

<https://doi.org/10.15407/dopovidi2020.04.015>

УДК 519.6, 550.8

Н.Л. Миронцов

Институт телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАН Украины, Киев
E-mail: myrontsov@ukr.net

Решение обратной задачи бокового каротажного зондирования в условиях терригенного разреза

Представлено членом-корреспондентом НАН Украины А.Н. Трофимчуком

На примере бокового каротажного зондирования показана возможность оценки влияния вмещающих пластов и граничных эффектов на реальную вертикальную разрешающую способность решения обратной задачи. Показана возможность улучшения такой способности при помощи нового подхода к решению обратной задачи, позволяющего учитывать количественный вклад измерения каждого зонда в окончательный результат. Приведен пример такого решения обратной задачи комплекса “БКЗ+БК” для реального скважинного материала в терригенном разрезе.

Ключевые слова: обратная задача электрометрии, электрический каротаж, боковое каротажное зондирование, боковой каротаж, вертикальная разрешающая способность.

Современный спектр направлений инновационных и научных исследований Института телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАН Украины достаточно широк [1–3]. Одним из таких направлений является геофизическое исследование скважин (ГИС) [4], актуальность которого сложно переоценить в настоящее время [5].

Электрический каротаж (ЭК), как один из основных методов ГИС, предоставляет исследователю некую “усредненную” величину удельного сопротивления (УС) — так называемое кажущееся сопротивление (КС). Поэтому одна из составляющих теории и методологии электрометрии скважин — создание алгоритма (решение обратной задачи), который позволяет по данным измерения восстанавливать пространственное распределение дифференциальной величины — УС [6]. При этом количество геоэлектрических параметров модели пласта не может превышать количество измеряемых величин против этого пласта, поэтому пространственное распределение описывается с помощью модели ограни-

Цит у в а н н я: Миронцов Н.Л. Решение обратной задачи бокового каротажного зондирования в условиях терригенного разреза. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2020. № 4. С. 15–24. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2020.04.015>

ченного количества параметров [7]. Очевидно, что для повышения детализации определения пространственного распределения УС необходимо увеличение количества зондов, имеющих различную глубину исследования. Однако это количество ограничено конструктивными, техническими и методическими особенностями.

В случае трехслойной модели среды количество неизвестных параметров модели равно трем (ρ_n – УС неповрежденной буровым раствором части пласта (сокращенно – УС пласта), ρ_3 – УС зоны проникновения фильтрата бурового раствора (сокращенно – УС зоны) и D/d – отношением диаметра зоны к диаметру скважины) и, следовательно, решение обратной задачи будет иметь смысл только для комплексов электрометрии, имеющих три и более зондов.

Такой трехслойной моделью успешно описываются даже тонкослоистые и анизотропные коллекторы [8], ложные и коллекторы остаточного нефтенасыщения [9], коллекторы аномально низкого сопротивления [10] и т.д., которые в условиях Днепровско-Донецкой впадины принято считать сложнопостроенными. Для исследования таких объектов комплекс бокового каротажного зондирования (БКЗ – состоит из семи нефокусированных зондов A0.4M0.1N, A1.0M0.1N, A2.0M0.5N, A4.0M0.5N, N6.0M0.5A, A8.0M1.0N, N0.5M2.0A (обратный A2.0M0.5N)) даже в сочетании с трехэлектродным зондом бокового каротажа БК-3 (БК) и фокусированным зондом индукционного каротажа 7Ф1.6 или 6Ф1 (ИК) оказывается неэффективным. Неэффективен он и для некоторых более простых объектов (например маломощных пластов мощностью, сопоставимой или меньшей длины самых больших зондов комплекса) в случае применения принятого в настоящее время подхода к количественной интерпретации данных “БКЗ+БК+ИК” [7].

Покажем, что существует способ повышения точности количественной интерпретации данных электрометрии на примере комплекса “БКЗ+БК”.

