

Метод решения обратной задачи электрометрии скважин

© Н. Л. Миронцов, 2012

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 2 апреля 2012 г.

Представлено членом редколлегии В. Н. Шуманом

Запропоновано метод розв'язку оберненої задачі каротажного зондування, який ґрунтується на можливості враховувати кількісний зв'язок між похибкою виміру та похибкою інверсії. Проаналізована можливість ефективно враховувати похибку існуючих методів розв'язку обернених задач електрометрії. Оцінена ефективність використання під час інтерпретації таблиці, яка пов'язує параметри моделі пласта з даними вимірювань. Наведено приклади порівняння результатів, які отримано запропонованим методом і методом, який застосовують на реальному свердловинному матеріалі. Показано, що запропонований метод дає змогу виділяти пласти з проникненням без використання додаткової інформації про колекторні властивості розрізу.

A method of solving inverse problem of logging sounding has been proposed based on the possibility to take into account quantitative connection between a measurement inaccuracy and inversion inaccuracy. A possibility has been analyzed of taking into account an inaccuracy of existing methods of solving inverse problems of electrologging effectively. Efficiency of applying the table connecting the layer model parameters with the data of measurements in course of interpretation has been estimated. Examples of comparing results obtained by the method proposed and the other one used now on the real borehole material have been given. It has been shown that a method proposed makes possible to distinguish the layers with penetration and without applying additional information on collector properties of their section.

Введение. Результатом любого измерения можно считать только сочетание значения экспериментально полученной величины с величиной погрешности ее измерения [Измерение, 1984]. Каротаж, с точки зрения количественной интерпретации, является процессом косвенного измерения [Сохранов, Аксельрод, 1984], так как искомые величины рассчитываются по измеренным. Для получения значений всех требуемых геоэлектрических параметров разреза необходимо использовать комплекс нескольких зондов.

Погрешность определения искомого геоэлектрических параметров разреза определяется особенностями метода инверсии (решение обратной задачи) и погрешностью данных каротажа (погрешность в начальных данных обратной задачи).

Развитие численных методов и вычислительной техники позволяет утверждать, что в идеальных условиях при отсутствии погрешности измерения погрешность решения обратной задачи в области существования и единственности — пренебрежимо малая величина. Другими словами, решение обратной задачи есть взаимно однозначное отображение одного вектора из пространства данных измерения в

вектор пространства геоэлектрических параметров, количественные характеристики которого всегда можно найти численно с пренебрежимо малой погрешностью, вызванной неидеальностью самой вычислительной техники (погрешность, связанная с округлением цифр и т. п.). Естественно, что такое утверждение справедливо только в случае, если количество измеряемых величин (известных) больше или равно количеству искомым параметров модели (неизвестных) и задача не является вырожденной (данные измерения линейно независимы).

Для нахождения зависимости погрешности определения искомого геоэлектрических параметров разреза от погрешности данных каротажа в реальных условиях необходимо рассматривать решение обратной задачи уже как отображение некоторой области из пространства данных измерения в некоторую область пространства геоэлектрических параметров.

Именно поэтому характеристики такого отображения принято называть пространственными. На рис. 1 представлен пример определения удельного электрического сопротивления ($UЭС$) зоны пласта ($\rho_{ц}$), незатронутой буровым раствором, по кажущемуся сопротив-

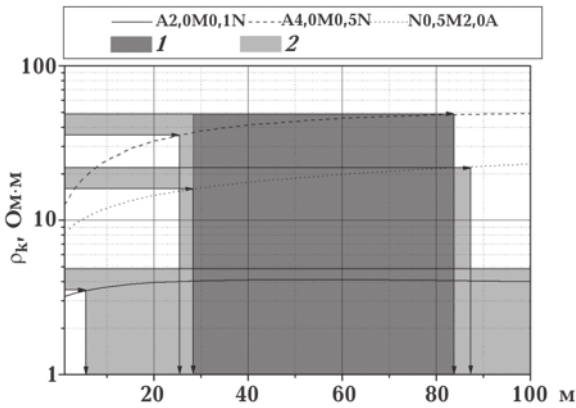


Рис. 1. Пример определения пересечения интервалов допустимых значений УЭС зоны, незатронутой проникновением бурового раствора, для различных зондов: 1 — зона пересечения; 2 — области допустимых значений для зондов по отдельности (значения ρ_3 и D считаем заданными и известными).

