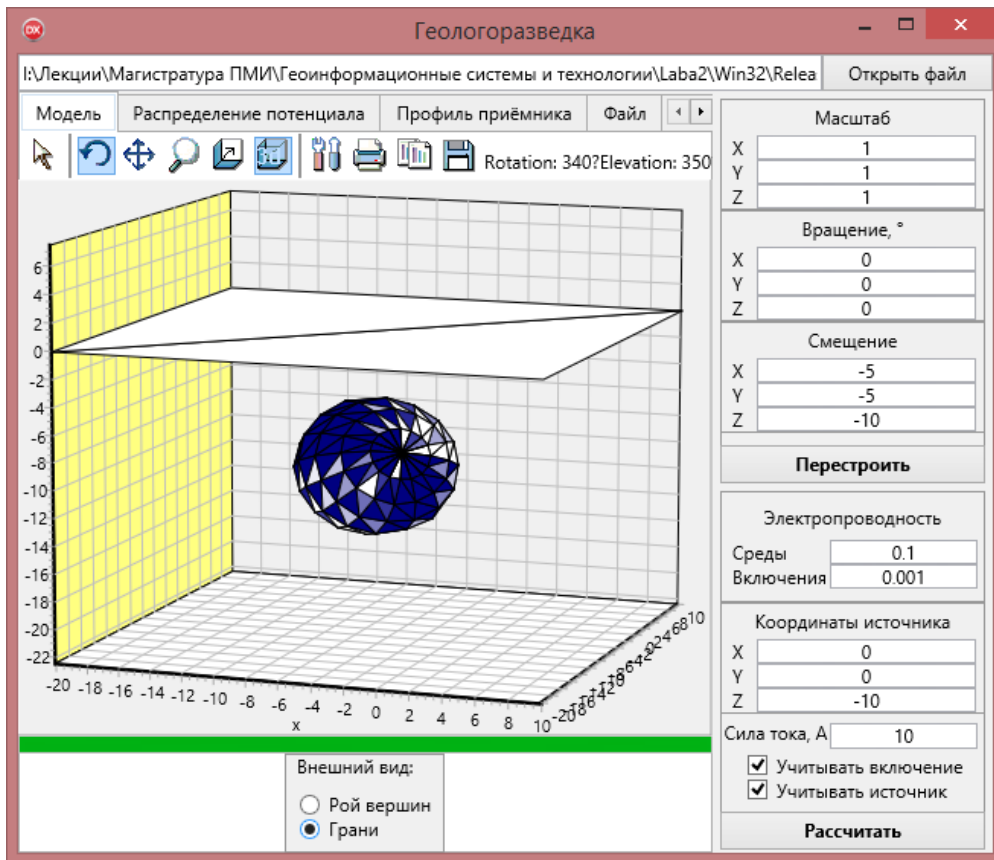


Рисунок 2. Модель сферической поверхности в режиме «границ»

