

## МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ КАРОТАЖНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСОМ БКЗ–БК–ИК

© Н.Л. Миронцов, 2011

*Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина*

Considered in the paper is the traditional method of the inverse solution for the LS, LL, IL complex. Presented in the article are some examples of qualitatively and quantitatively incorrect solution by such method. An alternative way to the inverse solution was proposed. It is shown the proposed method gives qualitatively and quantitatively correct results for the LS, LL, IL complex.

**Keywords:** geoelectrics, geoelectrical inverse problem, characteristics of a spatial resolution, confidential interval.

**Введение.** Задача восстановления геоэлектрических параметров (пространственное положение и свойства электрической проводимости различных объектов) околоскважинного пространства – важная составляющая геофизического исследования скважин, поскольку их определение позволяет рассчитывать необходимые для практики параметры продуктивных пластов (тип флюидонасыщения, тип проникновения, коэффициент флюидонасыщения и др.) [1, 2]. Рассмотрим широко применяемую модель пласта-коллектора, пересеченного вертикальной скважиной [3–5]. Модель такого пласта определяется следующими параметрами: границы пласта; удельное электрическое сопротивление (УЭС) зоны проникновения ( $\rho_3$ ); УЭС зоны, не затронутой проникновением бурового раствора ( $\rho_n$ ); диаметр зоны проникновения.

На практике параметры модели могут определяться независимо различными методами: независимо по отдельным методам или универсальным подходом к определению УЭС. Рассмотрим оба способа.

В качестве иллюстрации первого приведем реальный пример, когда  $\rho_n$  для пласта-коллектора может определяться независимо по боковому каротажному зондированию (БКЗ), боковому (БК) и индукционному каротажу (ИК). В табл. 1 представлены данные попластовой интерпретации в эксплуатационной скважине Днепровско-Донецкой впадины (Андрияшевское месторождение, геологическое заключение). Параметр  $\rho_n$  имеет три разных значения, что существенно для дальнейшего изложения (так как демонстрирует, что на практике широко применяются не только универсальные подходы к определению УЭС). При использовании такого подхода возникает вопрос: какое из трех значений соответствует (или максимально близко)

истинной величине в условиях данной модели и какое из них следует использовать для дальнейшей интерпретации?

Ответ может дать универсальный подход к определению УЭС. Например, в теоретически разработанных [6, 7] и применяемых на практике методах [8, 9] все параметры пласта определяются вполне однозначно (вопросы параметрической эквивалентности не затрагиваем). В этих методах нахождение параметров модели осуществляется подбором параметров модели, наиболее соответствующих данным каротажа. Формально задача ставится в виде минимизации функционала:

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

где  $n$  – количество зондов аппаратуры;  $\rho_i^T$  – рассчитанные значения кажущегося сопротивления (КС) для рассматриваемой модели;  $\rho_i^P$  – фактически полученные КС;  $\delta_i$  – величина погрешности  $i$ -го зонда (в ряде работ решение основано на предположении, что  $\forall i: \delta_i \equiv 1$  [5, 6, 8], т. е. для любого значения  $i$ ).

Соответственно, решением обратной задачи станут те значения параметров модели, для которых данные измерений соответствуют минимуму функционала (1). Заметим, что в случае, если эти данные заданы с погрешностью, решение обратной задачи также будет приближенным. Однако решение обратной задачи, основанное на минимизации (1), позволяет найти значения УЭС, но не определяет величину погрешности измерения.

По нашему мнению, описанный подход также некорректен, потому что решением обратной задачи при наличии погрешности измерения следует считать не найденное значение, а доверительный интервал [10].

Таблица 1. Определение УЭС пласта-коллектора ( $\rho_{\Pi}$ ) в эксплуатационной скважине, Ом·м

Метод	Данные геологической службы	Доверительный интервал, по данным автора
БКЗ	64	29,4–83,8
БК	30	25,5–39,4
ИК	23	17,3–31,0

Примечание. Горизонт В-21в; интервал глубин 4800–4804; диаметр скважины 0,21 м; диаметр зоны 3,2 м; УЭС раствора 0,024 Ом·м;  $\rho_3 = 30$  Ом·м.

Рассмотрим второй метод, позволяющий более точно интерпретировать данные каротажного зондирования и основанный на возможности учета влияния погрешности измерения каждым зондом на погрешность определения параметров модели.

**Метод.** Идея метода заключается в том, чтобы учитывать при минимизации функционала не погрешность измерения зондом, а величину погрешности инверсии, к которой она приводит. Другими словами, при расчете функционала (1) следует нормировать разницу между теоретическим и экспериментальным значениями не на погрешность измерения зонда, а на соответствующую этой погрешности измерения погрешность определения параметра инверсии.

