УДК 550.837

А.В.ЧЕРНЫШЕВ, *канд. техн. наук., ст. науч. сотр., chernshv@sniiggims.ru*
Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья, Новосибирск

A.V.CHERNYSHEV, *PhDr. tech. Sci., Senior Research Fellow, chernshv@sniiggims.ru*
Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, Novosibirsk

ТЕХНОЛОГИЯ ОДНОМЕРНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ АЭРОЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ МЕТОДОМ СТАНОВЛЕНИЯ ПОЛЯ

Рассматриваются способы одномерной интерпретации данных аэроэлектроразведки становлением поля. Приводятся основные приемы, позволяющие адаптировать общепринятые методики интерпретации наземной электроразведки на случай аэровариантa. Работоспособность рассматриваемых методов анализируется на модельных данных. Приводится пример практического применения разработанных методов.

***Ключевые слова*:** одномерная интерпретация, одномерная инверсия, аэроэлектроразведка становлением поля, кажущееся удельное сопротивление, горизонтально-слоистая модель, регуляризация обратной задачи, вертолетная разведочная платформа.

1D-INTERPRETATION TECHNOLOGY OF AIRBORNE TEM DATA

One-dimensional interpretation methods of airborne transient electromagnetic data are considered. Main techniques, used for adaptation of standard methods of ground electroprospecting data interpretation to airborne technique, are described. The efficiency of methods examined was analyzed on theoretical data set. An example of practical application of methods developed is presented.

***Key words*:** 1D-interpretation, 1D-inversion, airborne electromagnetic prospecting, airborne TEM, apparent resistivity, horizontally layered medium, inverse problem regularization, helicopter prospecting platform.

Введение. Как правило, первым этапом интерпретации данных аэроэлектроразведки становлением поля является получение оценки геоэлектрического разреза в терминах кажущихся параметров (например, кажущееся удельное сопротивление), а также в рамках горизонтально-слоистой модели среды. Иногда интерпретация вообще ограничивается использованием одномерных методик. От качества восстановления параметров вмещающей горизонтально-слоистой среды зависит результат дальнейшей, уже трехмерной, интерпретации. В работе рассмотрено несколько способов одномерной интерпретации данных аэроэлектроразведки.

1. Построение кажущегося удельного сопротивления. Способ вычисления кажущегося удельного сопротивления ρ_τ по данным аэроэлектроразведки отличается от способа вычисления ρ_τ по данным наземной съемки наличием в модели известной высоты полета аэрозонда над поверхностью Земли. Поэтому для учета заданной высоты зонда над Землей необходимо использовать модель среды, состоящей из двух слоев. Первый слой – воздух, второй – полупространство с удельным сопротивлением ρ. Таким образом, необходимо вычислять ЭДС от двухслойной модели.

Алгоритм расчета становления поля в слоистой среде представлен как комбинация полуаналитического и численного методов решения для модели, предложенной А.Н. Тихоновым.

Вычисление функции $Z(m,z,t)$, являющейся решением одномерной краевой задачи, основано на выделении основного поля*. Для этого функция Z представляется в виде суммы функций Z^0, являющейся решением задачи при $\sigma = \sigma^0 = \text{const}$, и $\tilde{Z}$, являющейся решением задачи

$$
\begin{gathered}
-\frac{\partial^2 \tilde{Z}}{\partial z^2} + m^2 \tilde{Z} + \mu_0 \sigma \frac{\partial \tilde{Z}}{\partial t} = -\mu_0 (\sigma - \sigma^0) \frac{\partial Z^0}{\partial t}, \\
\tilde{Z}\Big|_{t=0} = 0; \\
\frac{\partial \tilde{Z}}{\partial z} + m\tilde{Z} = 0 \text{ при } z = 0; \\
\frac{\partial \tilde{Z}}{\partial z} - m\tilde{Z} = 0 \text{ при } z = H_N.
\end{gathered}
\qquad (1)
$$

Показано, что функция Z^0 может быть получена из функции $\bar{Z} = Z^0 \Big|_{\sigma=\sigma^0=1}$ заменой переменной t на $\tau = t/\sigma^0$.

Преимущество постановки (1) заключается в том, что вычисленная заранее с высокой точностью функция $\bar{Z}$ позволяет получать $\tilde{Z}$, используя гораздо менее подробные пространственные и временные сетки по сравнению с решением исходной задачи напрямую, что существенно сокращает время решения основной задачи. Описанный подход позволяет быстро и точно вычислять значения поля магнитного диполя в произвольной горизонтально-слоистой среде.

Существует несколько способов вычисления кажущегося сопротивления ρ_τ. Наиболее универсальным из них является метод подбора.

Для получения ЭДС $\varepsilon(t, \rho)$ в полупространстве с сопротивлением ρ достаточно получить ЭДС в полупространстве с сопротивлением $\rho = 1$ Ом·м, а затем воспользоваться соотношением

$$\varepsilon(t,\rho) = \rho\varepsilon(\rho t,1).$$

Данное соотношение справедливо и для двухслойной модели с воздухом.