лению (ρ_k) при известных остальных параметрах (ρ_3 — УЭС зоны проникновения и D — ее диаметр). В качестве метода были выбраны три зонда бокового каротажного зондирования (БКЗ). Очевидно, что одной и той же погрешности измерения соответствуют различные погрешности определения искомого параметра. Более того, $\rho_{п}$, например, не может быть равно 20 или 90 Ом·м, так как эти значения не соответствуют всем трем зондам. Соответственно $\rho_{п}$ может находиться только в пересечении трех интервалов. Несмотря на простоту изложенного примера, такой подход не используется на практике и заменяется более приближенным.

На практике вопрос погрешности решения обратной задачи, обусловленной погрешностью самого каротажа, в большинстве случаев не исследуется. Так, формально задача ставится в виде минимизации функционала [Кнеллер, Потапов, 1989; 1990; Потапов, Кнеллер, 1990]:

$$F(\rho_1^T, \dots, \rho_n^T) = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\rho_i^T - \rho_i^P}{\rho_i^T} \right)^2}, \quad (1)$$

где n — количество зондов аппаратуры, ρ_i^T — рассчитанные значения ρ_k для рассматриваемой модели, ρ_i^P — фактически полученные ρ_k , или в виде минимизации функционала [Глинских, Эпов, 2006]:

$$F(\rho_1^T, \dots, \rho_n^T) = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\rho_i^T - \rho_i^P}{\delta_i \rho_i^T} \right)^2}, \quad (2)$$

где δ_i — относительная погрешность i -го зонда.

В некоторых случаях [Phasor ..., 1989; Кнеллер, Потапов, 2010] минимизируют функционал

$$F(\rho_1^T, \dots, \rho_n^T) = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\rho_i^T - \rho_i^P}{\delta_i \rho_i^T + \chi_i} \right)^2}, \quad (3)$$

где δ_i — относительная погрешность i -го зонда; χ_i — абсолютная погрешность i -го зонда.

Соответственно решением обратной задачи станут те значения параметров модели, для которых величины измерений соответствуют минимуму функционала (1) (или (2), или (3)). Заметим, что в случае, когда данные измерения заданы с погрешностью, решение обратной задачи также будет получено с погрешностью (в виде области допустимых значений). Однако решение обратной задачи, основанное на минимизации (1) (или (2), или (3)), позволяет найти конкретные значения УЭС, но не предопределяет величину погрешности (доверительный интервал) для этого значения.

Что касается заданной величины допустимой погрешности, то ее можно задавать, исходя из метрологических требований. Так, для БКЗ в процентах это будет [Техническая ..., 2002]

$$\varepsilon_{\text{БКЗ}} = \pm \left(2,0 + 0,004 \left(\frac{5000}{R} - 1 \right) \right),$$

для ИК в мСм/м

$$\varepsilon_{\text{ИК}} = 0,03R \pm 1,$$

где R — фактическое значение измерения. Погрешность БК составляет 5 %.

Метод. Рассмотрим нормированное пространство P параметров \vec{p} изучаемых объектов и пространство G возможных значений измерения зондирующей аппаратуры \vec{g} . Чтобы задача имела решение, количество независимых измерений должно быть больше или равно количеству искомого параметра модели. Существует однозначное отображение: $P \rightarrow G$ (обозначим соответствующую функцию отображения G). Рассмотрим особенности обратного отображения $G \rightarrow P$ (обозначим соответствующую функцию G^{-1}), которое в случае отображения одного элемента считаем однозначным. Если объект отображения не один элемент \vec{g} , а область $\vec{g} + \delta\vec{g}$, где $\delta\vec{g}$ принимает всевозможные значения в пределах допустимой погрешности, то образом этого отображения также будет некая область. Рассмотрим такое отображение: $\vec{p} + \delta\vec{p} = G^{-1}(\vec{g} + \delta\vec{g})$. Заметим,

