

О ПОВЫШЕНИИ ОДНОЗНАЧНОСТИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ

В.П.Колесников

Пермский государственный университет, 614990, Пермь, ул. Букирева, 15

E-mail: poisk@psu.ru

(статья поступила в редакцию 15 апреля 2011 г.)

Предложен новый способ повышения однозначности автоматической интерпретации площадных электроразведочных наблюдений методом ВЭЗ, основанный на использовании совокупности регуляризирующих элементов, вовлекаемых в интерпретационный процесс на основных его этапах. Приведены способы доопределения обратной задачи, общая схема построения алгоритма и приемы его реализации.

Ключевые слова: *вертикальное электрическое зондирование, компьютерная интерпретация, регуляризация, технология.*

Метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) является одним из базовых методов электроразведки. В силу потребностей и интенсификации производства, специфики решаемых задач он находится в постоянном совершенствовании и развитии, требуя создания технологий, обеспечивающих оперативность, достоверность и геологическую содержательность получаемых результатов.

Наиболее сложным в развитии метода является этап количественной интерпретации, затрагивающий фундаментальные вопросы, связанные с некорректностью решения обратных задач. Ввиду некорректности наблюдаемым значениям электрического зондирования может соответствовать достаточно большой набор эквивалентных решений, отвечающих наблюдаемым данным с точностью до погрешностей полевых наблюдений δ (в рамках δ -эквивалентности), но в то же время, способных существенно отличаться от истинного.

Одним из путей повышения однозначности решения некорректных задач является их доопределение за счет привлечения дополнительной информации, вовлекаемой в интерпретационный процесс на основе использования принципа регуляризации [2].

Практическая реализация данного подхода находится в стадии поиска и развития. Как показывает опыт работ [1] эффективность его применения требует разработки специальных способов и приемов регуляризации, максимально учитывающих специфику конкретного метода, его информационные возможности, особенности и обоснованность используемой априорной информации, вовлекаемой на тех или иных этапах интерпретационного процесса.

В данной работе рассмотрен один из таких подходов повышения однозначности автоматической интерпретации применительно к интерпретационной системе программ Зонд [1].

В случае метода электрического зондирования можно выделить ряд элементов регуляризации, способствующих повышению однозначности решения обратной задачи, с использованием различного рода дополнительной качественной и количественной априорной информации об искомом решении:

1) согласованность решения с имеющимися параметрическими данными, например, с результатами бурения скважин:

$$F(p, a) = \sum_{j=1}^N \left(\frac{r_{k_j}(r) - \bar{r}_{k_j}(r, p)}{r_{k_j}(r)} \right)^2 + a \sum_{i=1}^{2n-1} |p_i^{ckg} - p_i| = \min; \quad (1)$$

где $r_{k_j}(r)$, $\bar{r}_{k_j}(r, p)$ - наблюдаемая и рассчитанная по данным интерпретации кривые зондирования; p_i, p_i^{ckg} - искомые и определенные по скважинам мощности и удельные электрические сопротивления слоев $p = (h_i, p_i, i=1, n)$; a - параметр регуляризации;

2) поиск решения в наиболее достоверных пределах (к примеру, в пределах эквивалентности решений) для каждого i -го слоя (p_i^h, p_i^g):

$$\Phi(p, b) = \sum_{j=1}^N \left(\frac{r_{k_j}(r) - \bar{r}_{k_j}(r, p)}{r_{k_j}(r)} \right)^2 + b \sum_{i=1}^{2n-1} (p_i^g - p_i)(p_i - p_i^h) = \min; \quad (2)$$

3) при условии гладкости границ:

$$f(p, g) = \sum_{j=1}^N \left(\frac{r_{k_j}(r) - \bar{r}_{k_j}(r, p)}{r_{k_j}(r)} \right)^2 + g \sum_{i=1}^{n-1} \left| \frac{\partial^2 z_i(x)}{\partial x^2} \right| = \min, \quad (3)$$

где $z_i(x)$ - глубина до i -й границы в точке с координатой x ;

4) при условии квазгоризонтальности границ:

$$G(z) = \frac{|\Delta z(x)|}{\Delta x} \leq k; \quad 0 \leq k \leq 0,29; \quad (4)$$

где k - предельное значения возможного угла наклона границы; $k = 0.29$ соответствует углу наклона границы, равному 16° .