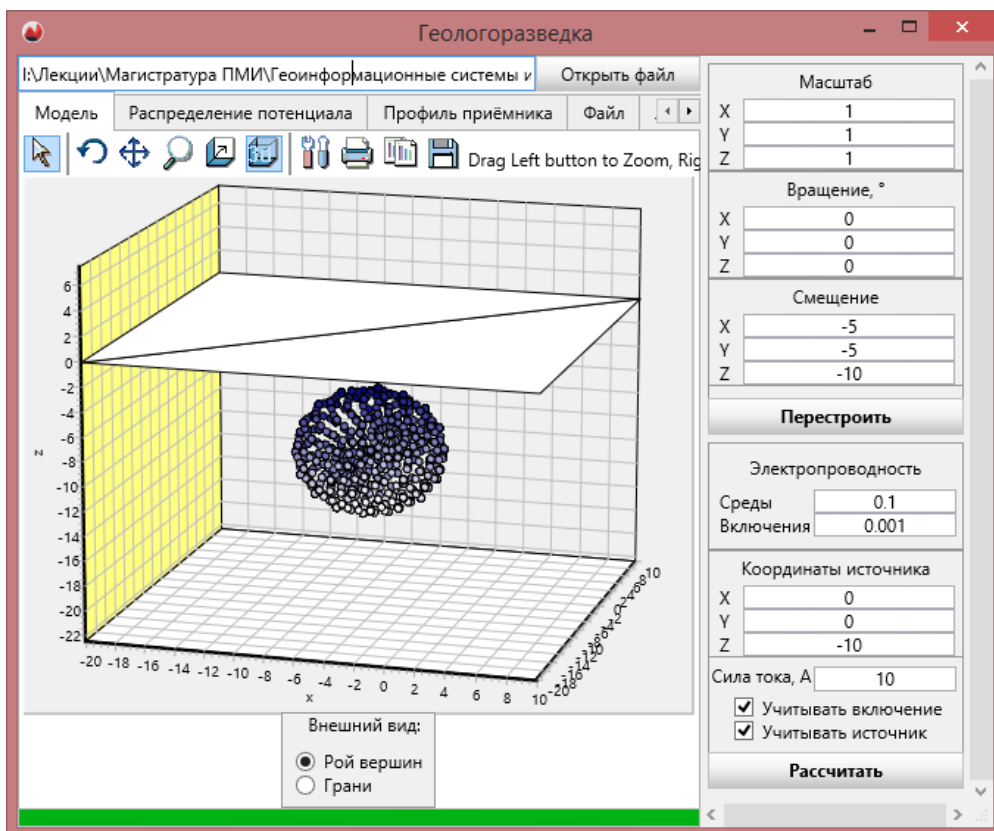


Рисунок 3. Модель сферической поверхности в режиме «рой вершин»

Этап 2. Расчет математической модели. В качестве источника рассматривается точечный объект, сила тока и координаты которого вводятся пользователем в соответствующие поля в форме. Также указываются значения электропроводности для включения и вмещающего пространства.

Расчет запускается пользователем после нажатия кнопки «Рассчитать» (рисунок 4).

Электропроводность	
Среды	0.1
Включения	0.001
Координаты источника	
X	0
Y	0
Z	-10
Сила тока, А	10
<input checked="" type="checkbox"/>	Учитывать включение
<input checked="" type="checkbox"/>	Учитывать источник
Рассчитать	

Рисунок 4. Форма ввода параметров расчёта электрического поля

Имеется возможность проведения расчета без учета включения. Данный режим позволяет оценить влияние источника на распределение электрического потенциала.

Также можно произвести расчет без учета источника. Данный режим позволяет оценить влияние включения на распределение электрического потенциала – так называемый «аномальный» потенциал.

В процессе данного расчета вычисляются значения электрического потенциала на границе включения. Данный этап является самым длительным, так как включает в себя численное решение системы линейных алгебраических уравнений, число которых равно количеству рёбер поверхности включения.

Этап 3. Настройка приемника. В программном продукте реализована возможность одновременного использования профиля приемника как по

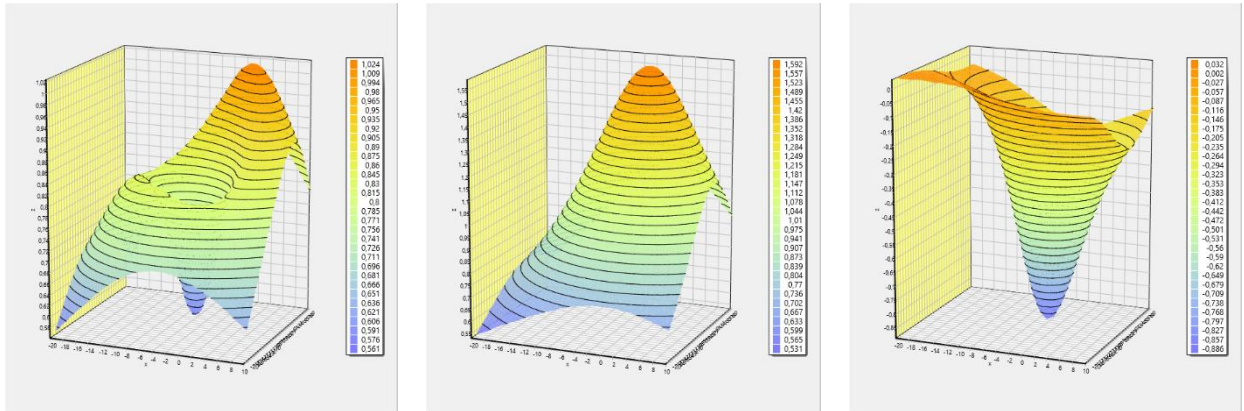
оси Oz, так и по плоскости, перпендикулярной одной из осей координат (по умолчанию – плоскости Oxy).

