

А. Е. Личная^{1,2}, Н. В. Штабель^{1,2}*

Оценка влияния глубины залегания рудного тела на электромагнитные сигналы ЗСБ

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН г. Новосибирск, Российская Федерация

²Новосибирский государственный технический университет г. Новосибирск, Российская Федерация

* e-mail: orlovskayanv@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе рассматривается задача оценки влияния такого параметра как глубина залегания проводящего объекта (рудного тела) на сигналы зондирования становлением по данным численного моделирования. Для этого была проведена серия вычислительных экспериментов с рудными телами на разных глубинах и выявлен линейный характер сдвига аномальных сигналов ЭДС от глубины залегания руды. По выявленным зависимостям построены аппроксимационные уравнения для оценки глубины залегания руды, которые показали хорошую достоверность на модельных данных.

Ключевые слова: численное моделирование, зондирование становлением, рудные тела

A. E. Lichnaya^{1,2}, N. V. Shtabel^{1,2}*

Assessment of the influence of the ore body depth on the electromagnetic signals of TEM sounding

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State Technical University Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: orlovskayanv@ipgg.sbras.ru

Abstract. The paper considers the problem of evaluating the influence of such a parameter as the depth of occurrence of a conductive object (ore body) on the signals of probing by formation according to numerical modeling data. For this purpose, a series of computational experiments with ore bodies at different depths were conducted and the linear character of the shift of anomalous EMF signals from the ore occurrence depth was revealed. According to the revealed dependences, approximation equations were constructed to estimate the ore occurrence depth, which showed good reliability on model data.

Keywords: numerical modeling, time-domain electromagnetic sounding, ore bodies

Введение

Электромагнитные методы показали высокую эффективность в задачах поисков месторождений металлосодержащих руд. Для решения таких задач применяются методы постоянного тока (электротомографию), МТЗ и его модификации и индукционные методы [1]. Метод зондирования становления поля (ЗСБ) относится к индукционным нестационарным методам. Повышения качества интер-

претации сигналов ЗБС под рудными залежами является актуальной задачей. В работе методами математического численного моделирования определяются сигналы ЭДС, полученные для моделей с различной глубиной залегания рудного объекта и проводится анализ влияния глубины объекта на полезный сигнал.

Постановка задачи

Рассматривается задача моделирования электрического поля и сигналов ЭДС в приемных петлях для модели слабопроводящего пространства с локальным проводящим объектом, представляющим пластообразное рудное тело. Размеры проводящего объекта 200х300х10м.

Зондирующая установка представляет собой генераторную петлю со стороной 500м и 49 приемных петель со стороной 100м, расположенных по площади с расстоянием между центрами 50м. Взаимное расположение зондирующей установки и рудного объекта показано на рис. 1. Глубина подошвы рудного объекта варьируется от 50 до 350 метров с шагом 50м.

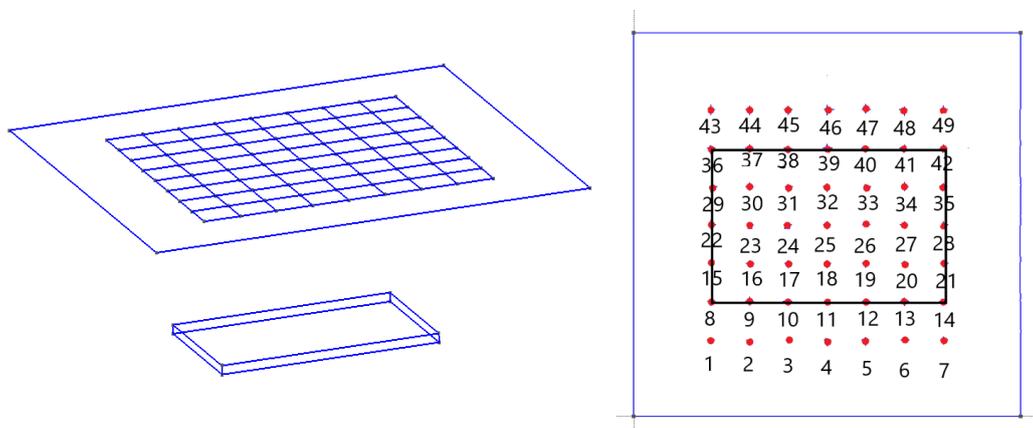


Рис. 1. Расположение зондирующей установки и рудного объекта

Математическая модель

Для решения задачи зондирования среды методом становления поля систему уравнений Максвелла представляют в виде гиперболического уравнения второго порядка относительно напряженности электрического поля:

$$\operatorname{rot} \mu^{-1} \operatorname{rot} \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = -\frac{\partial \vec{J}}{\partial t}, \quad (1)$$

