

УДК 550.837.2

Н.Л. Миронцов

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

ОБ ОДНОМ ВОЗМОЖНОМ МЕТОДЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ КАРОТАЖНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Описан и обоснован метод количественной оценки результатов интерпретации данных геоэлектрики, а также предложен способ повышения точности интерпретации, основанный на возможности учета особенностей геофизических характеристик используемых зондов.

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

Введение. Одно из основных направлений развития геофизических исследований скважин – повышение разрешающей способности и достоверности применяемых на практике методов. Если в первых методических работах по применению различных зондирующих систем вопрос влияния погрешности измерения на результат интерпретации не являлся решающим [1, 2], так как используемые палеточные алгоритмы были в значительной степени приближенными, то с увеличением точности методов решения обратных задач вопросы влияния погрешности измерения на точность определения геоэлектрических параметров стали не только одними из ключевых, но и неотъемлемыми при создании методики [3].

Использование в качестве начальных данных при решении обратной задачи данных измерений, полученных с погрешностью, обусловило необходимость изучения зависимости доверительного интервала для найденного решения обратной задачи от величины погрешности измерения. Введение понятия характеристики пространственного разрешения и разработанные методы их изучения довольно полно освещают этот вопрос [3–5].

В настоящей статье рассмотрен вопрос возможности изучения количественной связи между количественными мерами точности измерения и решения обратной задачи, а также указан способ повышения точ-

ности такого решения на основании априорно известных характеристик пространственного разрешения аппаратуры.

Метод. Заметим, что результатом любого измерения можно считать только сочетание значения измеренной величины с величиной погрешности ее измерения [6]. Каротаж, с точки зрения количественной интерпретации, – процесс косвенного измерения (за исключением некоторых частных случаев), так как искомые величины рассчитываются по измеренным, которые и называют “кажущимися” [1, 2]. Однако величина измерения всегда содержит погрешность (даже на квантовом уровне согласно принципу неопределенности). Соответственно возникает вопрос: Как погрешность измерения влияет на величину погрешности инверсии геоэлектрических параметров модели?

Рассмотрим пространство \mathbf{P} параметров \mathbf{p} изучаемых объектов и пространство \mathbf{G} возможных значений \mathbf{g} измерения зондирующей аппаратуры. Для решения задачи потребуем, чтобы количество независимых измерений было больше или равно количеству искомым параметров модели. Будем считать, что для идеальной математической модели существует однозначное отображение: $\mathbf{P} \rightarrow \mathbf{G}$ (будем обозначать соответствующую функцию отображения G). Обсудим особенности обратного отображения $\mathbf{G} \rightarrow \mathbf{P}$ (будем обозначать соответствующую функцию G^{-1}), которое в случае отображения одного элемента также будем считать однозначным. Если объект отображения не один элемент \mathbf{g} , а область $\mathbf{g} + \delta\mathbf{g}$, где $\delta\mathbf{g}$ принимает всевозможные значения в пределах допустимой погрешности, – образом этого отображения также будет некая область. Рассмотрим такое отображение: $\mathbf{p} + \delta\mathbf{p} = G^{-1}(\mathbf{g} + \delta\mathbf{g})$. Заметим, что поскольку обратная задача – нелинейная, то величина $\delta\mathbf{p}$ зависит и от самой модели и от погрешности измерения: $\delta\mathbf{p} = \delta\mathbf{p}(\mathbf{p}, \delta\mathbf{g})$. Погрешность измерения также в общем случае зависит от модели среды: $\delta\mathbf{g} = \delta\mathbf{g}(\mathbf{p})$ (в частности, это объясняется тем, что погрешность любого измерительного устройства неодинакова на 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

$$\mathbf{p} + \delta\mathbf{p} = G^{-1}(\mathbf{g}(\mathbf{p}) + \delta\mathbf{g}(\mathbf{p})), \quad (1)$$

отдельно для каждой модели (для различных $\mathbf{g}(\mathbf{p}) + \delta\mathbf{g}(\mathbf{p})$). Соответственно, говорить о характеристиках пространственного разрешения конкретной аппаратуры можно только для конкретной модели разреза: даже при незначительном изменении параметров модели характеристики могут значительно измениться.