5) в рамках чувствительности кривой зондирования к параметрам i -го слоя:

$$h(p_i) = \left| \frac{\Delta r_k(r)}{\Delta p_i} \right| > C_0, \quad (C_0 = 0,01). \quad (5)$$

При этом использование элементов регуляризации (1)-(5) должно осуществляться при условии соответствия искомого решения точности полевых наблюдений d_0 , то есть в рамках δ - эквивалентности:

$$\sum_{j=1}^N \left| \frac{r_{k_j}(r) - \bar{r}_{k_j}(r, p)}{r_{k_j}(r, p)} \right| \leq d_0. \quad (6)$$

Практическая реализация отмеченных выше элементов регуляризации (1)-(6) может быть самой различной. Ею, в принципе, может служить любая совокупность вычислительных операций, нацеленных на получение решения в рамках погрешности наблюдений, наиболее согласующегося с имеющимися априорными представлениями об исследуемой модели геологической среды. Это можно рассматривать как своеобразный процесс "закачки" различного рода дополнительной информации об искомом решении на соответствующих этапах автоматизированного интерпретационного процесса.

Ниже приводится один из вариантов его реализации с помощью алгоритма стабилизации решений. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 1.

В качестве исходных данных на начальном этапе, помимо результатов полевых наблюдений - кривых зондирования и точности полевой съемки (δ_0), предполагается использование геологических данных (результатов бурения скважин) и сведений о максимально возможной для данных условий степени изменчивости (градиента G)

глубины залегания границ, а также количества вариантов (M) статистически генерируемых кривых зондирования для оценки параметров слоев и пределов их эквивалентности.