Расчет профилей приемника производится в момент расчета электрического потенциала на предыдущем этапе, однако каждый из профилей может быть пересчитан без пересчета характеристик источника и включения. Для этого на каждой из соответствующих вкладок расположена кнопка «Обновить».

Профиль приемника по поверхности размещен во вкладке «Распределение потенциала». Для выбранной плоскости выбираются границы анализируемой плоскости, а также положение секущей плоскости относительно перпендикулярной ей оси. Далее указываются параметры сетки, в узлах которых вычисляются значения потенциала электрического поля. Следует отметить, что увеличение количества узлов сетки по каждой из осей приводит к соответствующему увеличению длительности расчета, а уменьшение сетки – к искажению наблюдаемого профиля. Аномалии и выбросы, которые могут быть получены в результате математического расчета, программно сглаживаются, в связи с чем требуется достаточное разрешение сетки. Отсутствие на графике профильной поверхности свидетельствует о недостаточном количестве узлов сетки, которое необходимо увеличить.

Так, для сферического включения из вышеприведенного примера профиль по поверхности принимает следующие формы в зависимости от различных режимов расчета (рисунок 5).

Профиль приемника по отрезку размещен во вкладке «Профиль приемника». В связи с тем что линейный приемник размещается строго по направлению Oz, для него указываются x и y координаты, а также значения начала и конца приемника по оси z . Точность отображения графика задается количеством датчиков на данном отрезке (по умолчанию 100). На рисунке 6 показан профиль линейного приемника для цилиндрического включения, имеющего изгиб 90° .



а)

б)

в)

а) в нормальном режиме; б) без учета включения;
 в) без учета источника

Рисунок 5. Профили по поверхности Оху для сферического включения

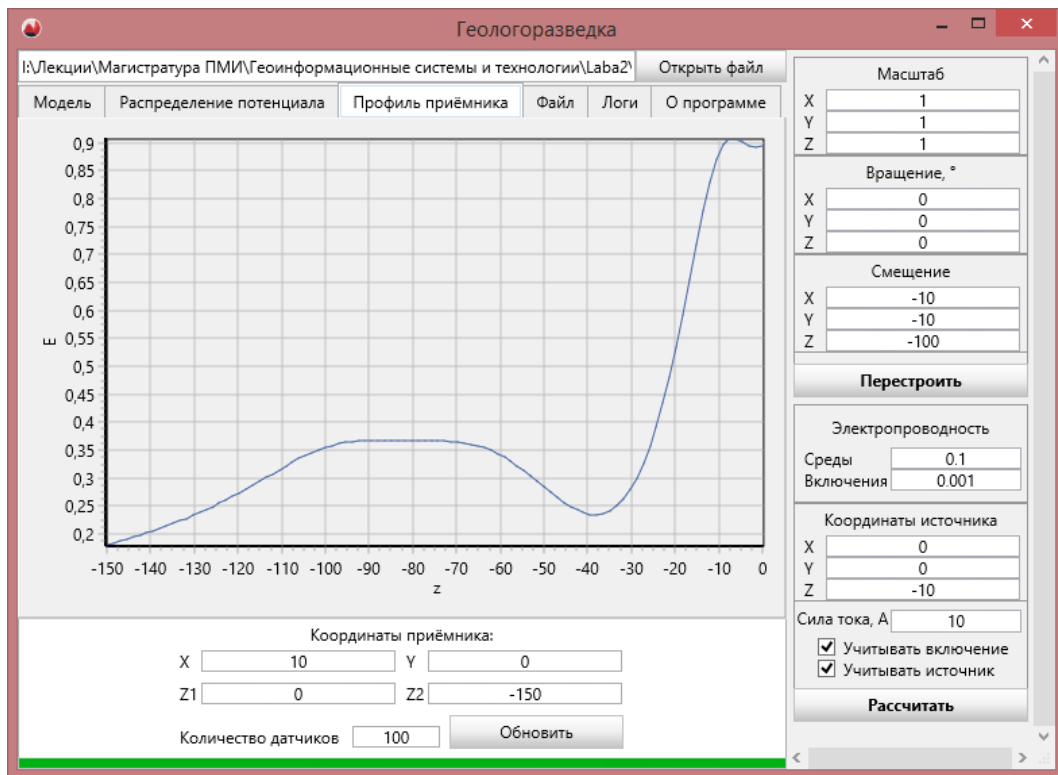


Рисунок 6. Профиль линейного приемника

Все вышеприведенные параметры отображения профилей приемника принимают начальные значения в соответствии с размером области, в которой расположено включение с учетом 50 %-го допуска.

