

О связи характеристик пространственного разрешения зондирующей аппаратуры каротажа и эффективности решения обратных задач

© Н. Л. Миронцов, 2012

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 22 июня 2011 г.

Представлено членом редколлегии В. Н. Шуманом

Описано та обґрунтовано метод кількісної оцінки результатів інтерпретації даних свердловинних геоелектричних методів. Запропоновано спосіб підвищення точності інтерпретації, в основі якого лежить можливість урахування особливостей геофізичних характеристик використовуваних зондів.

A method of quantitative assessment of well geo-electric methods data interpretation has been described and justified. The way of increasing the accuracy of interpretation based on possibility of taking into account geophysical characteristics of the probes used has been proposed.

Вступление. 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 был решающим [Дебрант, 1972; Пирсон, 1996], так как используемые палеточные алгоритмы сами 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 [Технология ..., 2000].

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 [Технология ..., 2000; Эпов и др., 2001; Табаровский, Эпов, 2006].

В данной статье не только рассмотрен вопрос о возможности изучения количественной связи между количественными мерами точности измерения и решения обратной задачи, но и указан способ повышения точности 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 [Измерение ..., 1984]. Каротаж, с точки зрения количественной интерпретации, — процесс косвенного измерения (за исключением некоторых частных случаев), так как искомые величины рассчитываются по измеренным, которые по способу определения обычно называют "кажущимися" [Дебрант, 1972; Пирсон, 1996]. 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 P параметров \mathbf{p} изучаемых объектов и пространство G возможных значений \mathbf{g} измерения зондирующей аппаратуры. Для того чтобы задача имела решение, потребуем выполнения условия: количество независимых измерений должно быть больше или равно количеству искомых параметров модели. Будем считать, что для идеальной математической модели существует однозначное отображение: $P \rightarrow G$ (обозначим соответствующую функцию отображения G). Рассмотрим особенности обратного отображения $G \rightarrow P$ (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 отображение: $\mathbf{p} + \delta\mathbf{p} = G^{-1}(\mathbf{g} + \delta\mathbf{g})$. Поскольку обратная задача — нелинейная, 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 эти характеристики могут существенно измениться.

Для определенности рассмотрим обратную задачу бокового каротажного зондирования (БКЗ), при решении которой принято использовать функционал вида [Кнеллер, Сидорчук, 1972; Глинских, Эпов, 2006]

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

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 работах [Горбик, Зундулевич, 1982; Кнеллер, Потапов, 1989, 1990; Потапов, Кнеллер, 1990; Красножон, 2005] решение основано на предположении что $\forall i: \delta_i \equiv 1$).

Соответственно, решением обратной задачи станут те значения p модели, для которых вектор $\mathbf{g} = \mathbf{g}(\mathbf{p})$ соответствует минимуму функционала (2). Возвращаясь к изложенному выше, заметим, что, 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 указанное на примере. На рис. 1 представлена палетка зависимости КС ρ_K от удельного электрического сопротивления (УЭС) пласта ρ_{II} , 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 $\delta\rho_{II}$ от погрешности измерения $\delta\rho_K$ и самого значения ρ_{II} для зондов различны. Бо-

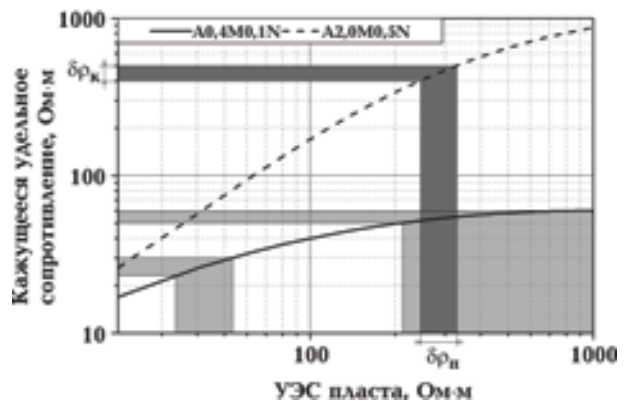


Рис. 1. Связь между погрешностью измерения (кажущееся сопротивление) и погрешностью параметра инверсии (УЭС пласта).