где \vec{E} - напряженность электрического поля, \vec{J} - ток в генераторной петле, t - время моделирования, μ - магнитная проницаемость среды, ε - диэлектрическая проницаемость среды, σ - электропроводность среды. Для исследуемых сред $\mu = \mu_0$, $\varepsilon = \varepsilon_0$, поэтому токами смещения $\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$ можно пренебречь, т.к. эта вели-

чина много меньше токов проводимости $\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$. В результате получаем уравнение, описывающее процесс распространения электрического поля в проводящей среде:

$$\operatorname{rot} \mu^{-1} \operatorname{rot} \vec{E} + \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = -\frac{\partial \vec{J}}{\partial t},$$

Для решения уравнения воспользуемся векторным методом конечных элементов. Определим ряд функциональных пространств, в которых будем искать решение [2, 3]:

$$\begin{aligned} H(\operatorname{rot}, \Omega) &= \{\vec{u} \in L^2(\Omega) \mid \nabla \times \vec{u} \in L^2(\Omega)\} \\ H_0(\operatorname{rot}, \Omega) &= \{\vec{u} \in H(\operatorname{rot}, \Omega) \mid \vec{u} \times \vec{n}|_{\partial\Omega} = 0\} \end{aligned}$$

С соответствующим скалярным произведением и нормами:

$$\begin{aligned} (\vec{u}, \vec{v})_{\Omega} &= \int_{\Omega} \vec{u} \cdot \vec{v} dx, \quad \|\vec{u}\| = \sqrt{(\vec{u}, \vec{u})_{\Omega}}, \\ \|u\|_{H(\operatorname{grad}, \Omega)}^2 &= \|u\|_{\Omega}^2 + \|\nabla u\|_{\Omega}^2, \quad \|\vec{u}\|_{H(\operatorname{rot}, \Omega)}^2 = \|\vec{u}\|_{\Omega}^2 + \|\nabla \times \vec{u}\|_{\Omega}^2 \end{aligned}$$

Для задачи (1) сформулируем вариационную постановку:

Для заданного $\vec{J} \in L^2(\Omega) \times (0, T)$ найти $\vec{E} \in H_0(\operatorname{rot}, \Omega) \times (0, T)$ такое, что $\forall \vec{W} \in H_0(\operatorname{rot}, \Omega) \times (0, T)$ выполняется

$$(\mu^{-1} \operatorname{rot} \vec{E}, \operatorname{rot} \vec{W})_{\Omega} + \sigma \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \vec{W} \right)_{\Omega} = - \left(\frac{\partial \vec{J}}{\partial t}, \vec{W} \right)_{\Omega} - \int_{\partial\Omega} \mu^{-1} (\vec{W} \times \vec{n}) \operatorname{rot} \vec{E} dS \quad (2)$$

Для построения дискретного аналога вариационной задачи (2) будем аппроксимировать функции пространства $H_0(\operatorname{rot}, \Omega)$ элементами дискретного подпространства $H^h(\operatorname{rot}, \Omega)$, определенного как

$$H^h(\operatorname{rot}, \Omega) = \operatorname{span}\{\vec{W}_1, \vec{W}_2, \dots, \vec{W}_n\} \subset H_0(\operatorname{rot}, \Omega)$$

Конечномерное решение уравнения E^h можно представить в виде разложения по базису пространства

$$\vec{E}^h(x, t) = \sum_{i=1}^N e_i(t) \vec{W}_i(x), \quad \vec{W}_i \in H^h(\operatorname{rot}, \Omega) \quad (3)$$

Определим условия на границах области моделирования Ω .