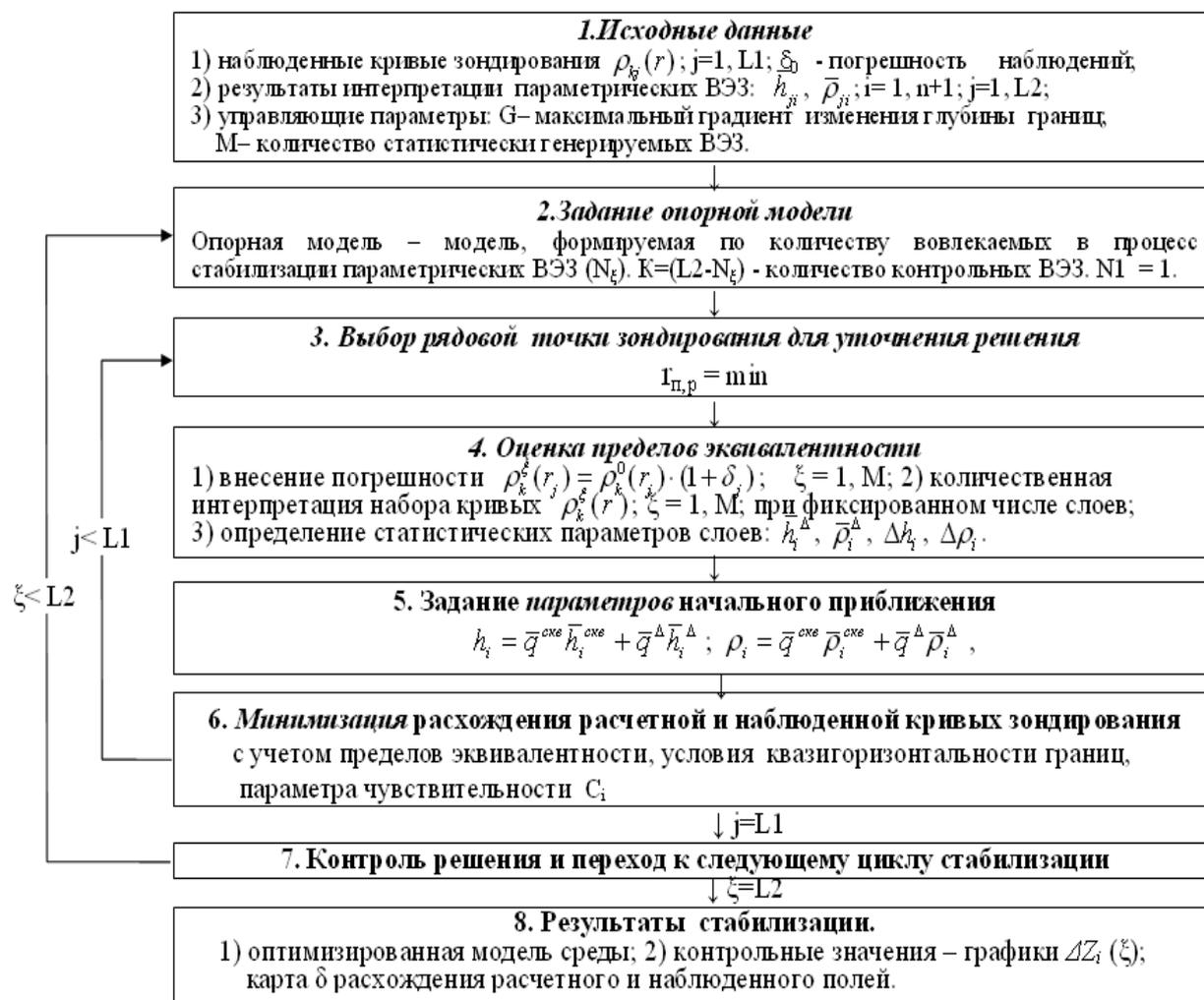


Рис.1. Блок-схема алгоритма стабилизации решения

Выполняемое на данном этапе согласование решения с параметрическими данными - один из наиболее ответственных этапов, так как связан с увязкой физической модели с реальным геологическим разрезом, включая выбор оптимального числа обобщенных геоэлектрических слоев, литологическую и стратиграфическую их привязку, выявление опорного горизонта и др., т.е. приведение априорной геологической информации в соответствие с геоэлектрической моделью исследуемой среды в рамках информационных возможностей метода.

Для реализации данного процесса создана специальная программа анализа параметрических зондирований (рис.2), которая позволяет на основе численного моделирования и визуального контроля подобрать решение в рамках δ -эквивалентности, отвечающее как информативности метода, так и наибольшей его согласованности с геологическим разрезом. При наличии данных бурения по нескольким скважинам в результате такого анализа получается соответствующая совокупность опорных параметрических решений, являющаяся основой для формирования опорной геоэлектрической модели.

При отсутствии параметрического материала в качестве опорных зондирований может быть использована совокупность зондирований, формируемых с помощью

отмеченной выше программы по результатам предварительной формальной интерпретации электрических зондирований, выбираемых автоматически по совокупности оценочных параметров (наилучшей сходимости расчетной и наблюдаемой кривых ВЭЗ, степени согласованности решений и др.).