что, поскольку обратная задача является нелинейной, величина $\delta\bar{p}$ зависит и от самой модели, и от погрешности измерения: $\delta\bar{p} = \delta\bar{p}(\bar{p}, \delta\bar{g})$. Погрешность измерения в общем случае также зависит от модели среды: $\delta\bar{g} = \delta\bar{g}(\bar{p})$ (в частности, это объясняется тем, что погрешность любого измерительного устройства неодинакова во всем рабочем диапазоне). Такая сложная зависимость не позволяет ввести общую простую характеристику пространственного разрешения конкретной аппаратуры не только для всего диапазона параметров всех возможных актуальных моделей разрезов, но даже для совокупности нескольких отдельных моделей, и необходимо требует изучения количественной зависимости $\bar{p} + \delta\bar{p} = G^{-1}(\bar{g} + \delta\bar{g})$ отдельно для каждой модели (различных $\bar{g} + \delta\bar{g}$). Таким образом, говорить о характеристиках пространственного разрешения конкретной аппаратуры можно только для конкретной модели разреза: даже при незначительном изменении параметров модели характеристики могут значительно измениться.

Возвращаясь к примеру, представленному на рис. 1, но уже используя введенные обозначения, достаточно просто заметить, что истинное решение будет лежать в интервале

$$\delta\bar{p} = \bigcap_{i=1}^n \delta p_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (4)$$

Можно утверждать, что без использования априорной информации более точного значения получить невозможно, т. е. при наличии погрешности каротажа *решение обратной задачи не может быть представлено численными значениями искомых параметров, а только соответствующими допустимыми интервалами*. Более того, такой поход к поиску решения позволяет значительно уменьшить его погрешность. Для этого оказывается достаточно количественно учесть связь между погрешностью каротажа и погрешностью решения обратной задачи.

Соответствующий алгоритм может быть реализован следующим образом. На первом этапе можно рассчитать таблицу (аналогичную таблице [Красножон та ін., 2009]) значений данных каротажа для различных значений параметров модели (в билогарифмическом или любом другом масштабе, обеспечивающем наивысшую точность). На следующем этапе, в отличие от алгоритма [Красножон та ін., 2009] и ему подобных, мы не будем искать наиболее вероятное значение одного из функционалов (1), (2) или

(3). Напротив, выберем из таблицы отдельно для каждого зонда те значения \bar{p} параметров, модели, которые соответствуют показаниям этого зонда $\delta_i \rho_i^p - \chi_i \leq \rho_i^T \leq \delta_i \rho_i^p + \chi_i$. После чего найдем пересечение областей допустимых параметров, полученных так для каждого зонда.

Заметим, что использование такой таблицы при вычислении данных каротажа в зависимости от трех параметров модели (трехслойная модель), каждый из которых имеет 1000 возможных значений, потребует 10^9 решений прямой задачи и хранения результатов такого решения в $8 \cdot 10^{10}$ байт информации (для семи-зондовой аппаратуры, учитывая, что каждое значение хранится в переменной типа double (8 байт)). При построении четырехслойной модели (пять параметров) получим $2,4 \cdot 10^{16}$ байт информации (при 10^{15} решениях прямой задачи).

Конечно, для 1000 значений одного параметра — это более чем достаточно, но и масштаб расчета становится понятен: при времени решения прямой задачи, равном 3 с, общее время построения такой таблицы займет 97 лет (и это только для трехслойной модели).

Кроме того, заметим, что предлагаемый билогарифмический масштаб [Красножон та ін., 2009] не является наиболее рациональным с точки зрения решаемой задачи. Действительно, при построении такой таблицы для нас важна постоянная относительная погрешность. Другими словами, искомый параметр должен изменяться таким образом, чтобы разница между соседними значениями соответствовала постоянной относительной погрешности. Такую последовательность легко построить с помощью геометрической прогрессии: $x_n = x_1(1 + \Delta)^n$, где Δ — относительная погрешность, x_1 — наименьшее значение диапазона.