Для работы с графиком профиля линейного приёмника можно пользоваться перемещением графика (при нажатой левой клавише), а также масштабированием. Для увеличения некоторой области на графике, её нужно выделить мышью, удерживая левую клавишу, при этом область выделяется таким образом, чтобы мышь двигалась в направлении слева-направо. При выделении любой области в противоположном направлении график возвращается к исходному размеру.

Помимо указанных возможностей для 3D графиков доступны дополнительные инструменты (рисунок 7).



Рисунок 7. Инструменты 3D-графиков

Функции каждого из инструментов:

- 1) Увеличение выделенной области;
- 2) Поворот фигуры;
- 3) Перемещение графика;
- 4) Масштабирование;
- 5) Регулировка толщины (масштаба по оси Oy);
- 6) Включение/выключение 3D режима (для графика включения отображает его вид спереди, а для распределения потенциала переводит в режим линий уровня);
- 7) Тонкая настройка графика – включает в себя выбор режимов отображения, настройку стилей, позволяет встраивать дополнительные инструменты управления графиком (метки, прокрутки, разрывы и пр.), экспорт данных в различные форматы (текстовый, XML, HTML, MS Excel, JSON);
- 8) Печать – вызывает окно печати графика и её настроек;
- 9) Копирование изображения в буфер обмена;

10) Сохранение графика как файла. Позволяет сохранить в такие форматы, как bmp, jpg, png, gif, tif, ico, hdp, pdf, svg, xaml, html и пр.

Следует отметить, что, используя в качестве исходных данных многокомпонентные 3D модели, приложение будет производить расчет электрического поля для нескольких однородных включений. Однако стоит иметь ввиду, что это замечание справедливо лишь в том случае, если электропроводность всех включений одинакова.

Для работы программного продукта необходим компьютер с операционной системой Windows 7 и выше (32- или 64-bit), оперативная память не менее 512 Мб и свободное место на жестком диске не менее 50 Мб. С целью быстродействия программы рекомендуемая частота процессора должна составлять не менее 1000 МГц, а размер видеопамати не менее 24 Мб.

Выводы

Данный программный продукт позволяет производить расчет, находя на основе геоэлектрического метода решение прямой задачи о поле точечного источника в кусочно-однородной среде с включением произвольной формы, позволяет производить проверку и нахождение ошибок при решении обратной задачи, которая применяется для поиска различных включений, вычисления их координат, размеров и форм, а также наблюдений за динамикой их изменения. Также данное программное средство позволяет моделировать процессы деформации и разрушений трубопроводов, проводить локализацию аварийного участка.

Программное обеспечение на основе геоэлектрических методов, позволяет решать прямую задачу о поле точечного источника в кусочно-однородной среде с произвольным включением, а также проводить вычислительные эксперименты по определению влияния местоположения источника тока, глубины залегания включения, коэффициента удельной электрической проводимости среды или включения.

Список используемых источников

1 Кризский В.Н., Викторов С.В., Беляева М.Б. Математическое моделирование геоэлектрических полей в кусочно-однородных квазитрехмерных средах. Стерлитамак: Стерлитамакский филиал БашГУ, 2015. 110 с.

2 Беляева М.Б. Математическое моделирование электрических полей в цилиндрических кусочно-однородных средах со сплайн-аппроксимацией границ: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Стерлитамак, 2006. 102 с.

3 Кризский В.Н. Математическое моделирование потенциальных геоэлектрических полей: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Стерлитамак, 2004. 360 с.

4 Викторов С.В. Математическое моделирование геоэлектрических полей в осесимметричных кусочно-однородных средах: дис ... канд. физ.-мат. наук. Стерлитамак, 2005. 106 с.

5 Вержбицкий В.М. Основы численных методов. М.: Высшая школа, 2002. 840 с.