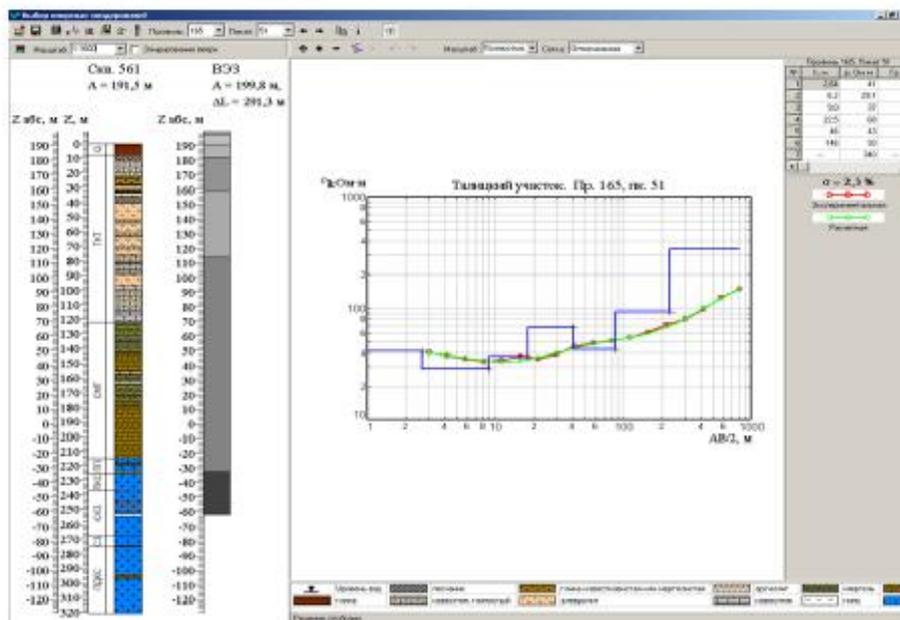


Рис.5. Пример визуализации результатов интерактивного анализа параметрического зондирования

Последующие 2-7 блоки алгоритма отображают автоматизированный процесс согласованной интерпретации совокупности зондирований с постепенным вовлечением опорных параметрических зондирований (формированием опорной модели).

На первом этапе из заданной совокупности параметрических ВЭЗ выбирается одна, принимаемая за опорную, остальные - используются в качестве контрольных. Процесс стабилизации решений начинается с выбора ближайшей к опорной рядовой точки зондирования. Для данной точки с помощью статистического моделирования выполняется оценка вероятностных значений и пределов эквивалентности параметров каждого i -го слоя. Данная процедура включает следующие операции:

1) получение репрезентативной выборки вариантов кривой зондирования в рамках заданной погрешности δ_0 путем внесения погрешности в анализируемую кривую зондирования $r_k^0(r_j)$:

$$r_k^x(r_j) = r_k^0(r_j) \cdot (1 + d_j), \quad (7)$$

где $d_j = \frac{D_j}{K}$; $K = \frac{D_{cp}}{d_0}$; $D_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |D_j|$; D_i - случайные числа, генерируемые с помощью датчика случайных чисел; $j=1, N$; N - число разносов; δ_0 - средняя относительная погрешность функции $r_k(r)$, равная погрешности полевых наблюдений; $\xi = 1, M$;

2) количественная интерпретация набора сгенерированных кривых $r_k^x(r)$, $\xi = 1, M$, выполняемая при фиксированном числе слоев n , соответствующем числу слоев, полученных в результате анализа параметрических зондирований;

3) статистический анализ полученных решений и определение вероятностных значений параметров слоев:

$$\bar{h}_i^\Delta = \sqrt{\prod_{x=1}^L \bar{h}_{i,x}}, \quad \bar{r}_i^\Delta = \sqrt{\prod_{x=1}^L \bar{r}_{i,x}}; \quad L - \text{количество параметров, для которых частота}$$

$$h_i > h_0;$$

$$\Delta h_i = \bar{h}_{\max} - (\bar{h}_{\max} \cdot \bar{h}_{\min})^{1/2}; \quad \Delta r_i = \bar{r}_{\max} - (\bar{r}_{\max} \cdot \bar{r}_{\min})^{1/2}.$$

Графический пример статистического моделирования при заданной погрешности $\delta_0 = 5\%$ и числе генерируемых кривых зондирования $M=100$ приведен на рис. 3.