Для построения диапазона с наименьшим значением 0,01 Ом·м и $\Delta=0,01$ (1 %) необходимо 695 значений (диапазон 0,01—10 Ом·м); 925 значений (диапазон 0,01—100 Ом·м); 1157 значений (диапазон 0,01—1000 Ом·м). Как видно, даже 1000 значений параметра при точности 1 % на диапазоне 0,01—1000 Ом·м (рабочий диапазон малых зондов БКЗ) недостаточно.

Заметим, что предлагаемый алгоритм вообще может не содержать такой таблицы или содержать ее для 5—10 значений изменения каждого параметра модели. Используя быстрые методы решения прямой задачи, например [Миرونцов, 2007а; б], можно в режиме реального времени достраивать такую таблицу в нужных местах (метод уточнения значений изменения параметров модели по методу наи-

скорейшего спуска — решение обратной задачи в режиме реального времени).

Такой метод можно описать и формально. Минимизируем

$$F(\rho_1^T, \dots, \rho_n^T) = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\rho_i^T - \rho_i^P}{\lambda_i \rho_i^T} \right)^2}, \quad (5)$$

где $\lambda_i, i = \overline{1, n}$ — погрешности инверсии при заданных погрешностях измерения $\delta_i^P, i = \overline{1, n}$ и $\chi_i^P, i = \overline{1, n}$. Именно вопрос выбора λ_i определяет суть предложенного метода.

Для такого выбора необходимо выбрать норму в пространстве G . Естественно, что такой выбор не может быть сделан объективно без учета специфики решаемой задачи оперативной интерпретации (в некоторых случаях для последующей комплексной интерпретации точность определения некоторых параметров носит более высокий приоритет, чем точность определения других). Однако эмпирическим путем для задач определения параметров модели с равновеликой относительной погрешностью был выбран следующий способ задания величин λ_i : λ_i — это объем минимального m -мерного параллелепипеда в m -мерном пространстве (m — количество параметров модели), в который может полностью поместиться область $\bar{g} + \delta \bar{g}$, соответствующая всем возможным значениям $\delta_i \rho_i^T + \chi_i$. Для одномерного случая это как раз и будет длина допустимого интервала значений параметра (см. рис. 1).

Рассмотрим случай, когда области допустимых значений искомым параметров не имеют пересечения. Возможно два варианта.

1. Один или несколько зондов имеют фактическую погрешность измерения, больше установленной в калибровке или заявленной в паспорте (а возможно, они просто вышли из строя). В этом случае необходимо провести переинтерпретацию, последовательно исключая один или несколько зондов из комплекса с последующей обязательной лабораторной проверкой работоспособности комплекса.

2. Выбранная модель инверсии неадекватно описывает данный пласт (или не полностью учтено влияние вмещающих при использовании 1D модели пласта). В этом случае необходимо изменить тип модели и также провести переинтерпретацию.

Заметим, что при тестировании алгоритма такого решения обратной задачи возникали обе ситуации. В первом случае выявленная при интерпретации неисправность зонда была под-

тверждена его последующей проверкой. А на нескольких интервалах, где алгоритм проверки качества БКЗ (по сопоставлению показаний на плотных пластах, «Геопошук») показывал низкое качество, приведенный алгоритм, с учетом допустимой погрешности, показывал удовлетворительное качество записи, что также подтверждалось в последствии повторным каротажем другим комплектом аппаратуры.

Что касается второго варианта, то он в основном возникал на сравнительно новых интервалах, где пласты-коллекторы следует описывать четырехслойной моделью.

Результаты. Сравним диапазоны возможных значений искомым параметров модели с использованием «классического» метода решения обратной задачи (минимизация (3)) и предложенного на конкретном примере эксплуатационной скважины Северополурского месторождения (Западная Сибирь, используемый комплекс: БКЗ — боковой каротаж (БК) — индукционный каротаж (ИК)).