Рассмотрим вместо (1) функционал

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

где  $\lambda_i$  – величина, характеризующая относительную меру “вклада” погрешности  $i$ -го измерения в значение доверительного интервала решения обратной задачи и определяемая из условия

$$\inf_{\lambda_1, \dots, \lambda_n} (\|\delta \mathbf{p}(\delta \mathbf{g})\|). \quad (3)$$

Норму в (3) следует задать соответственно норме, выбранной для функционалов (1), (2). Такой подход позволит существенно повысить точность инверсии. Для иллюстрации метода приведем конкретный пример.

Сделаем замечание относительно способа задания погрешности  $\delta \mathbf{g}$ . Величину случайной погрешности можно задать по-разному. С практической точки зрения можно ограничиться двумя подходами ее задания.

1. Отдельно для каждого зонда

$$\delta \rho_i < \varepsilon_i(\rho_i), \quad i = \overline{1, n}, \quad (4)$$

где  $n$  – количество зондов;  $\rho_i$  – кажущееся сопротивление  $i$ -го зонда;  $\delta \rho_i$  – погрешность измерения сопротивления  $i$ -м зондом;  $\varepsilon_i(\rho_i)$  – заданные величины допустимой погрешности каждого зонда.

2. Для всего комплекса одновременно, например, следующим образом:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\delta \rho_i}{\rho_i} \right)^2} < \varepsilon, \quad (5)$$

где  $\varepsilon$  – величина заданной погрешности.

Различие в этих двух способах очевидно. При использовании первого способа задания погрешности (3) область  $\delta \mathbf{p}$  будет:

$$\delta \mathbf{p} = \bigcap_{i=1}^n \delta \rho_i, \quad i = \overline{1, n}.$$

При использовании второго способа погрешность будет неким “средним” по всем зондам, которое соответствует среднеквадратичному отклонению (5).

Очевидно, что первый тип отвечает лучшей точности определения параметров модели, но погрешность определения некоторых параметров модели может оказаться независимой от заданной погрешности одного или нескольких зондов. Это, в частности, означает, что при выходе из строя одного из зондов точность результата по всему комплексу может не измениться. Данный факт несколько противоречит, по нашему мнению, используемой в статье концепции применения многозондовых систем и отражает излишне идеализированный подход. Мы использовали второй способ задания погрешности. Однако применение первого способа принципиально не изменит алгоритм расчета.

**Результаты и анализ.** Результаты приведем для стандартного комплекса БКЗ–БК–ИК.

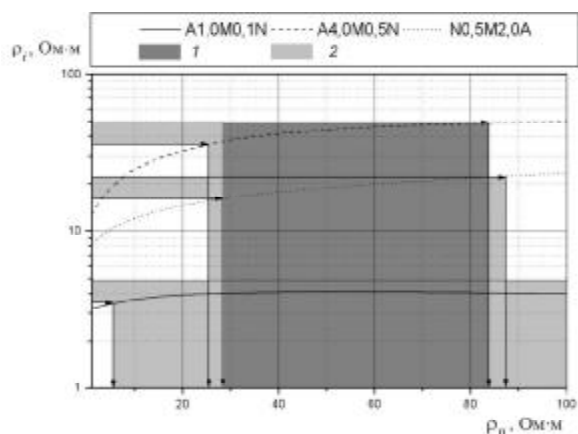
Рассмотрим сначала пример определения УЭС по данным БКЗ, БК, ИК отдельно, а затем сравним результат универсального подхода к определению УЭС с результатом, полученным описанным методом.

Погрешность измерения будем считать заданной согласно допустимым нормам. Для БКЗ в процентах это будет:

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

для ИК, в мСм/м:

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



Пример определения пересечения интервалов допустимых значений УЭС зоны, не затронутой проникновением бурового раствора для различных зондов: 1 – зона пересечения; 2 – области допустимых значений для зондов по отдельности

где  $R$  – фактическое значение измерения. Погрешность БК составляет 5 % [11]. Также необходимо использовать данные метрологических испытаний каждого конкретного комплекта аппаратуры и, возможно, учитывать в некоторых случаях допустимую погрешность каротажа в 20 % [11].

Как отмечено выше, в табл. 1 параметр  $\rho_{п}$  представлен тремя различными значениями. Соответственно, искомое значение  $\rho_{п}$  получить по такому заключению невозможно.