$$\vec{E} \times \vec{n} \Big|_{\partial\Omega} = 0 \quad (4)$$

Условия (4) – так называемые условия «большого бака»: требования обращения в ноль тангенциальной компоненты электрического поля на внешней границе среды. Дискретный аналог вариационной задачи (2) принимает вид:

Для $\vec{J} \in L^2(\Omega) \times (0, T)$ найти $\vec{E}^h \in H^h(\text{rot}, \Omega) \times (0, T)$ такое, что $\forall \vec{W}^h \in H^h(\text{rot}, \Omega) \times (0, T)$ выполняется

$$(\mu^{-1} \text{rot} \vec{E}^h, \text{rot} \vec{W}^h)_{\Omega} + \sigma \left(\frac{\partial \vec{E}^h}{\partial t}, \vec{W}^h \right)_{\Omega} = - \left(\frac{\partial \vec{J}}{\partial t}, \vec{W}^h \right)_{\Omega} \quad (5)$$

С учетом разложения (3) запишем задачу (5) в матричном виде:

$$A\vec{e} + \sigma C \frac{\partial \vec{e}}{\partial t} = - \frac{\partial \vec{F}}{\partial t}$$

где

$$\begin{aligned} [A]_{ij} &= \int_{\Omega} \mu^{-1} \text{rot} \vec{W}_i \cdot \text{rot} \vec{W}_j d\Omega, \quad i, j = 1, N_e \\ [C]_{ij} &= \int_{\Omega} \vec{W}_i \cdot \vec{W}_j d\Omega, \quad i, j = 1, N_e \\ [F]_i &= \int_{\Omega} \vec{J} \cdot \vec{W}_i d\Omega, \quad i = 1, N_e \end{aligned}$$

Диапазон времен, для которого необходимо проводить измерения ЭДС, как правило, составляет от микросекунд до сотен миллисекунд. Использование схемы аппроксимации по времени с постоянным шагом для таких задач не целесообразно: большой шаг по времени приведет к неточностям решения в начале диапазона времен, приемлемый шаг в начале измерений потребует слишком большого количества итераций по времени для достижения больших времен измерения. Для аппроксимации задачи (5) по времени использовалась неявная трехслойная схема с изменяющимся шагом по времени [6]:

$$\begin{cases} A\vec{e}^n + C \frac{\vec{e}^n - \vec{e}^{n-1}}{\tau} = - \frac{\vec{F}^n - \vec{F}^{n-1}}{\tau}, & t \in (0, T_1) \\ A\vec{e}^n + C \frac{\vec{e}^n - \vec{e}^{n-1}}{\tau} = 0, & t \in (T_1, T_2) \end{cases}$$

где T_1 - время отключения источника тока, T_2 - время окончания моделирования, τ - шаг аппроксимации по времени. Достаточно малые шаги по времени в начале измерений постепенно увеличиваются и позволяют за небольшое количество итераций достигать больших времен измерений.

Обсуждение результатов

Для расчетов использовались следующие параметры среды. Вмещающая среда обладает не магнитными свойствами и удельным электрическим сопротивлением (УЭП) 1000 Ом·м. Рудный объект также не магнитный с УЭП 10 Ом·м. Время регистрации сигналов ЭДС до 5 мс после выключения тока. Амплитуда тока в генераторной петле 20 А. Полученные сигналы ЭДС для моделей с рудным объектом на разной глубине представлены на рис. 2.