Предварительно заметим, что поскольку реальные пласты-коллекторы имеют конечную мощность (которая может быть меньше длины больших зондов комплекса), то обратная задача является принципиально двумерной. Для нелинейных задач ЭК автору неизвестны удачно реализованные эффективные и точные алгоритмы решения обратных задач, где бы одновременно решалась задача по двум координатам. Поэтому для решения такой двумерной задачи, целесообразно было бы факторизовать задачу (используя этот термин мы имеем в виду замену одной двумерной задачи на две независимые одномерные задачи подобно методу разделения переменных при решении дифференциальных уравнений в частных производных): сначала решить задачу по одной пространственной координате (вдоль оси скважины), а затем решать независимо одномерные задачи для каждого пласта, полагая, что он имеет бесконечную мощность (не зависит от вертикальной координаты в цилиндрической системе координат).

В качестве критерия близости найденного решения с искомым истинным значением принято рассматривать минимизацию функционала, который в общем виде можно записать как [11, 12]:

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

где n — количество зондов аппаратуры; ρ_i^T — рассчитанные значения КС для рассматриваемой модели, ρ_i^P — фактически полученные значения КС; δ_i — относительная погрешность i -го зонда; χ_i — абсолютная погрешность i -го зонда.

Такой подход хорошо себя зарекомендовал при решении задач многозондового ИК [13–15], при котором измеряемая кажущаяся проводимость зондами различной длины приводится к одинаковой величине вертикальной разрешающей способности путем решения уравнения Фредгольма первого рода типа свертки. Но задача ЭК в отличие от задачи ИК — нелинейная и потому требует иного подхода.

Рассмотрим вместо (1) функционал вида [7]:

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

где K_i — весовые коэффициенты каждого зонда комплекса, которые могут варьироваться интерпретатором.

В поточечном варианте решения обратной задачи (в отличие от попластового [7]) мы считаем, что данные каротажа в каждой точке соответствуют данным каротажа, полученным в пласте бесконечной мощности, и для этих данных решаем одномерную обратную задачу. После решения обратной задачи уже по кривой ρ_{II} , в случае необходимости, мы расставляем границы (разбиваем исследуемый интервал на пласты) и для каждого пласта определяем по одному значению ρ_{II} , ρ_3 и D/d .

Но независимо от того какой способ применяется (поточечный или попластовый) мы в любом случае сталкиваемся с проблемой “граничных эффектов” (проблемой искажения данных измерения в области положения горизонтальных границ пластов). Эти эффекты и являются основной причиной снижения вертикальной разрешающей способности метода ЭК, поскольку для нелинейной задачи полностью исключить влияние соседних пластов на измерение в исследуемом (особенно при его малой мощности) практически невозможно.

Оценим вертикальную разрешающую способность комплекса БКЗ. Для этого будем исследовать свойства решения обратной задачи в интервале, содержащем горизонтальную границу двух полубесконечных пластов.

Для полученных каротажных кривых на границе двух полубесконечных пластов (рис. 1) мы решили восемь различных обратных задач (рис. 2): по две для различных наборов (различных значений весовых коэффициентов в (2)) зондов комплекса: одна — в предположении, что на всем интервале является проникновение (результат решения: УС пласта R''_{II} и УС зоны R'_3) другая — в предположении его отсутствия на всем интервале (результат решения: УС пласта — R''_{II}).

Приведенные результаты подтверждают вывод, что большие зонды искажают результат решения обратной задачи на больших интервалах и, следовательно, выбор зондов ЭК, данные измерения которых учитываются при решении обратной задачи, должен происходить из соображений ожидаемых мощностей потенциально важных для исследования пластов на интервале.