Используем для каждого зонда в качестве начальных данных не точечное значение измерения, а доверительный интервал, соответствующий его погрешности. На рисунке показан пример такого определения. Для трех различных зондов находим пересечение допустимых интервалов, в результате чего получаем искомый интервал для определяемого параметра.

Использование такого подхода для каждого из методов позволило найти допустимые интервалы для параметра  $\rho_{п}$  (табл. 1, интервалы для каждого из зондов соответствуют допустимой погрешности измерения). Другими словами, считая заданными параметры зоны, для каждого метода находили не соответствующее его измерению  $\rho_{п}$ , а возможный интервал допустимых значений  $\rho_{п}$ , который соответствуют допустимому интервалу для этого измерения. Очевидно, что такой результат интерпретации данных каротажа БКЗ–БК–

Таблица 2. Параметры пластов

Тип пласта	$\rho_{п}$ , Ом·м	$\rho_{з}$ , Ом·м	$D/d$
1 – нефтеносный	8,5	30	0,4
2 – газоносный	50	30	0,5
3 – водоносный	4,5	20	0,5

ИК становится осмысленным и обоснованным: интервалы по каждому из методов имеют пересечение и, соответственно, искомое  $\rho_{п}$  лежит в интервале 29,4–31,0 Ом·м. Аналогичная переинтерпретация данных БКЗ–БК–ИК была проведена для 43 производственных скважин (217 продуктивных пластов). Полученные результаты согласуются с результатами других методов геофизического исследования скважин (высокочастотное индукционное каротажное изопараметрическое зондирование [3], многозондовый ИК [12], многозондовый электрический каротаж МЭК–М [9]) в более высокой степени, чем данные интерпретации, используемые ранее.

Аналогичное сравнение приведем для универсального подхода определения УЭС и предложенного для моделей пластов терригенного разреза в условиях Западной Сибири [9, 10]. Параметры пластов приведены в табл. 2. Величина погрешности каждого зонда комплекса задавалась соответственно результатам метрологических испытаний. В табл. 3 приведены результаты решения обратной задачи с использованием минимизации. Рисунок иллюстрирует геофизический смысл предлагаемого метода. Действительно, допустимый интервал значения искомого параметра зонда A1,0M0,1N намного превышает интервалы допустимых значений для других зондов. Соответственно, если учитывать данные измерения зондов в равной мере, погрешность будет больше, чем в случае, если учитывать данные зондов обратно пропорционально к величине допустимого интервала (фактически – к величине погрешности определения искомого параметра по данным измерения конкретного зонда).

Очевидно, что точность предложенного метода более высокая, чем точность метода решения обратной задачи, основанного на минимизации функционала (1). Подобные расчеты были прове-

Таблица 3. Сравнение результатов решения обратной задачи двумя методами для аппаратуры БКЗ–БК–ИК

Тип пласта	I			II		
	$\rho_{п}$ , Ом·м	$\rho_{з}$ , Ом·м	$D/d$	$\rho_{п}$ , Ом·м	$\rho_{з}$ , Ом·м	$D/d$
1	9,8	25,7	0,64	8,8	29,7	0,43
2	57,2	34,3	0,53	47,0	31,2	0,51
3	2,9	27,7	0,42	4,7	19,5	0,58

дены для разных типов продуктивных пластов и различных значений его параметров.

Суть эффективности такого подхода, по нашему мнению, можно объяснить не только особенностями нормирования величин, входящих в (2), но и простыми геофизическими соображениями. Действительно, для всего диапазона измерения одна и та же величина погрешности 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 (как это видно на рисунке). Применение минимизации (2) позволяет учитывать для каждой конкретной модели в большей мере показания зондов, вносящих меньшую погрешность в определение искомого параметра, и в меньшей степени – зондов, вносящих большую погрешность.

Автор считает необходимым отметить, что используемое название “характеристики пространственного разрешения” [3, 4, 9] подразумевает не трехмерное материальное пространство, а связь между векторами в *пространстве* параметров измерения и *пространстве* параметров модели.

Рассмотренный метод применим и для более сложных моделей пласта. Так, аппаратура МЭК-М дает возможность эффективно исследовать геоэлектрические параметры пластов, описанных семью параметрами [8, 9], в том числе модель пласта с переходной зоной и зоной проникновения одновременно [3].

Следует отметить также, что комплекс БКЗ–БК–ИК неприменим для некоторых задач геофизического исследования скважин, решение которых обусловлено необходимостью интенсификации добычи углеводородов. Именно в последнее время все чаще появляются задачи, связанные с исследованием горизонтальных скважин, изучением тонкослоистых коллекторов, анизотропных пластов и т. д. Создание аппаратуры, способной решать такие задачи, должно стать очередным этапом данной работы.