Далее остается воспользоваться любым методом одномерной минимизации для определения ρ_τ при фиксированном значении времени t.

Заметим, что данный способ интерпретации, хотя и носит качественный характер, позволяет получать довольно правдоподобные результаты в очень сжатые сроки, т.е. является способом экспресс-интерпретации. Это достигается благодаря использованию описанного выше быстрого способа вычисления ЭДС от слоистой модели и возможности дополнительного ускорения за счет использования заранее насчитанного архива ЭДС от полупространства на различной высоте полета.

Представленный на рис.1 глубинный разрез кажущегося удельного сопротивления получен в результате применения описанной процедуры к данным, полученным при профилировании над моделью трехмерного объекта (параллелепипед с размерами 180×180×70 м^3). Зонд находится на высоте 30 м.

2. Интерпретация на основе горизонтально-слоистой модели среды. Пусть имеется экспериментальная ЭДС $\varepsilon^*(t)$, известная в моменты времени t_k, $k = 1,\ldots,K$. Пусть также известна вмещающая горизонтально-слоистая среда, т.е. известна кусочно-постоянная функция ρ^0 – удельное сопротивление вмещающей среды. В простейшем случае в качестве вмещающей среды выбирается полупространство с удельным сопротивлением, подбираемым по всей кривой зондирования.

Разобьем исследуемую область на N слоев фиксированной мощности и будем искать значения их сопротивлений $\rho = (\rho_1, \ldots, \rho_N)^T$. Представим $E(\rho)$ – относительное отклонение ЭДС $\varepsilon(t)$, соответствующее значениям ρ, от $\varepsilon^*(t)$ в виде

$$
\begin{gathered}
E \approx E^0 + \frac{\partial E}{\partial \rho_1}(\rho_1 - \rho_1^0) + \ldots + \frac{\partial E}{\partial \rho_N}(\rho_N - \rho_N^0) = \\
= E^0 + J(\rho - \rho^0),
\end{gathered}
$$

где

$$
E_k = \frac{\varepsilon_k - \varepsilon_k^*}{\varepsilon_k^*},\ E^0 = E(\rho^0),\ J = \left\{\frac{\partial E_k}{\partial \rho_n}\right\},
$$

$k = 1\ldots K,\ n = 1\ldots N$.

* *Trigubovich G.* The new approach to electromagnetic fields interpretation for TEM with areal observation system / G.Trigubovich, M.Royak, Y.Soloveichik. and A.Chernyshev // Abstracts of EAGE 63rd Conference & Technical Exhibition (11–15 June 2001). Amsterdam, The Netherlands, 146 p.