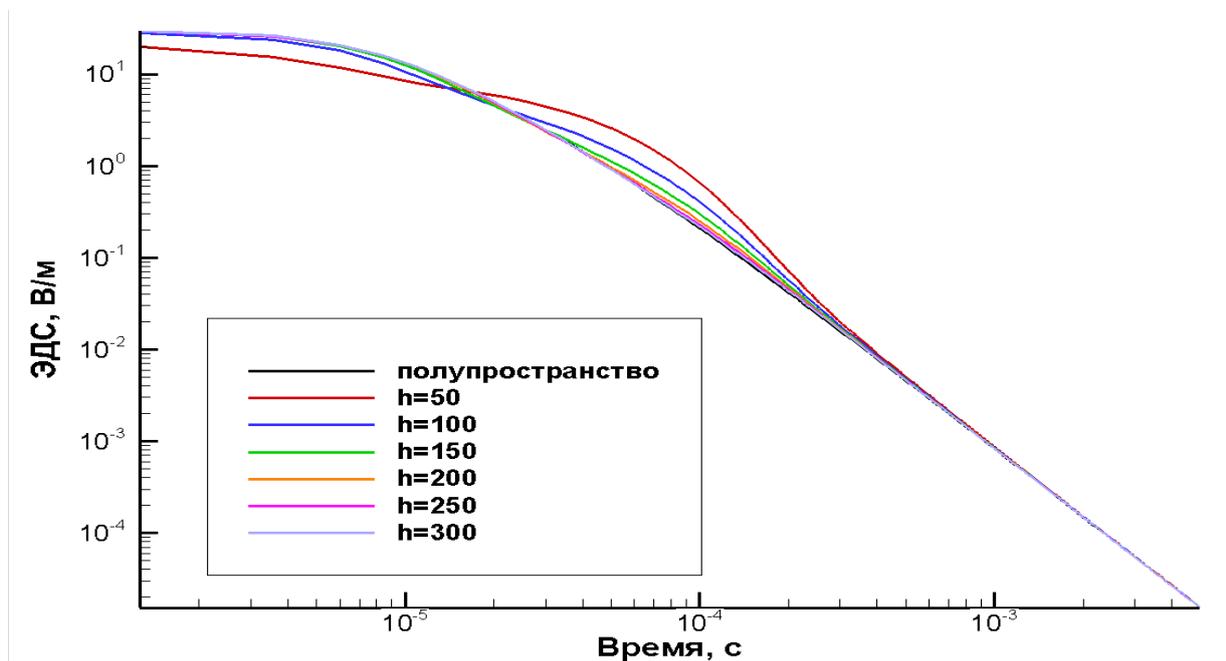


Рис. 2. ЭДС в петле 25 для моделей с объектами на разной глубине и полупространства

Из рисунка видно, что на ранних временах для объектов, залегающих на малых глубинах (50 и 100 м), сигналы ЭДС оказываются заниженными по сравнению с полупространством. В диапазоне времен 11 мкс - 0.2 мс наблюдается аномальное отклонение сигналов, связанное с влиянием рудного тела. С ростом глубины залегания руды величина аномалии уменьшается, и сигналы ЭДС стремятся к ЭДС полупространства. На поздних временах после 0.5 мс все сигналы выходят на уровень сигналов полупространства. На рис.3 представлены распределения ЭДС по площади измерений в диапазоне времен 83-97 мкс, соответствующий максимальному отклонению сигналов от сигнала полупространства для моделей с заглублением на 50, 100, 150 м. Из графиков видно, что максимальная реакция на объект наблюдается в центральной петле с номером 25. Однако ам-

плитуда ЭДС снижается с ростом глубины залегания рудного тела. Поскольку центры сетки наблюдений и объекта соосны, то наблюдается симметрия распределения откликов от центра к краям объекта, и для дальнейшего анализа можно выбрать четверть точек измерения. Распределение ЭДС по площади для моделей с объектом оказывается схожим по форме на распределение измерений без объекта, но существенно превышает их по амплитуде (рис. 3). Относительное отклонение сигналов ЭДС с рудными телами по сравнению с полупространством представлено на рис. 4. Из рисунка видны два экстремума отклонения сигналов: минимум на ранних временах и максимум на средних временах. В момент достижения минимума наблюдается максимальное занижение кривой ЭДС с рудным телом относительно полупространства. Момент достижения максимума отклонения характерен максимуму аномального поля от рудного объекта.