Отметим, что предложенный метод может эффективно применяться и для других зондирующих систем [13].

**Выводы.** На основании изложенного метода, выполненных расчетов и приведенных примеров можно заключить следующее:

- некоторые применяемые в настоящее время на практике методы интерпретации могут не дать теоретически обоснованного и качественно верного результата;
- при решении обратной задачи необходимо учитывать всю совокупность доверительных интервалов величин измерения рассматриваемой

аппаратурой, а не совокупность значений измерений;

- предложенный метод позволяет повысить эффективность количественной интерпретации.

*Автор выражает благодарность директору Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук академику М.И. Эпову и д-ру физ.-мат. наук В.Н. Шуману за высказанные ценные замечания и внимание к работе, а также д-ру геол.-минерал. наук В.Н. Курганскому за полезные советы, использование которых позволило в полной мере изложить суть предлагаемого метода.*

1. Пирсон С. Дж. Справочник по интерпретации данных каротажа. – М.: Недра, 1996. – 414 с.
2. Дебрант Р. Теория и интерпретация результатов геофизических методов исследования скважин. – М.: Недра, 1972. – 288 с.
3. *Технология* исследования нефтегазовых скважин на основе ВИКИЗ. Методическое руководство / Под ред. М.И. Эпова, Ю.Н. Антонова. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 121 с.
4. Эпов М.И., Глинских В.Н., Ульянов В.Н. Оценка характеристик пространственного разрешения систем индукционного и высокочастотного каротажа в терригенных разрезах Западной Сибири // НТВ Каротажник. – 2001. – Вып. 81. – С. 19–57.
5. Красножон М.Д. Компьютеризированная технология интерпретации материалов электрического каротажа // Там же. – 2005. – № 3–4 (130–131). – С. 27–52.
6. Anderson B.I. Modeling and inversion methods for the interpretation of resistivity logging tool response. – Schlumberge print, 2001. – 377 p.
7. Anderson B.I. Barber T.D. Induction Logging. – Schlumberger, 1996. – 45 p.
8. Миронцов Н.Л. Решение прямых и обратных задач электрического и индукционного каротажа методом интегральных (полных) токов: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Киев, 2008. – 22 с.
9. Миронцов Н.Л. Решение прямых и обратных задач электрического и индукционного каротажа методом интегральных (полных) токов // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. – К., 2009. – 340–352 с.
10. *Измерение* // Физический энциклопедический словарь / Под ред. А.М. Прохорова. – М.: Сов. энцикл., 1984. – 208 с.
11. *Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах* / Под ред. Р.Т. Хаматдинова. – М.: ГЕРС, 2002. – 270 с.
12. Миронцов М.Л. Метод розв’язання прямої та оберненої задачі індукційного каротажу // Доп. НАН України. – 2004. – № 9. – 130–133 с.
13. Myrontsov M.L. Efficient method for solving the resistivity sounding inverse problem // Geophys. J., – 2010. – 32, № 4. – P. 117–199.

*Поступила в редакцию 21.12.2010 г.*

*Н.Л. Миронцов*

#### **МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ КАРОТАЖНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСОМ БКЗ–БК–ИК**

Рассмотрен широко применяемый метод решения обратной задачи для комплекса БКЗ–БК–ИК. Приведены примеры качественно и количественно неверного решения таким методом. Предложен альтернативный подход к решению обратной задачи. Показано, что этот подход дает качественно и количественно правильные результаты для комплекса БКЗ–БК–ИК.

**Ключевые слова:** геоэлектрика, обратная задача геоэлектрики, характеристики пространственного разрешения, доверительный интервал.

*М.Л. Миронцов*

#### **МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗВ'ЯЗКУ ОБЕРНЕНОЇ ЗАДАЧІ КАРОТАЖНОГО ЗОНДУВАННЯ КОМПЛЕКСОМ БКЗ–БК–ІК**

Розглянуто широко застосовний метод розв'язку оберненої задачі для комплексу БКЗ–БК–ІК. Наведено приклади якісно і кількісно хибного розв'язку цим методом. Запропоновано альтернативний підхід до розв'язання оберненої задачі. Показано, що підхід дає якісно і кількісно правильні результати для комплексу БКЗ–БК–ІК.

**Ключові слова:** геоелектрика, обернена задача геоелектрики, характеристики просторової роздільної здатності, інтервал довіри.