Для определенности рассмотрим обратную задачу бокового каротажного зондирования (БКЗ), при решении которой принято использовать функционал вида [7, 8]

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

где n – количество зондов аппаратуры; ρ_i^T – рассчитанные теоретические значения кажущихся электрических сопротивлений (КС) для рассматриваемой модели; ρ_i^P – фактически полученные значения при измерении (начальные данные решения обратной задачи); δ_i – величина погрешности i -го зонда (в некоторых работах решение основано на предположении, что $\forall i: \delta_i \equiv 1$ [9–13]). Соответственно, решением обратной задачи станут те значения \mathbf{p} модели, для которых вектор $\mathbf{g} = \mathbf{g}(\mathbf{p})$ отвечает минимуму функционала (2). Возвращаясь к указанному выше заметим, что в случае если данные измерения заданы с погрешностью, решение обратной задачи также будет приближенным согласно (1). При этом решение обратной задачи, основанное на минимизации (2), позволяет найти решение \mathbf{p} , но никак не определяет $\delta\mathbf{p}$. Такой подход не корректен, потому что решением обратной задачи, при наличии погрешности измерения, следует считать область $\mathbf{p} + \delta\mathbf{p}$.

Продемонстрируем изложенное на примере. На рис.1 представлена палетка зависимости КС ρ_k от удельного электрического сопротивления (УЭС) пласта ρ_n , рассчитанная для классических градиент-зондов электрического каротажа А0.4М0.1N и А2.0М0.5N БКЗ в случае бесконечного пласта без зоны проникновения (для определенности УЭС скважины $\rho_c = 1$ Ом·м). Очевидно, что зависимость погрешности определения УЭС пласта $\delta\rho_n$ от погрешности измерения $\delta\rho_k$ и самого значения ρ_n для зондов различны. Более того, при одинаковой величине $\delta\rho_k$ для каждого зонда $\delta\rho_n$ может существенно различаться (рис. 1). Но как уже было отмечено, решением обратной задачи является не само значение определенной величины (в рассматриваемом случае ρ_n),

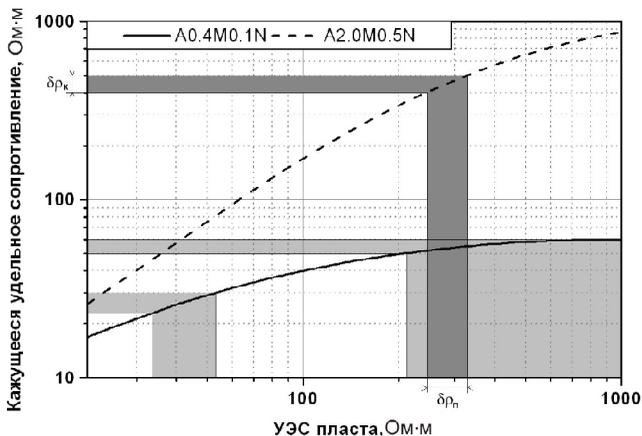


Рис. 1. Связь между погрешностью измерения (кажущееся сопротивление) и погрешностью параметра инверсии (УЭС пласта)

а это значение в совокупности с доверительным интервалом (в данном случае $\delta\rho_n$). Таким образом, понятие эффективности решения обратной задачи обязано подразумевать также минимизацию доверительного интервала.

Идея метода заключается в том, чтобы учитывать при минимизации функционала не погрешность измерения зондом, а величину погрешности инверсии, к которой она приводит. Другими словами, следует нормировать разницу между теоретическим и экспериментальными значениями при расчете функционала (2) не на погрешность измерения зонда, а на соответствующую этой погрешности измерения величину погрешности определения параметра инверсии.

Рассмотрим вместо (2) функционал

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

где λ_i – величины, характеризующие относительную меру “вклада” величины погрешности i -го измерения в значение доверительного интервала решения обратной задачи; и определяются из условия

$$\inf_{\lambda_1, \dots, \lambda_n} (\|\delta\mathbf{p}(\delta\mathbf{g})\|). \quad (4)$$

Норму в (4) логично задати аналогічно нормі, вибраної для функціоналів (2),(3). Такий підхід дозволить суттєво підвищити точність інверсії.