Заметим, что при производимых необходимых численных расчетах учитывались все реальные размеры электродов и катушек, расстояния между ними, размеры кожуха и т.д.

Рассмотрим два варианта решения обратной задачи:

- с использованием априорной информации о расположении пластов-коллекторов (по самопроизвольной поляризации (ПС) и микрозондам);
- без использования априорной информации о расположении пластов-коллекторов.

На рис. 2 представлен интервал разреза, на котором по ПС и микрозондам были выделены пласты-коллекторы, после чего введены соответствующие поправки и для каждого выделенного пласта решена 1D задача предложенным и «классическим» методом.

Оказалось, что интервал допустимых значений для предложенного метода практически всегда меньше, чем для «классического» метода, и почти всегда целиком в нем содержится.

На рис. 3 представлен интервал разреза, на котором все пласты считались пластами-коллекторами, для которых после введения соответствующих поправок для каждого выделенного пласта были рассчитаны параметры $\rho_{п1}, \rho_{п3}, D/d$.

Этот случай представляет интерес с той точки зрения, насколько каждый из методов «чувствителен» к искомым параметрам, и в какой мере он зависит от использования априорной информации.

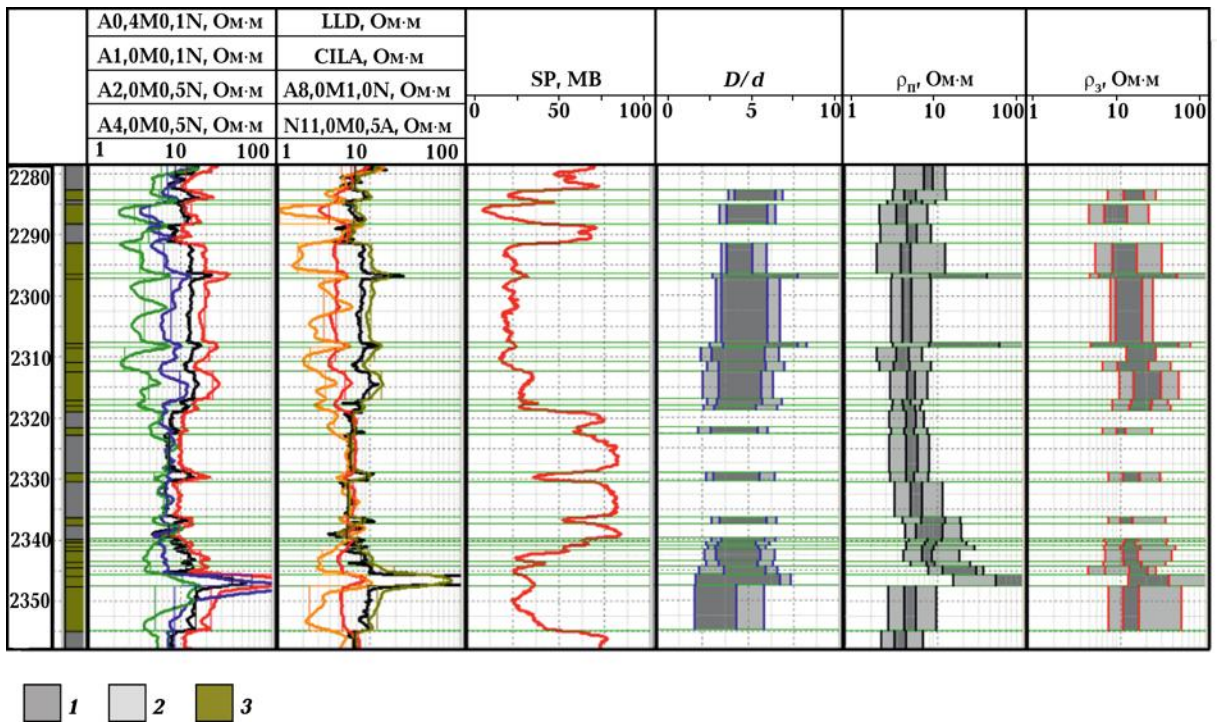


Рис. 2. Пример количественной интерпретации УЭС скважины 0,7 Ом·м: LLD — ρ_k бокового каротажа БК-3; CILA — УЭС индукционного каротажа АИК5; SP — кривая потенциала самопроизвольной поляризации; ρ_{π} , ρ_3 — УЭС пласта и зоны проникновения; D/d — отношение диаметра зоны проникновения к номинальному диаметру скважины; 1 — допустимые значения параметра, полученные предложенным методом; 2 — допустимые значения параметра, полученные «классическим» методом; 3 — обозначение признака пласта-коллектора в столбце свойств пластов.