6 Шамсутдинова Г.Р., Викторов С.В. Программное средство для моделирования геоэлектрических полей при решении прямых и обратных задач электроразведки // Телекоммуникационное оборудование российского происхождения: проблемы и перспективы: сб. тез. докл. Открытой регион. науч.-практ. конф. 2017. С. 54-57.

References

1 Krizskii V.N., Viktorov S.V., Belyaeva M.B. *Matematicheskoe modelirovanie geoelektricheskikh polei v kusochno-odnorodnykh kvazitrekhnernykh sredakh* [Mathematical Modeling of Geoelectrical Fields in Piecewise Homogeneous Quasi-Three-Dimensional Media]. Sterlitamak, Sterlitamakskii filial BashGU, 2015. 110 p. [in Russian].

2 Belyaeva M.B. *Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh polei v tsilindricheskikh kusochno-odnorodnykh sredakh so spline-approksimatsiei granits: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk* [Mathematical Modeling of Electric Fields in Cylindrical Piecewise Homogeneous Media with Spline Approximation of Boundaries. Cand. Techn. Sci. Diss.]. Sterlitamak, 2006. 102 p. [in Russian].

3 Krizskii V.N. *Matematicheskoe modelirovanie potentsial'nykh geoelektricheskikh polei: dis. ... d-ra fiz.-mat. nauk* [Mathematical Modeling of Potential Geoelectric Fields. Dr. Phys. and Mathematics Sci. Diss.]. Sterlitamak, 2004. 360 p. [in Russian].

4 Viktorov S.V. *Matematicheskoe modelirovanie geoelektricheskikh polei v osesimmetrichnykh kusochno-odnorodnykh sredakh: dis ... kand. fiz.-mat. nauk* [Mathematical Modeling of Geoelectric Fields in Axisymmetric Piecewise Homogeneous Media. Cand. Phys. and Mathematics Sci. Diss.]. Sterlitamak, 2005. 106 p. [in Russian].

5 Verzhbitskii V.M. *Osnovy chislennykh metodov* [Fundamentals of Numerical Methods]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2002. 840 p. [in Russian].

6 Shamsutdinova G.R., Viktorov S.V. Programmnoe sredstvo dlya modelirovaniya geoelektricheskikh polei pri reshenii pryamykh i obratnykh zadach elektrorazvedki [Software for Modeling Geoelectric Fields in Solving Direct and Inverse Problems of Electrical Prospecting]. *Sbornik tezisov dokladov otkrytoi regionalnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Telekommunikacionnoe oborudovanie rossiyskogo proishozhdeniya: problemy i perspektivy»* [Collection of Thesis of Open Regional Scientific and Practical Conference «Telecommunication Equipment of Russian Origin: problems and Prospects». 2017, pp. 54-57. [in Russian].

Сведения об авторах

About the authors

Захарова Г.Р., магистрант кафедры «Математическое моделирование»,
ФГБОУ ВО «БашГУ», филиал, Стерлитамак, Российская Федерация

G. R. Zakharova, Undergraduate Student of Mathematical Modeling
Department, FSBEI HE «BSU», Branch, Sterlitamak, Russian Federation

e-mail: g1u919a5@yandex.ru

Иванов А. Н., магистрант кафедры «Математическое моделирование»,
ФГБОУ ВО «БашГУ», филиал, Стерлитамак, Российская Федерация

A. N. Ivanov, Undergraduate Student of Mathematical Modeling
Department, FSBEI HE «BSU», Branch, Sterlitamak, Russian Federation

e-mail: sanekclubstr@mail.ru

Викторов С. В., канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Математическое
моделирование», ФГБОУ ВО «БашГУ», филиал, Стерлитамак, Российская
Федерация.

S. V. Viktorov, Candidate of Physics and Mathematics, Assistant Professor
of Mathematical Modeling Department, FSBEI HE «BSU», Branch,
Sterlitamak, Russian Federation

e-mail: viktorov@rambler.ru

Мустафина С. А., д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующая кафедрой
«Математическое моделирование», ФГБОУ ВО «БашГУ», филиал,
Стерлитамак, Российская Федерация

S. A. Mustafina, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of
Mathematical Modeling Department, FSBEI HE «BSU», Branch, Sterlitamak,
Russian Federation

e-mail: Mustafina_SA@mail.ru