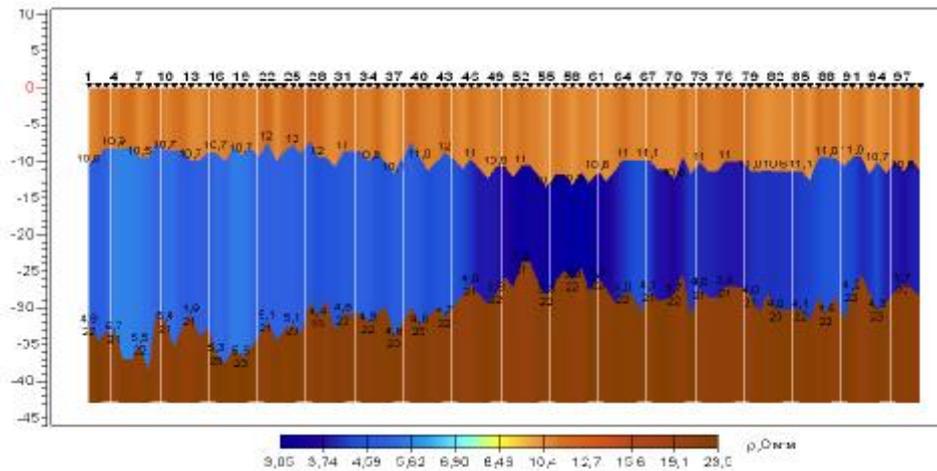


Рис.3. Пример статистического моделирования при погрешности наблюдений $\delta_0 = 5\%$ и количестве вариантов решения $M=100$

На основе полученных оценочных статистических параметров слоев, результатов анализа параметрических зондирований и степени их весомости формируются начальные приближения h_i, ρ_i , необходимые для поиска решения в процессе минимизации расхождения расчетной и наблюдаемой кривых зондирования:

$$h_i = \bar{q}^{ck6} \bar{h}_i^{ck6} + \bar{q}^\Delta \bar{h}_i^\Delta;$$

$$r_i = \bar{q}^{ck6} \bar{r}_i^{ck6} + \bar{q}^\Delta \bar{r}_i^\Delta,$$

где

а) $\bar{h}_i^{ck6}, \bar{r}_i^{ck6}$ - средние весовые значения мощности и сопротивления i -го слоя ($i=1, n$; n – число слоев), вычисленные по совокупности параметрических ВЭЗ: $\bar{h}_i^{ck6} = \sum_{x=1}^N q_x h_{i,x}^{ck6}$;

$\bar{r}_i^{ck6} = \sum_{x=1}^N q_x r_{i,x}^{ck6}$; $\xi = 1, N$; N – количество параметрических ВЭЗ;

б) $\bar{q}^{ck6}, \bar{q}^\Delta$ - весовые коэффициенты, учитывающие расстояние и погрешность интерпретации наблюдений опорной $d_{on.m}$ и исправляемой d_x точек зондирования:

$$\bar{q}^{ck6} = \frac{\bar{q}^{ck6}}{\bar{q}^{ck6} + \bar{q}^\Delta}; \quad \bar{q}^{ck6} = \frac{d_0 r_{\min}}{d_{on.m} r}; \quad \bar{q}^\Delta = \frac{\bar{q}^\Delta}{\bar{q}^{ck6} + \bar{q}^\Delta}; \quad \bar{q}^\Delta = \frac{d_0 r}{d_{исп.m} r_{\max}};$$

$$\frac{d_0}{d_{on.m}} = \sum_{x=1}^N q_x \frac{d_0}{d_{on.m,x}}; \quad r = \frac{1}{\sum_{x=1}^N \frac{q_x}{r_x}}; \quad \text{где } q_x = \frac{d_0 r_{\min}}{d_x r_x}$$

$d_{оп.м}$, $d_{испр.м}$ - погрешности интерпретации опорной и исправляемой точек зондирования; r_x – расстояние между выбранной рядовой до ξ -й опорной точками зондирования; r_{min} , r_{max} - минимальное и максимальное расстояния между точками ВЭЗ и скважинами для данной площади;

в) \bar{h}_i^Δ , \bar{r}_i^Δ - значения мощности и сопротивления i -го слоя по результатам статистического моделирования для выбранной точки ВЭЗ (см. п. 4).

