

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ
ДАННЫХ МЕТОДА ДИПОЛЬНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

П.А. Коробейников, А.А. Соколова

Научный руководитель доцент Н.В. Молокова

Сибирский федеральный университет,

Институт космических и информационных технологий, г. Красноярск, Россия

Работа посвящена разработке программного комплекса для интерпретации данных, полученных методом дипольного электромагнитного зондирования – ДЭМЗ. Цель данного комплекса – автоматизировать процесс интерпретации. Это позволит в разы сократить сроки и повысить эффективность геофизических работ, основанных на методе ДЭМЗ.

Электромагнитные методы исследования геологической среды основаны на выявлении различий в степени и характере противодействия разных геологических образований и технологических включений (с различающимися электромагнитными свойствами) процессу распространения наведенного электромагнитного поля. Это позволяет выявлять в геологическом разрезе аномалеобразующие объекты и по электромагнитным характеристикам определять их геологическую природу. Метод ДЭМЗ активно развивался в 60-80 годах прошлого века, однако с тех пор не разрабатывался, и на данный момент теоретические основы метода содержатся в большом количестве разрозненных статей и публикациях. Использование аппаратуры, построенной на основе ДЭМЗ, позволяет определять геометрические и физические характеристики частей геологической среды с целью решения поисково-разведочных и других геологических задач. Благодаря индуктивному (бесконтактному) способу возбуждения и приема электромагнитного поля, аппарата позволяет выполнять полевые работы практически в любое время года и независимо от состояния поверхности исследуемых площадей: это могут быть скалы, сухие пески, различные мерзлые породы, акватории – возможности применения практически не ограничены [2].

Аппаратура, реализующая метод ДЭМЗ, состоит из приемника и передатчика определенной частоты, расстояние между которыми увеличивают, тем самым увеличивая глубину исследования. По данным, полученным с аппаратуры, строится полевая кривая, по характеру которой можно судить о разрезе. Цель разрабатываемого программного комплекса – анализ полученных с аппаратуры данных, сравнение полевых и теоретических кривых, рассчитанных для исследуемого разреза.

Для расчета теоретических кривых необходима модель, позволяющая описать произвольный геологический разрез. Модель должна позволять построить логарифмический график теоретической кривой с произвольными параметрами. Входными параметрами модели служат сопротивление – r , разнос – g , частота – f , и мощности слоев – d . Выходной параметр – эффективное сопротивление $\rho_{эфф}$, измеренное аппаратурой. Внутренними параметрами являются скин-слои – δ , волновые – k и магнитные числа – H_z , H_r . Измерения необходимо привязывать к точке в пространстве, поэтому необходим параметр, описывающий нахождение приемника в некоторой системе координат. Совпадение полевой кривой с рассчитанной теоретической позволит определить входные параметры полевой кривой, по которым строится геологический разрез.

Объектом моделирования будем считать разрез глубиной D . Разрез представляет собой три слоя мощностью d_1, d_2, d_3 , (мощности слоев будем ограничивать от 0.5 до 50 м.). Каждый слой представляет породу, характеризующуюся сопротивлением ρ_1, ρ_2, ρ_3 (от 10 Ом до 10000 Ом). Будем считать, что магнитная проницаемость – μ всех сред одинакова и равна 1. Сопротивление определяет особенности проникновение

поля в слой, что описывает мнимая часть волнового числа k и параметры скин-слоев $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ ($0,01 < \delta_i < 2$), обозначающие ослабление поля в e раз. Это отражается на показателях напряженности вектора H магнитного поля, измеренного аппаратурой, и величине его проекций на соответствующие оси r/d_1 . Приемник находится на расстоянии r от нуля на координатной прямой. Разрез в рамках метода ДЭМЗ может быть описан теоретической кривой эффективного сопротивления $\rho_{эфф}$. Кривая создается по законам теории поля. График строится на логарифмических осях. На оси абсцисс отложено отношение r/d_1 , на оси ординат – отношение $\rho_{эфф}/\rho_1$.

Задача состоит в нахождении функции $\rho_{эфф}$, зависящей от множества параметров при заданных граничных условиях, и построения ее графика

Далее представлена математическая постановка задачи и алгоритм ее решения:

Вычисляем внутренние параметры k и $\delta_1, \delta_2, \delta_3$

$$k_0^2 = 0 \quad k_1^2 = i \frac{8\pi^2 f}{\rho_3 c^2}; \quad \delta_1 = 2d_1 \sqrt{\frac{f}{\rho_1}}; \quad \delta_2 = 2d_2 \sqrt{\frac{f}{\rho_2}}; \quad \delta_3 = 2d_3 \sqrt{\frac{f}{\rho_3}}$$

Вычисляем p, q, s – вспомогательные параметры: $s = (\delta_1^2 - \delta_2^2)((\delta_2 + \delta_3)^2 + (\delta_2 - \delta_3)^2 e^{-4\delta_2(1+i)}) + 2(\delta_2^2 - \delta_3^2)(\delta_1^2 + \delta_2^2) e^{-2\delta_2(1+i)}$

$$s = (\delta_1^2 - \delta_2^2)((\delta_2 + \delta_3)^2 + (\delta_2 - \delta_3)^2 e^{-4\delta_2(1+i)}) + 2(\delta_2^2 - \delta_3^2)(\delta_1^2 + \delta_2^2) e^{-2\delta_2(1+i)}$$