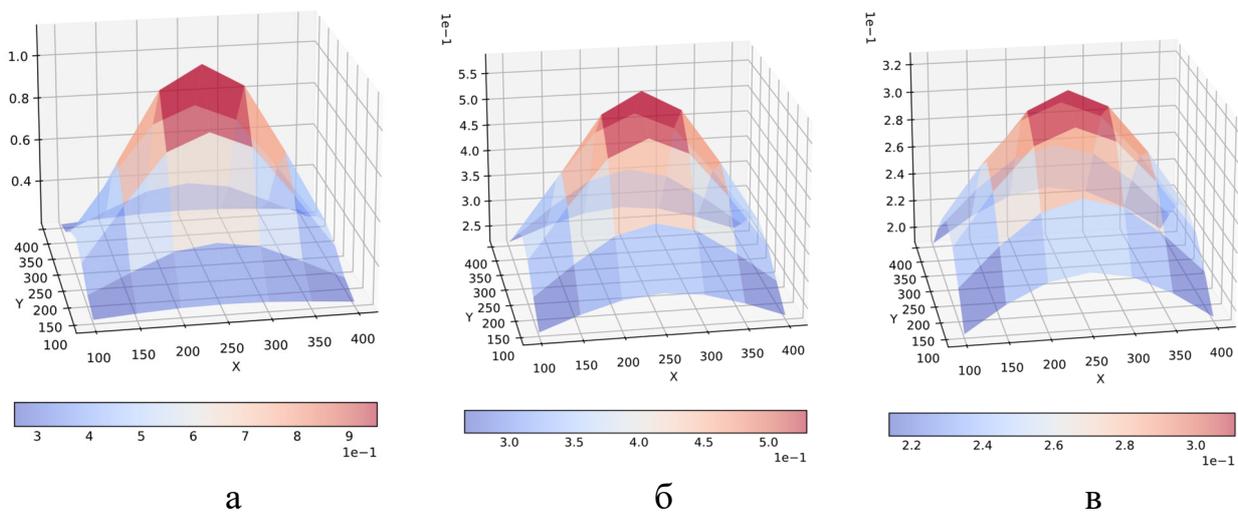


Рис. 3. Распределение ЭДС по площади приемных петель для моделей с глубиной залегания рудного объекта на глубине 50м (а), 100 м(б) и 150м(в) в момент времени 83 мкс (а), 85 мкс(б) и 97 мкс(в)

Из рис. 4 видно, что времена достижения точек экстремумов смещаются с увеличением заглубления рудного тела, а величина экстремума уменьшается нелинейно. Представляем зависимости времен достижения минимума и максимума от глубины подошвы рудного тела на графиках (рис. 5). Из графиков видно, что с ростом глубины залегания подошвы рудного тела происходит рост времени достижения минимальной или максимальной разницы сигналов для моделей с рудным телом и полупространством. Эта зависимость носит линейный характер.

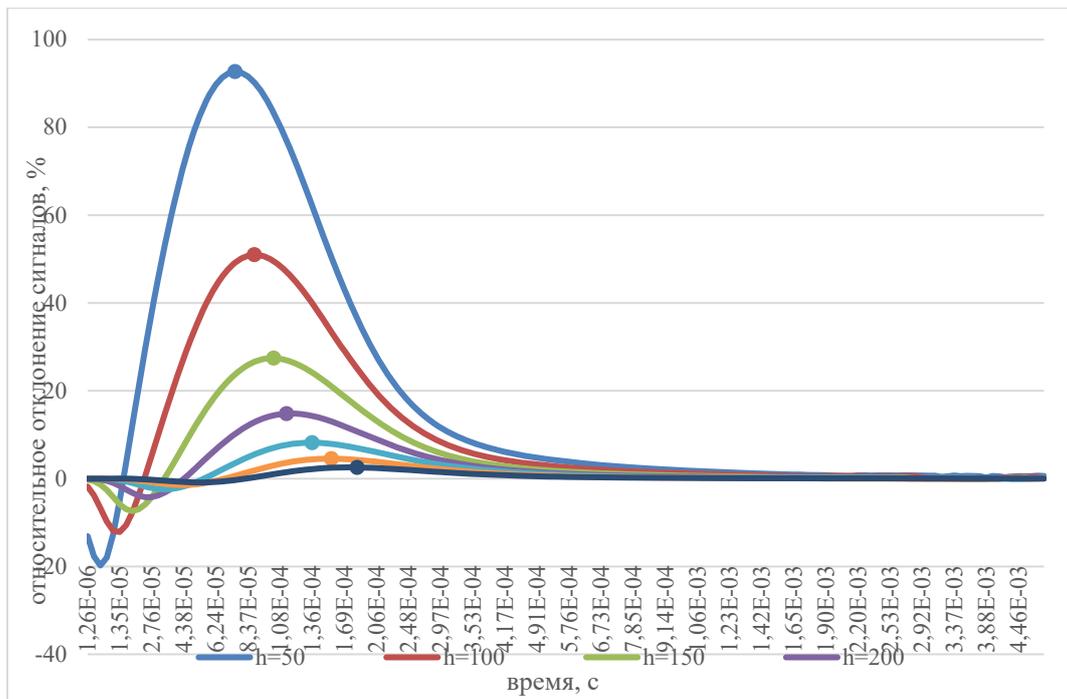


Рис. 4. Относительное отклонение сигналов ЭДС с рудными телами по сравнению с полупространством для 20 петли