Результати і аналіз. В якості моделі середовища (пласта нескінченної потужності, пересіченого скважиною) виберемо актуальні для умовий терригенного розрізу Західної Сибіри випадки водонасиченого, нафтенасиченого і газонасиченого колекторів, параметри яких відповідно складають [7]:

- водонасичений колектор – $\rho_{\Pi} = 4,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\rho_3 = 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $D/d = 5$;
- нафтенасичений колектор – $\rho_{\Pi} = 8,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\rho_3 = 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $D/d = 4$;
- газонасичений колектор – $\rho_{\Pi} = 50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\rho_3 = 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $D/d = 5$,

де ρ_3 – УЭС зони проникнення; D/d – відношення діаметра зони проникнення до номінального діаметру скважини. Во всіх випадках УЭС скважини дорівнює $2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, радіус скважини $0,108 \text{ м}$. Крім того, розглянемо реальне розташування зворотного вимірювального електроду на відстані 22 м , в відмінність від ідеалізованого і невідповідного дійсності припущення про знаходження зворотного електроду на нескінченності [14]. При розв’язанні прямої і зворотної задачі було використано метод, оснований на представленні простору аналогом електродінтегратора [15,16].

Розгляд проведемо на прикладі апаратури БКЗ, що складається з семи зондів: А0.4М0.1N, А1.0М0.1N, А2.0М0.5N, А4.0М0.5А, N6.0М0.5А, А8.0М1.0N, N0.5М2.0А. Похибка вимірювання будемо вважати однакою $\delta\rho_K = \pm(1 + 0,03\rho_K)$.

Для визначеності похибки, отримані на основі мінімізації функціонала (2), – “розрахунковими існуючим методом”, похибки, отримані на основі мінімізації функціонала (3), – “розрахунковими запропонованим методом”.

На рис. 2–4 показані окремі випадки характеристик просторового розв’язання, отримані для розв’язання зворотної задачі, оснований на розгляді функціоналів (2) і (3), при виборі величин λ_i за умови (4).

Очевидно, що похибка визначення геоелектричних параметрів запропонованим методом (на основі мінімізації функціонала (3)) менше, ніж та ж похибка, отримана при мінімізації функціонала (2).

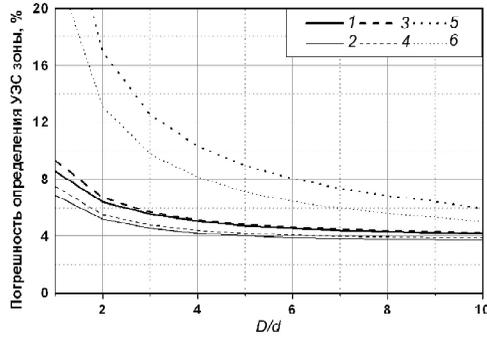


Рис. 2. Зависимость погрешности определения ρ_{Π} в зависимости от ρ_3 ; кривые 1, 3, 5 рассчитаны существующим методом, кривые 2, 4, 6 – предложенным методом; кривые 1, 2 соответствуют модели водонасыщенного коллектора, 3, 4 – нефтенасыщенного коллектора; 5, 6 – газонасыщенного коллектора

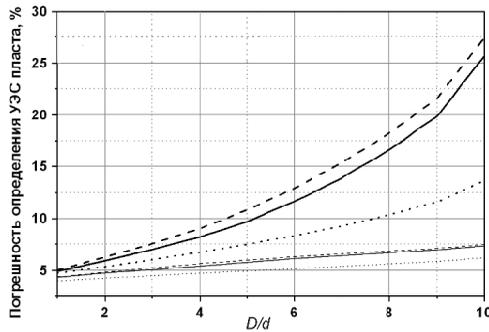


Рис. 3. Зависимость погрешности определения ρ_{Π} в зависимости от D/d . Условные обозначения см. на рис. 2

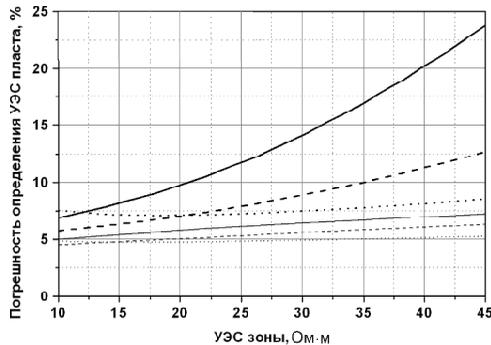


Рис. 4. Зависимость погрешности определения ρ_{Π} в зависимости от D/d . Условные обозначения см. на рис. 2

Выводы. Предложенный метод повышения эффективности решения обратных задач геоэлектрики позволяет повысить достоверность полученных данных количественной интерпретации. Так, для актуальных моделей пластов Западной Сибири погрешность нахождения геоэлектрических параметров инверсии оказалась сопоставимой с погрешностью измерения зондами, что обеспечивает устойчивость решения обратной задачи.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Украины для молодых ученых (Державний фонд фундаментальних досліджень. Проект GP/F32/033) и гранта Национальной академии наук Украины.