лее того, при одинаковой величине $\delta\rho_k$ для каждого зонда $\delta\rho_{\Pi}$ может существенно различаться (рис. 1). Но как уже было отмечено, решением обратной задачи является не само значение определенной величины (в рассматриваемом случае ρ_{Π}), а это значение в совокупности с доверительным интервалом (в рассматриваемом случае $\delta\rho_{\Pi}$). Таким образом, понятие эффективности решения обратной задачи обязано подразумевать и 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 экспериментальным 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, которые характеризуют относительную меру "вклада" величины погрешности i -го измерения в значение доверительного интервала решения обратной задачи, и определяются из условия

$$\inf(\|\delta p(\delta g)\|). \quad (4)$$

$\lambda_1, \dots, \lambda_n$

Норму в (4) следует задать аналогично норме, выбранной для функционалов (2), (3). Такой подход позволит существенно повысить точность инверсии.

Результаты и анализ. В качестве модели среды (пласта бесконечной мощности, пересеченного скважиной) выберем актуальные для условий терригенного разреза Западной Сибири случаи водонасыщенного, нефтенасыщенного и газонасыщенного коллекторов с соответствующими параметрами [Глинских, Эпов, 2006]:

- водонасыщенный коллектор — $\rho_{\Pi} = 4,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$;
 $\rho_3 = 20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $D/d = 5$;
- нефтенасыщенный коллектор — $\rho_{\Pi} = 8,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$;
 $\rho_3 = 30 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $D/d = 4$;
- газонасыщенный коллектор — $\rho_{\Pi} = 50 \text{ Ом} \cdot \text{м}$;

$\rho_3 = 30 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $D/d = 5$.

Здесь ρ_3 — УЭС зоны проникновения; D/d — отношение диаметра зоны проникновения к номинальному диаметру скважины.

Во всех случаях УЭС скважины $2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, радиус скважины $0,108 \text{ м}$.

Рассмотрим реальное расположение обратного измерительного электрода на расстоянии 22 м в отличие от идеализированного и несоответствующего действительности предположения о нахождении обратного электрода на бесконечности [Дахнов, 1972]. При решении прямой и обратной задач был использован метод, основанный на представлении пространства аналогом электроинтегратора [Альпин, 1962; Миронцов, 2007].

Аппаратура БКЗ состоит из семи зондов: A0.4M0.1N; A1.0M0.1N; A2.0M0.5N; A4.0M0.5A; N6.0M0.5A; A8.0M1.0N; N0.5M2.0A. Погрешность измерения полагаем равной $\delta\rho_k = \pm(1 + 0,03\rho_k)$. Для определенности будем называть погрешности, полученные на основании минимизации функционала (2), рассчитанными существующим методом, на основании минимизации функционала (3) — рассчитанными предложенным методом.

На рис. 2, 3 показаны частные случаи характеристик пространственного разрешения, полученные для решений обратных задач, основанных на рассмотрении функционалов (2) и (3), при выборе величин λ_i из условия (4). Очевидно, что погрешность определения геоэлектрических параметров предложенным методом (на основании минимизации функцио-

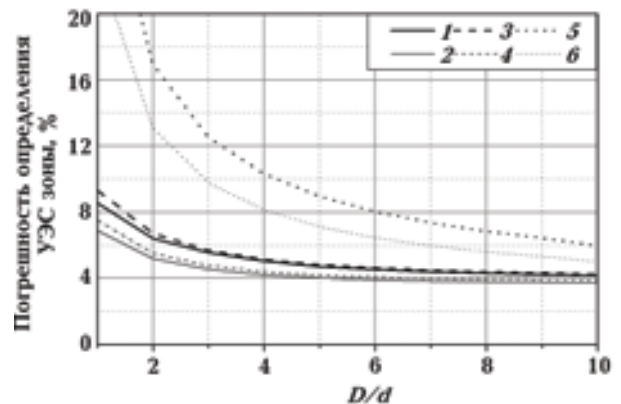


Рис. 2. Зависимость погрешности определения ρ_3 от D/d . Кривые 1, 3, 5 рассчитаны существующим методом, кривые 2, 4, 6 — предложенным методом. Кривые 1, 2 соответствуют модели водонасыщенного коллектора; 3, 4 — нефтенасыщенного коллектора; 5, 6 — газонасыщенного коллектора.