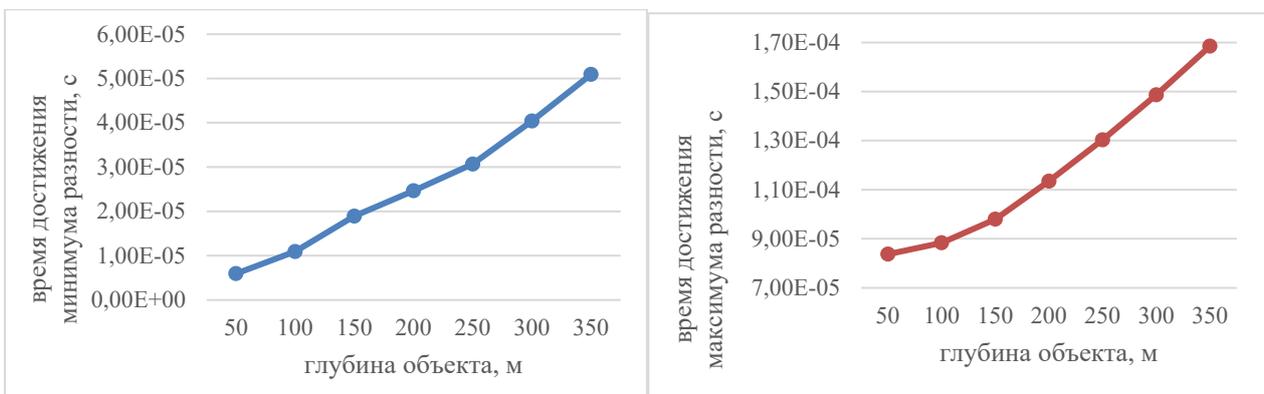


Рис. 5. Зависимости времени достижения минимума (слева) и максимума (справа) относительной разницы ЭДС от глубины подошвы рудного тела в петле 25