Вычисляем $H_z^{одн}$ и $H_r^{одн}$ – магнитные числа однородной среды:

$$H_r^{одн} = ((k_1^2 - k_0^2)r^2 I_0 K_0 - (16 + (k_1^2 - k_0^2)r^2) I_1 K_1 + 4(k_1 - k_0)r I_0 K_1 - 4(k_1 + k_0)r I_1 K_0)$$

$$H_z^{одн} = ((k_1^2 - k_0^2)r^2 I_0 K_0 - (16 + (k_1^2 - k_0^2)r^2) I_1 K_1 + 4(k_1 - k_0)r I_0 K_1 - 4(k_1 + k_0)r I_1 K_0)$$

Где I, K – функции Бесселя с аргументом $(k_1 * r / 2)$, далее вычисляем величины проекций для трехслойной среды.

$$H_z = H_z^{одн}(p3) + \frac{9i(\delta_2^2 - \delta_3^2)(1 - e^{-2\delta_2(i+1)})((\delta_2 + \delta_3)^2 - (\delta_2 - \delta_3)^2 e^{-2\delta_2(i+1)})}{r^2 \delta_2^2 \delta_3^2 ((\delta_2 + \delta_3) - (\delta_2 - \delta_3) e^{-2\delta_2(i+1)})^2} - \frac{9i(1 - e^{-2\delta_2 \bar{d}1(i+1)})(p^2 - q^2 e^{-2\delta_2 \bar{d}1(i+1)})_S}{r^2 \delta_2^2 \delta_3^2 (p - q e^{-2\delta_2 \bar{d}1(i+1)})^2}$$

$$H_z = H_z^{одн}(p3) + \frac{9i(\delta_2^2 - \delta_3^2)(1 - e^{-2\delta_2(i+1)})((\delta_2 + \delta_3)^2 - (\delta_2 - \delta_3)^2 e^{-2\delta_2(i+1)})}{r^2 \delta_2^2 \delta_3^2 ((\delta_2 + \delta_3) - (\delta_2 - \delta_3) e^{-2\delta_2(i+1)})^2} - \frac{9i(1 - e^{-2\delta_2 \bar{d}1(i+1)})(p^2 - q^2 e^{-2\delta_2 \bar{d}1(i+1)})_S}{r^2 \delta_2^2 \delta_3^2 (p - q e^{-2\delta_2 \bar{d}1(i+1)})^2}$$

H_z/H_r связано с отношением H_z/H_r полиномами аппроксимации [1].

На данном этапе разработана первая часть программного комплекса, позволяющая использовать представленную математическую модель для построения теоретических кривых зондирования (см. рисунок).

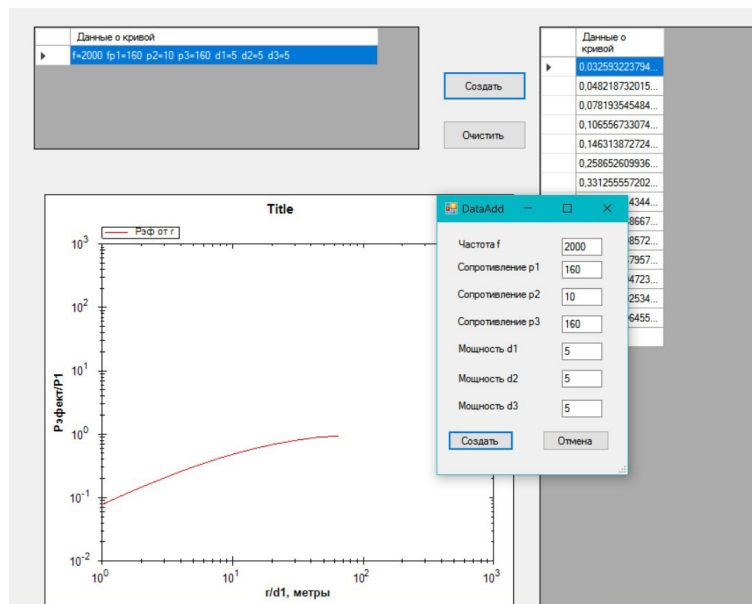


Рис. Главное окно программы построения теоретических кривых

Реализована возможность самостоятельно задавать входные параметры, изменение которых влияет на форму теоретической кривой. Разработка ведется на языке программирования C#, для корректной работы программы были написаны необходимые дополнительные библиотеки, в частности, программный модуль вычисления функций Бесселя. Следующим этапом разработки является оценка погрешностей при построении кривых, сравнение полученных результатов с палочечной интерпретацией. С помощью программы возможно построение большего числа теоретических кривых, чем существующее число палочек, следовательно, точность интерпретации будет гораздо выше.

Литература

1. Вешев А.В. Интерпретация электромагнитных зондирований с незаземленными источниками поля – Ленинград, 1989. – 53 с.
2. Иголкин В.И., Шайдунов Г.Я, Тронин О.А., Хохлов М.Ф. Методы и аппаратура электроразведки на переменном токе – Красноярск : СФУ, 2016. – 272 с.