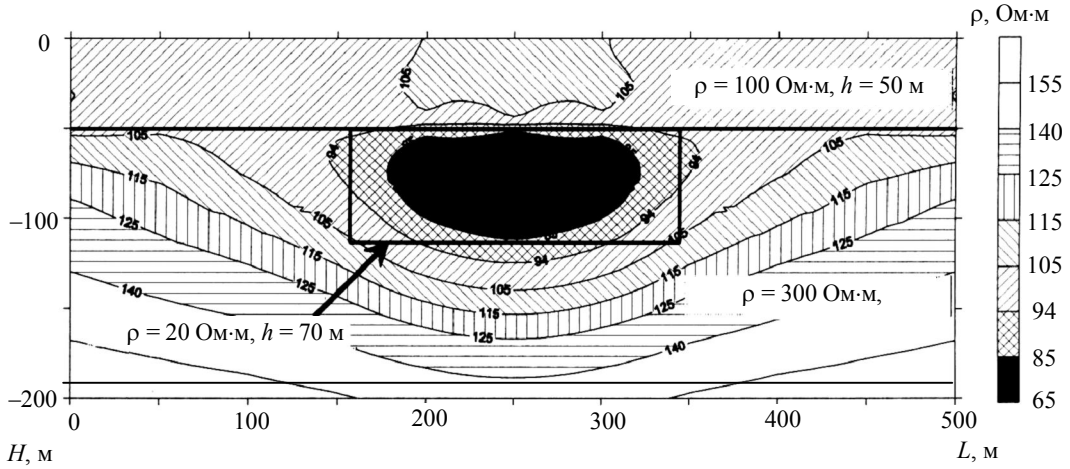


Рис.1. Глубинный разрез ρ_τ

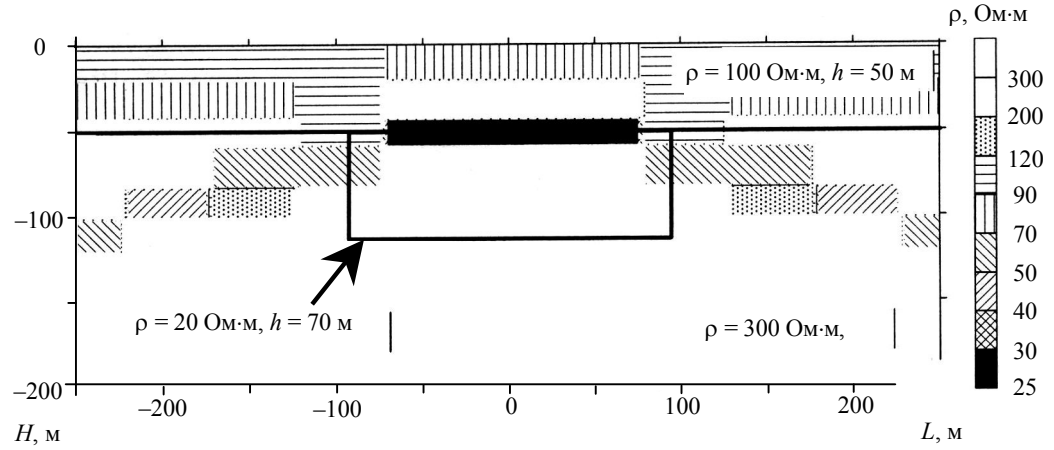


Рис.2. Глубинный разрез ρ

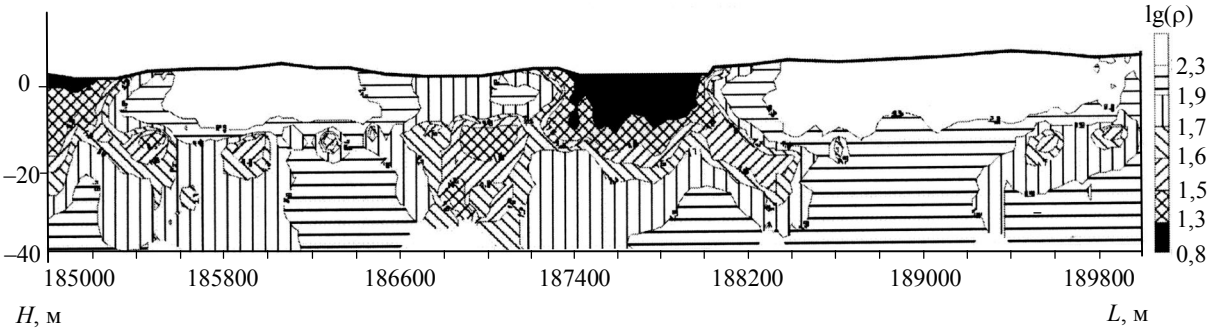


Рис.3. Глубинный разрез $\lg(\rho_\tau)$

Минимизация функционала

$$F = [E^0 + J(\rho - \rho^0)]^T [E^0 + J(\rho - \rho^0)]$$

приводит к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$A\nu = b, \qquad (2)$$

где $A = J^T J,\ b = -J^T E^0,\ \nu = \rho - \rho^0$.

Результатом решения линеаризованной задачи (2) является направление ν минимизации функционала ошибки:

$$S(\rho) = E^T E. \qquad (3)$$

При таком подходе основной проблемой является некорректность решаемой за-

дачи. Поэтому мы будем решать модифицированную (регуляризированную) СЛАУ:

$$Bu = b,\ \ B = A + \alpha I\ . \qquad (4)$$

Здесь α – параметр регуляризации СЛАУ (неотрицательный), I – единичная диагональная матрица.

Одним из принципов выбора значения параметра регуляризации является алгоритм выбора квазиоптимального значения α^*, состоящий в поиске α, реализующего минимальный из локальных минимумов функционала:

$$f(\alpha) = \left\| \alpha \frac{du(\alpha)}{d\alpha} \right\|,$$

где $u(\alpha)$ – решение регуляризированной СЛАУ (4).

Использование способа выбора квазиоптимального значения коэффициента регуляризации позволяет получать решение, существенно понижающее значение функционала ошибки (3), не используя при этом дополнительный одномерный поиск вдоль направления минимизации функционала (3), что существенно ускоряет процесс решения всей задачи. В результате данный способ интерпретации стали применять и для аэроэлектроразведочных данных, характеризующихся огромным количеством точек зондирования. Глубинный разрез удельного сопротивления построен по параметрам описанной выше модели (рис 2).

3. Результаты практических работ. Продемонстрируем результат аэроэлектроразведочных исследований становлением поля с последующей одномерной инверсией данных при изучении геоэлектрического разреза с целью картирования участков развития многолетнемерзлых грунтов, оценки глубины их развития и наличия таликов на участке от р. Печоры до мыса Святой Нос вдоль трассы нефтепровода «Харьяга – Индига». Исследования проводились с использованием вертолетной разведочной платформы «Импульс-А4», буксируемой под фюзеляжем вертолета МИ-8. На рис.3 приведен результат интерпретации аэроэлектроразведочных данных на одном из участков исследуемого профиля. На полученном распределении кажущегося удельного сопротивления отчетливо выделяются зоны таликов, соответствующие областям с пониженным сопротивлением.

Заключение. Полученные результаты показывают, что разработанные процедуры одномерной интерпретации вполне могут быть применены при обработке аэроэлектроразведочных данных. Разумеется, для получения более качественного результата необходимы процедуры, основанные на трехмерном строении среды, однако методы одномерной интерпретации необходимы для получения экспресс-оценок результатов исследований, а также для построения вмещающей модели среды в процедуре трехмерной интерпретации.