Очевидно, что без априорной информации результат получается намного точнее, более того, нет необходимости использовать такую априорную информацию, которая также получается с погрешностью. Также необходимо отметить, что без использования априорной информации пласты с проникновением надежно выделяются только по комплексу БКЗ-БК-ИК по признаку $\rho_{\pi}=\rho_3$.

Выводы. Суть эффективности предложенного подхода к решению обратной задачи, по мнению автора, можно объяснить не только особенностями нормирования величин, входящих в уравнение (3), но также и простыми геофизическими соображениями. Действительно, для всего диапазона измерения одна и та же погрешность будет соответствовать различному доверительному интервалу определяемого параметра модели (утверждение было бы неверным, только если связь между измерением и параметром была бы линейной). Более того, для каждого зонда комплекса такая связь сугубо своя (см. рис. 1). Применяя описанный метод, для каждой конкретной модели в большей мере учитываются показания зондов, вносящих меньшую погрешность в

определение искомых параметров, и в меньшей степени — зондов, вносящих большую погрешность.

Рассмотренный метод применим и для более сложных моделей пласта, если каротажная аппаратура предоставляет необходимое количество независимых измерений.

На основании изложенного метода, выполненных расчетов и приведенных примеров можно сделать следующие выводы:

- применяемые в настоящее время на практике методы интерпретации, основанные на минимизации функционалов вида (1), (2) или (3), могут не дать теоретически обоснованный и качественно верный результат;
- при решении обратной задачи необходимо учитывать не только всю совокупность доверительных интервалов измерения, но и ее влияние на доверительные интервалы определяемых параметров модели;
- предложенный метод позволяет повысить эффективность количественной интерпретации.

Автор выражает искреннюю признательность академику РАН Михаилу Ивановичу Эпову за поддержку и внимание к работе.