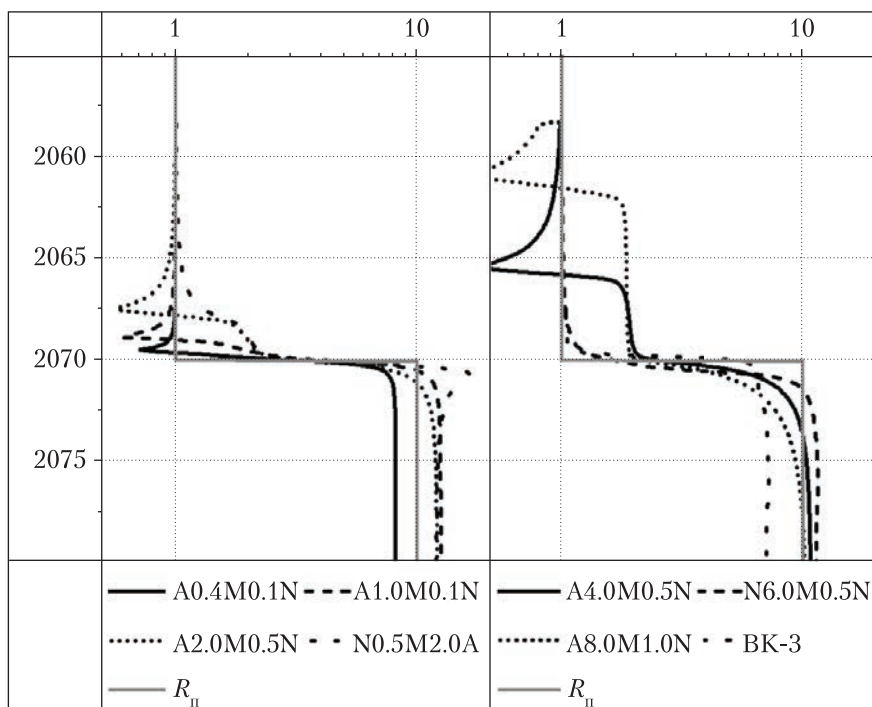


Рис. 1. Каротажные диаграммы комплекса “БКЗ+БК” для границ двух бесконечных пластов $\rho_{II}=10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и $\rho_{II}=1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ($\rho_c=10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$)

Рассмотрим теперь поточечное решение обратной задачи “БКЗ+БК” для реального скважинного материала (рис. 3), для скважины, которую условно будем называть “Северо-Покурская”.

Сравнивать полученные результаты будем с данными высокочастотного индукционного каротажного изопараметрического зондирования (ВИКИЗ: кривые VK1–VK5 соответствуют зондам длины 0,5, 0,71, 1,0, 1,41, 2,0 м) [7].

R'_z и R''_{II} — УС зоны и пласта, полученные в предположении, что весь интервал является интервалом с проникновением, а R''_{II} — УС пласта, полученное в предположении, что весь интервал является непроницаемым.

Сравнение рис. 3, б и 3, в позволяет сделать вывод, что УС пласта, определенное в предположении отсутствия проникновения, существенно отличается от УС, определенного в предположении проникновения всего интервала исследования.

Действительно, в предположении наличия проникновения и его отсутствия УС пласта почти совпадают при наличии восьмиметрового зонда в комплексе. Когда же два самых длинных нефокусированных зонда комплекса БКЗ исключаются, то УС пласта, в предположении отсутствия проникновения, становится неким “средним” между УС зоны и УС пласта при наличии проникновения. Следовательно, при наличии больших зондов и при повышающем проникновении (что является определяющим в данном случае), комплекс “БКЗ+БК” является наиболее чувствительным к УС неповрежденной фильтратом бурового раствора части пласта. Изменение УС зоны проникновения в этом случае оказывается эффектом меньшей величины.