Процесс минимизации, осуществляемый с использованием метода Ньютона (наискорейшего спуска), выполняется с учетом условия квазигоризонтальности границ (4) и заданного предела чувствительности кривой $\rho_k(r)$ к изменению сопротивления каждого слоя (5) в рамках вероятностных пределов эквивалентности Δh_{max} .

Если получаемое в результате минимизации решение отвечает условиям его достоверности: ($\delta \leq \delta_0$; $h_i \geq h_{i-1}$; $C_i > C_0$; $|\Delta Z_i| < \Delta Z_0$), то данная точка ВЭЗ используется в качестве опорной, при анализе последующих рядовых точек зондирования.

После завершения интерпретации всех L1 зондирований осуществляется сглаживание границ разреза в рамках δ -эквивалентности путем минимизации функционала (3) при условии (6).

Полученное на данном этапе решение при использованной для стабилизации одной опорной параметрической точки зондирования в целях оценки его точности сравнивается с данными анализа параметрических зондирований, не использованных в процессе стабилизации (контрольных параметрических ВЭЗ) (рис.4).

Параметрическая точка с наибольшим расхождением решений, указывающим на наибольшую потребность в априорных данных на данном участке, переводится в разряд опорных и интерпретации анализируемого массива кривых ВЭЗ повторяется с использованием для стабилизации решений уже двух параметрических зондирований. Данный процесс повторяется до тех пор, пока не будут исчерпаны все L2 параметрических точек зондирования. Получаемая при этом информация, отображающая динамику изменения величины расхождения количественных параметров в параметрических точках при соответствующей величине расхождения расчетного и наблюдаемого полей (рис.4), косвенно свидетельствуют о точности и достоверности решений в рядовых точках зондирования в пределах исследуемой территории.

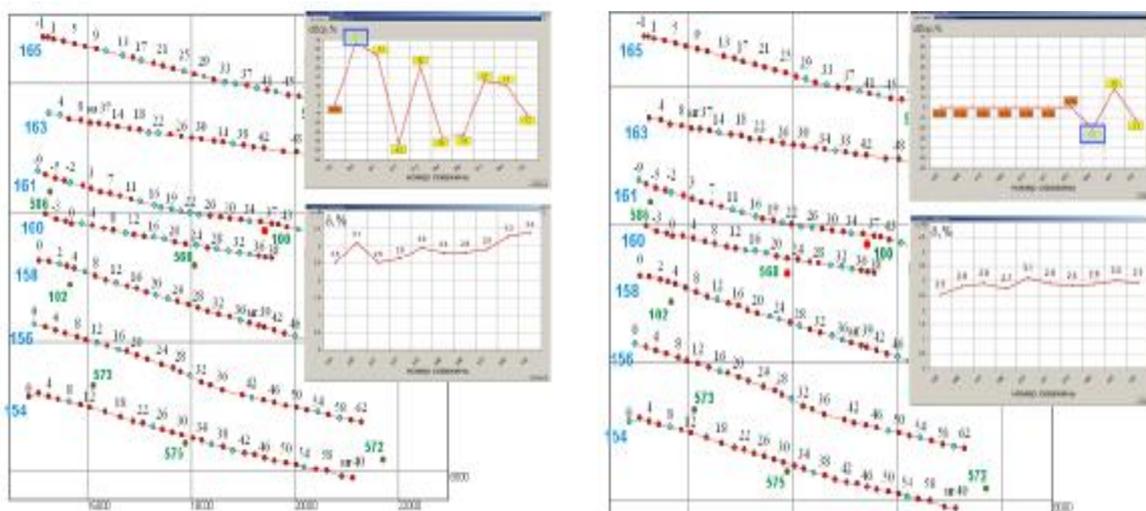


Рис.4. Фрагменты промежуточных этапов процесса стабилизации решений с контролем расхождения стабилизированных и контрольных решений Z_{cp} в параметрических точках, а также точности совпадения расчетных и наблюдаемых кривых зондирования δ

В качестве отладочного инструмента по развитию автоматической интерпретации предусмотрен вариант просмотра и, при необходимости, корректировки формируемой модели в режиме "рабочая модель" (рис. 5).