1. *Пирсон С.Дж.* Справочник по интерпретации данных каротажа / Пирсон С. Дж. – М.: Недра, 1996. – 414 с.
2. *Дебрант Р.* Теория и интерпретация результатов геофизических методов исследования скважин / Дебрант Р. – М.: Недра, 1972. – 288 с.
3. *Технология* исследования нефтегазовых скважин на основе ВИКИЗ. Методическое руководство / [Под. ред. Эпова М.И., Антонова Ю.Н.] – Новосибирск: СО РАН, 2000. – 121 с.
4. *Табаровский Л.А.* Оценка разрешающей способности электромагнитных методов / Табаровский Л.А., Эпов М.И. // Геология и геофизика. – 2006. – **46**, № 5. – С. 568–578.
5. *Эпов М.И.* Оценка характеристик пространственного разрешения систем индукционного и высокочастотного каротажа в терригенных разрезах западной Сибири / Эпов М.И., Глинских В.Н., Ульянов В.Н. // НТВ Каротажник. – 2001. – Вып. 81. – С. 19–57.
6. *Измерение:* [сб. Физический энциклопедический словарь / Под. ред. Прохорова А.М.] – М.: Сов. энцикл., 1984. – 208 с.
7. *Глинских В.Н.* Двумерная реконструкция геоэлектрического изображения по данным высокочастотного электромагнитного каротажа / Глинских В.Н., Эпов М.И. // НТВ Каротажник. – 2006. – № 6 (147). – С. 59–68.
8. *Кнеллер Л.Е.* Новый алгоритм определения удельного электрического сопротивления пластов / Кнеллер Л.Е., Сидорчук А.И. // Прикл. геофизика. – 1982. – Вып. 102. – С. 172–183.
9. *Горбик Г.К.* Машинная интерпретация кривых БКЗ / Горбик Г.К., Зундулевич С.М., Кулинкович А.Е. – М.: Недра, 1982. – С. 94–106.
10. *Кнеллер Л.Е.* Решение прямой и обратной задач электрокаротажа в радиально-неоднородных средах / Кнеллер Л.Е., Потапов А.П. // Геология и геофизика. – 1989. – № 1. – С. 83–96.
11. *Потапов А.П.* Решение прямой и обратной задач индукционного каротажа для сред с произвольным и дискретным распределением проводимости по глубине / Потапов А.П., Кнеллер Л.Е. // Изв. вузов. Сер. Геология и геофизика. – 1990. – № 9. – С. 122–130.

12. Кнеллер Л.Е. Решение прямой и обратной задач индукционного каротажа с учетом вертикальной и радиальной неоднородности геоэлектрического разреза / Кнеллер Л.Е., Потапов А.П. // Изв. вузов. Сер. Геология и разведка. – 1990. – № 9. – С. 95–102.
13. Красножон М.Д. Компьютеризированная технология интерпретации материалов электрического каротажа / Красножон М.Д. // НТВ Каротажник – 2005. – № 3–4 (130–131). – С. 27–52.
14. Дахнов В.Н. Интерпретация результатов геофизических исследований скважин / Дахнов В.Н. – М.: Недра, 1972. – 368 с.
15. Альпин Л.М. Применение сеточного моделирования для решения задач теории электрического каротажа / Альпин Л.М. // Прикл. геофизика. – 1962. – Вып. 34. – С. 198–217.
16. Миронцов Н.Л. Метод быстрого решения прямой и обратной задачи электрического каротажа / Миронцов Н.Л. // Докл. НАН Украины. – 2007. – № 2. – С. 138–141.

Про один можливий метод підвищення ефективності розв’язання обернених задач каротажного зондування М.Л. Миронцов

Описано та обґрунтовано метод кількісної оцінки результатів інтерпретації даних геоелектрики, а також запропоновано спосіб підвищення точності інтерпретації, заснований на можливості урахування особливостей геофізичних характеристик зондів, що використовуються.

Ключові слова: геоелектрика, обернена задача геоелектрика, характеристики просторової роздільної здатності, довірчий інтервал.

On one feasible method for increasing the efficiency in solving inverse logging problems M.L. Myrontsov

The method for quantity assessment of interpretation results of geoelectric data is described as well as the method for accuracy increase of interpretation based on the possibility to take into account features of geophysical characteristics of used probes is proposed.

Keywords: geoelectrics, geoelectric inverse problem, spatial resolution characteristics, confidence interval.