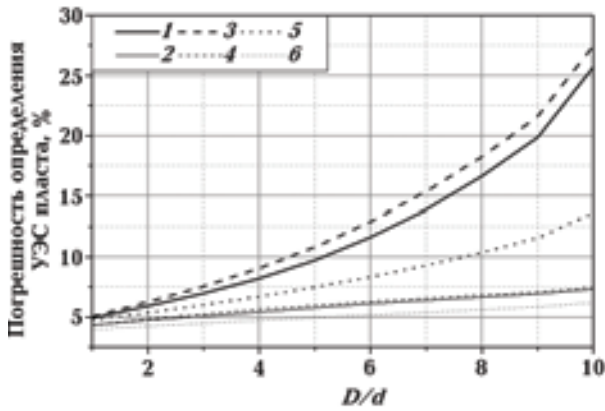


Рис. 3. Зависимость погрешности определения $\rho_{п}$ от D/d . Условные обозначения см. на рис. 2.

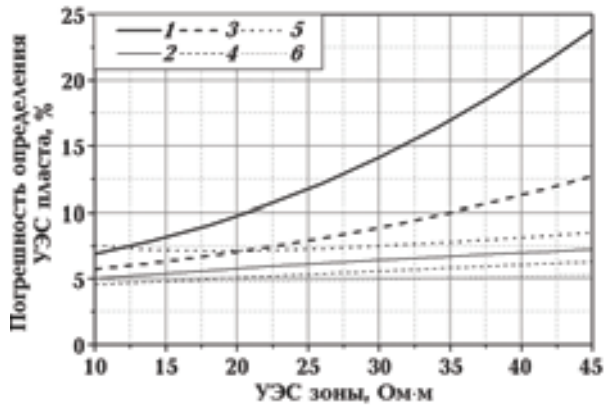


Рис. 4. Зависимость погрешности определения $\rho_{п}$ от $\rho_{з}$. Условные обозначения см. на рис. 2.

нала (3)) меньше, чем та же погрешность, полученная при минимизации функционала (2).

Выводы. Предложенный метод повышения эффективности решения обратных задач геоэлектрики позволяет повысить достоверность 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.

Список литературы

- Альпин Л.М. Применение сеточного моделирования для решения задач теории электрического каротажа // Прикл. геофизика. — 1962. — Вып. 34. — С. 198—217.
- Глинских В.Н., Эпов М.И. Двумерная реконструкция геоэлектрического изображения по данным высокочастотного электромагнитного каротажа // НТВ Каротажник. — 2006. — № 6 (147). — С. 59—68.
- Горбик Г.К., Зундуевич С.М., Куликович А.Е. Машинная интерпретация кривых БКЗ. — Москва: Недра, 1982. — С. 94—106.
- Дахнов В.Н. Интерпретация результатов геофизических исследований скважин. — Москва: Недра, 1972. — 368 с.
- Дебрант Р. Теория и интерпретация результатов геофизических методов исследования скважин. — Москва: Недра, 1972. — 288 с.
- Измерение // Физический энциклопедический словарь / Под ред. А.М. Прохорова. — Москва: Сов. энцикл., 1984. — С. 208.
- Кнеллер Л.Е., Потанов 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., Потанов А.П. Решение прямой и обратной задач электрокаротажа в радиально-неоднородных средах // Геология и геофизика. — 1989. — № 1. — С. 83—96.
- Кнеллер Л.Е., Сигорчук А.И. Новый алгоритм определения удельного электрического сопротивления пластов // Прикл. геофизика. — 1982. — Вып. 102. — С. 172—183.
- Красножон М.Д. Компьютеризированная технология интерпретации материалов электрического каротажа // НТВ Каротажник. — 2005. — № 3—4 (130—131). — С. 27—52.
- Миронцов Н.Л. Метод быстрого решения прямой и обратной задачи электрического каротажа // Докл. НАН Украины. — 2007. — № 2. — С. 138—141.
- Кнеллер Л.Е., Потанов А.П. Решение прямой и
- Пирсон С. Дж. Справочник по интерпретации

- данных каротажа. — Москва: Недра, 1996. — 414 с.
- 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.
- Табаровский Л.А., Эпов М.И.* Оценка разрешающей способности электромагнитных методов // Геология и геофизика. — 2006. — 46, № 5. — С. 568—578.
- 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.
- 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.