Как показала практика работ по мере отладки и совершенствования алгоритма стабилизации необходимость в интерактивном режиме ("рабочая модель") постепенно снижается, достигая к настоящему времени не более 10-15 %.

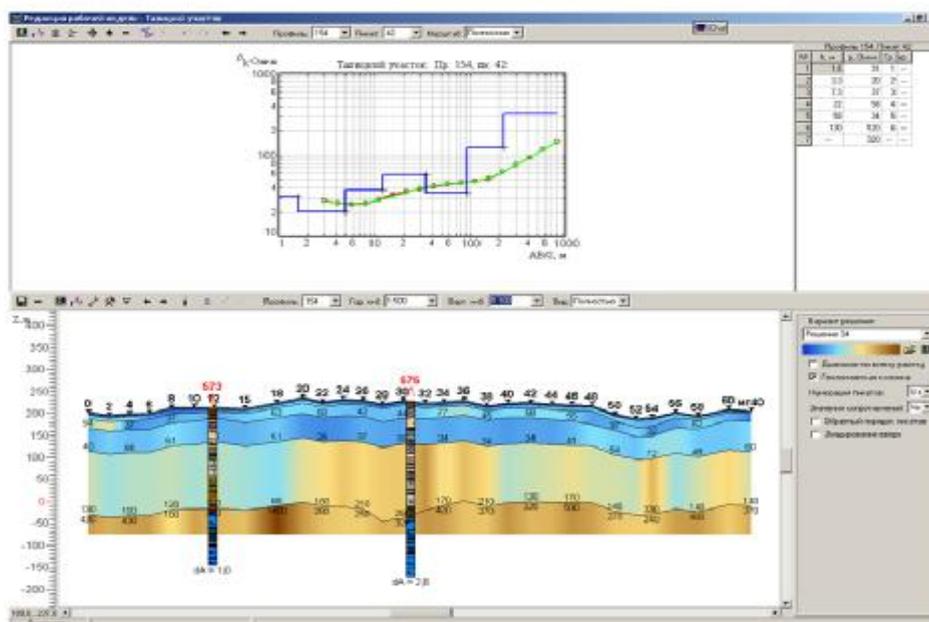


Рис.5. Фрагмент интерактивной интерпретации в режиме "рабочая модель"

Одной из задач дальнейшего повышения информативности получаемых решений является полная автоматизация данного процесса с выбором оптимального решения на основе перебора всех возможных вариантов задания управляющих параметров и опорных параметрических решений, формализуя тем самым опыт и элементы интеллекта интерпретатора, полная реализация которых в рамках обычной используемой интерактивной интерпретации практически невозможна.

Библиографический список

1. Колесников В.П. Основы интерпретации электрических зондирований.— М: Научный мир, 2007.— 248 с.
2. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1974. 223 с.

ABOUT INCREASE OF UNAMBIGUITY OF INTERPRETATION ELECTRIC SOUNDING

V.P.Kolesnikov

Perm State University, 614990, Perm, Bukireva st., 15

E-mail: poisk@psu.ru

A new method is proposed to improve the uniqueness of the automatic interpretation of the vertical electric sounding (VES) data, which is based on the use of combination of regularizing elements, involved in the interpretive process in its basic stages. Are given for

extending the inverse problem, the general scheme of constructing the algorithm and methods for its implementation.

Key words: *vertical electric sounding, computer interpretation, regularization, technology.*