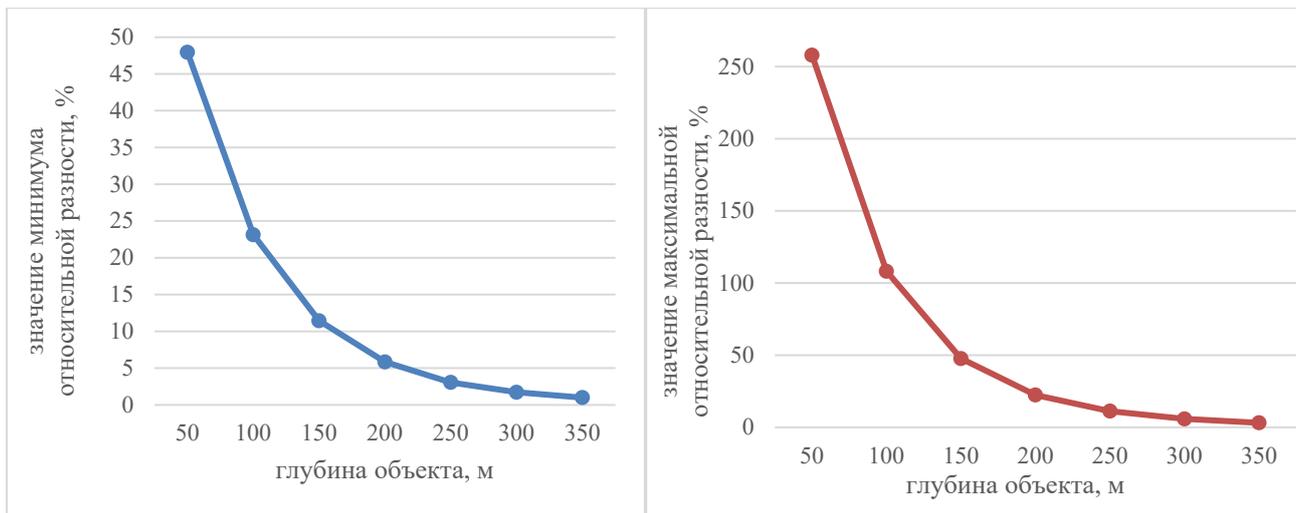


Рис. 6. Зависимости значений минимума (слева) и максимума (справа) относительной разности ЭДС от глубины подошвы рудного тела

По графикам, представленным на рис. 5, можно построить уравнения для определения глубины залегания объекта от времени достижения минимума или максимума:

$$H(t_{\min}) = 6,79 \cdot 10^6 \cdot t_{\min} + 25,7 \quad H(t_{\max}) = 3,32 \cdot 10^6 \cdot t_{\max} - 193,$$

где t_{\min} - время достижения минимума разности сигналов, t_{\max} - время достижения максимума разности сигналов, H - оценка глубины залегания подошвы рудного тела.

Зависимость амплитуды разности ЭДС от глубины залегания подошвы рудного тела, представленная на рис. 6 носит экспоненциальный характер. Чем глубже находится рудный объект, тем меньше аномальный отклик сигналов ЭДС. Однако показатель зависимости, представленной на рис. 6 не является константой, а линейно зависит от глубины проводящего тела. Эти зависимости могут быть аппроксимированы следующими уравнениями:

$$A_{\min} = -e^{-0,0229H+4,933} \quad A_{\max} = e^{-0,0181H+6,45},$$

где A_{\min} - амплитуда минимума разности сигналов, A_{\max} - амплитуда максимума разности сигналов. Для оценки глубины залегания H можно воспользоваться следующими формулами:

$$H(A_{\min}) = \frac{\ln(-A_{\min}) + 0.0229}{4.933} \quad H(A_{\max}) = \frac{\ln(A_{\max}) + 0.0181}{6.45}$$

Для проверки полученных уравнений для оценки глубины залегания был проведен дополнительный вычислительный эксперимент с рудным телом, залегающим на глубине 115-125м. По полученным сигналам ЭДС были определены параметры t_{\min} , t_{\max} , A_{\min} и A_{\max} . Оценки глубины залегания подошвы рудного тела, полученные по предложенным уравнениям, следующие:

$$H(t_{\min})=117.61\text{м} \quad H(t_{\max})=115.78\text{м} \quad H(A_{\min})=120.63\text{м} \quad H(A_{\max})=93.86\text{м}$$

Наиболее точная оценка с погрешностью 3.5% была получена по амплитудам минимума разницы. Наименее точная оценка получена по амплитудам максимума разницы (погрешность 24.9%). Погрешности оценки, полученные по временам достижения минимума и максимума разницы, составили 6-7%.

Заключение

В работе выявлена зависимость аномальных сигналов ЭДС от глубины залегания рудного тела в слабопроводящей среде по данным численного моделирования. По выявленным зависимостям предложены уравнения для оценки глубины залегания рудного тела по параметрам, определяемым по измеренным сигналам ЭДС. Три из четырех предложенных аппроксимаций показали хорошую достоверность в пределах 4-7% погрешности. Необходимо продолжить исследования с целью определения устойчивости предлагаемых зависимостей от других параметров рудного тела и зондирующей установки.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта ФНИ FWZZ-2022-0030.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kulikov V.A., Yakovlev A.G., Polikarpova V.A., 2021. Some problems of electrical geophysical prospecting methods used for exploration of ore deposits// Geodynamics & Tectonophysics 12 (3s), 731–747. doi:10.5800/GT-2021-12-3s-0550
2. Nedelec J.C. Mixed finite elements in R^3 // Numerische Mathematik, 1980, v. 35, № 3, p. 315—341.
3. Nedelec J.C. A new family of mixed finite elements in R^3 // Numer. Mathem., 1986, v. 50, p. 57—81.

© А. Е. Личная, Н. В. Штабель, 2024