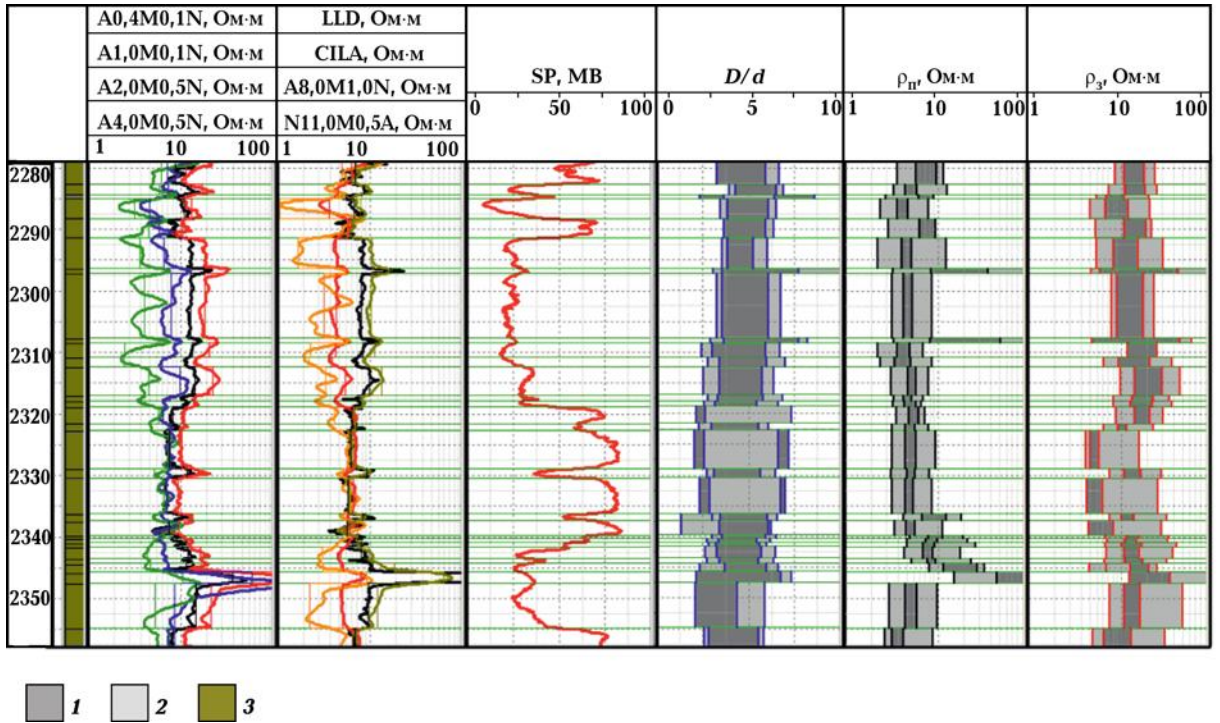


Рис. 3. Пример количественной интер УЭС скважины 0,7 Ом·м. Условные обозначения см. на рис. 2

Работа поддержана грантом Президиума НАН Украины для молодых ученых в 2011 г. и

грантом Президента Украины для молодых ученых (проект GP32/033-2011).

Список литературы

Глинских В. Н., Эпов М. И. Двумерная реконструкция геоэлектрического изображения по данным высокочастотного электромагнитного каротажа // НТВ Каротажник. — 2006. — № 6 (147). — С. 59—68.

Измерение // Физический энциклопедический словарь / Под ред. А. М. Прохорова. — Москва: Сов. энциклопедия, 1984. — С. 208.

Кнеллер Л. Е., Потапов А. П. Определение удельного электрического сопротивления пластов при радиальной и вертикальной неоднородности разреза скважин // Геология и геофизика. — 2010. — № 1. — С. 52—64.

Кнеллер Л. Е., Потапов А. П. Решение прямой и обратной задач индукционного каротажа с учетом вертикальной и радиальной неоднородности геоэлектрического разреза // Изв. ВУЗов. Сер. Геология и разведка. — 1990. — № 9. — С. 95—102.

Кнеллер Л. Е., Потапов А. П. Решение прямой и обратной задач электрокаротажа в радиально-неоднородных средах // Геология и геофизика. — 1989. — № 1. — С. 83—96.

Красножон М., Косаченко В., Ручко В. Технология «Гео-

пошук» для вивчення нафтогазових родовищ // Геолог України. — 2009. — № 1—2. — С. 32—40.

Миронцов М. Л. Метод розв'язання прямої та зворотної задачі електричного каротажу // Доп. НАН України. — 2007а. — № 2. — С. 128—131.

Миронцов М. Л. Метод розв'язання прямої та оберненої задачі індукційного каротажу // Геофиз. журн. — 2007б. — 29, № 5. — С. 212—214.

Потапов А. П., Кнеллер Л. Е. Решение прямой и обратной задач индукционного каротажа для сред с произвольным и дискретным распределением проводимости по глубине // Изв. ВУЗов. Сер. Геология и геофизика. — 1990. — № 9. — С. 122—130.

Сохранов Н. Н., Аксельрод С. М. Обработка и интерпретация с помощью ЭВМ результатов геофизических исследований нефтяных и газовых скважин. — Москва: Недра, 1984. — 255 с.

Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах / Под ред. Р. Т. Хаматдинова. — Москва: ГЕРС, 2002. — 270 с.

Phasor Induction Tool // Schlumberger, Houston, TX., — 1989. — Document SMP—9060.