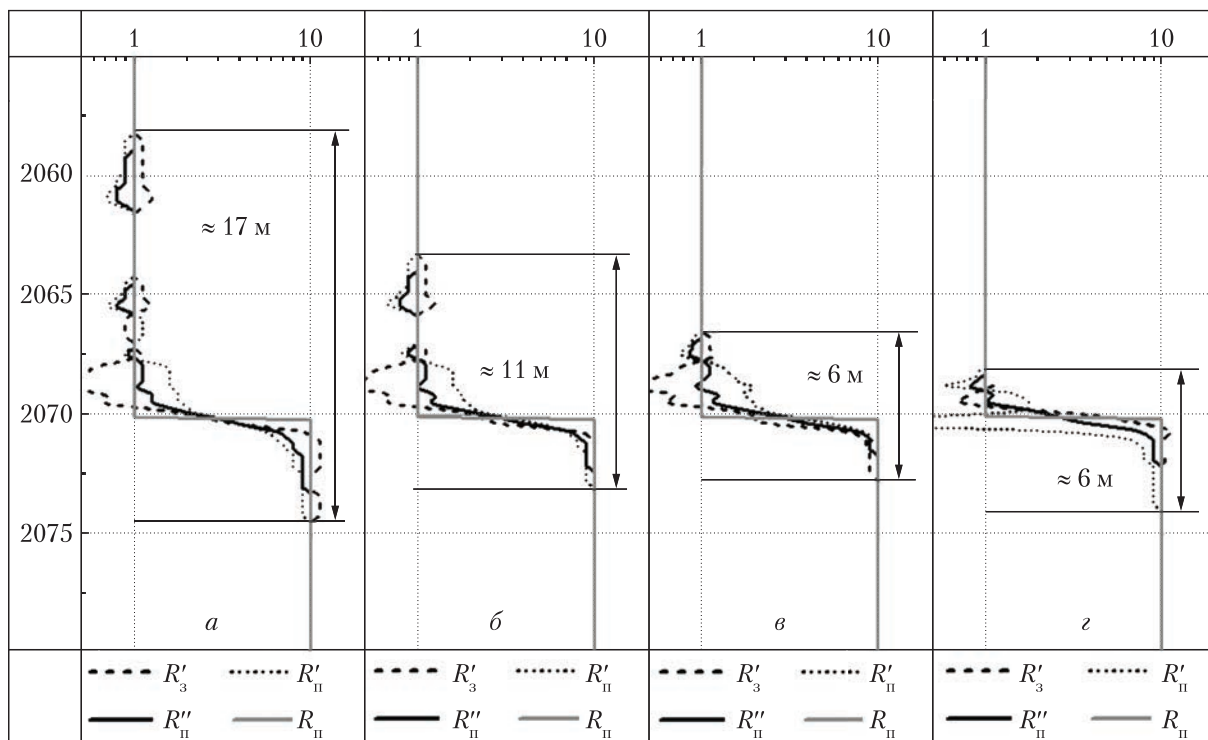


Рис. 2. Результат решения обратной задачи “БКЗ+БК” для границ двух бесконечных пластов $\rho_{II} = 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и $\rho_{II} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (R'_3 – рассчитанное УС зоны, R''_3 – УС зоны при отсутствующей зоне, R'_II – УС пласта, R''_II – УС пласта при отсутствующей зоне, R''_II – искомое значение УС пласта): *a* – все $K = 1$; *б* – $K_{A8.0M1.0N} = 0$; *в* – $K_{A4.0M0.5N} = 0$, $K_{A8.0M1.0N} = 0$; *г* – $K_{A2.0M0.5N} = 0$, $K_{A4.0M0.5N} = 0$, $K_{A8.0M1.0N} = 0$, $K_{N0.5M2.0A} = 0$

Этот факт, вообще говоря, усложняет процесс интерпретации, поскольку без дополнительного материала, как это следует из полученного результата, мы не можем однозначно установить проницаемость интервала.

Действительно, каждый из двух приведенных результатов получен корректно со своей величиной погрешности, и они между собой практически не отличаются.

Именно такие результаты (см. рис. 3, б) свидетельствуют о том, что зона проникновения присутствует, но имеет малый радиус. То есть влияние изменения УС зоны (на значение измеряемых КС) нивелируется ее малым размером. Это подтверждается и данными ВИКИЗ (на интервалах, где по другим методам проникновения не определяется – диаметр зоны проникновения D/d составляет 1,5–2,5, а на интервалах, где гарантированно проникновение присутствует, D/d составляет 2,5–6,0).

В подобных случаях, когда действительно без дополнительных методов нельзя отличить интервалы “с” и “без” проникновения, следует действовать следующим образом.

Мы решаем обратную задачу в предположении наличия проникновения на всем интервале (определяем R'_3 и R'_II) и в предположении, что интервал является непроницаемым (определяем R''_II). Разбиваем исследуемый интервал по вспомогательным методам на интервалы с проникновением и без него и на первых считаем результатом решения R'_3 и R'_II , а на вторых – R''_II . Именно такой подход продемонстрирован на рис. 4. Интервалы с проник-

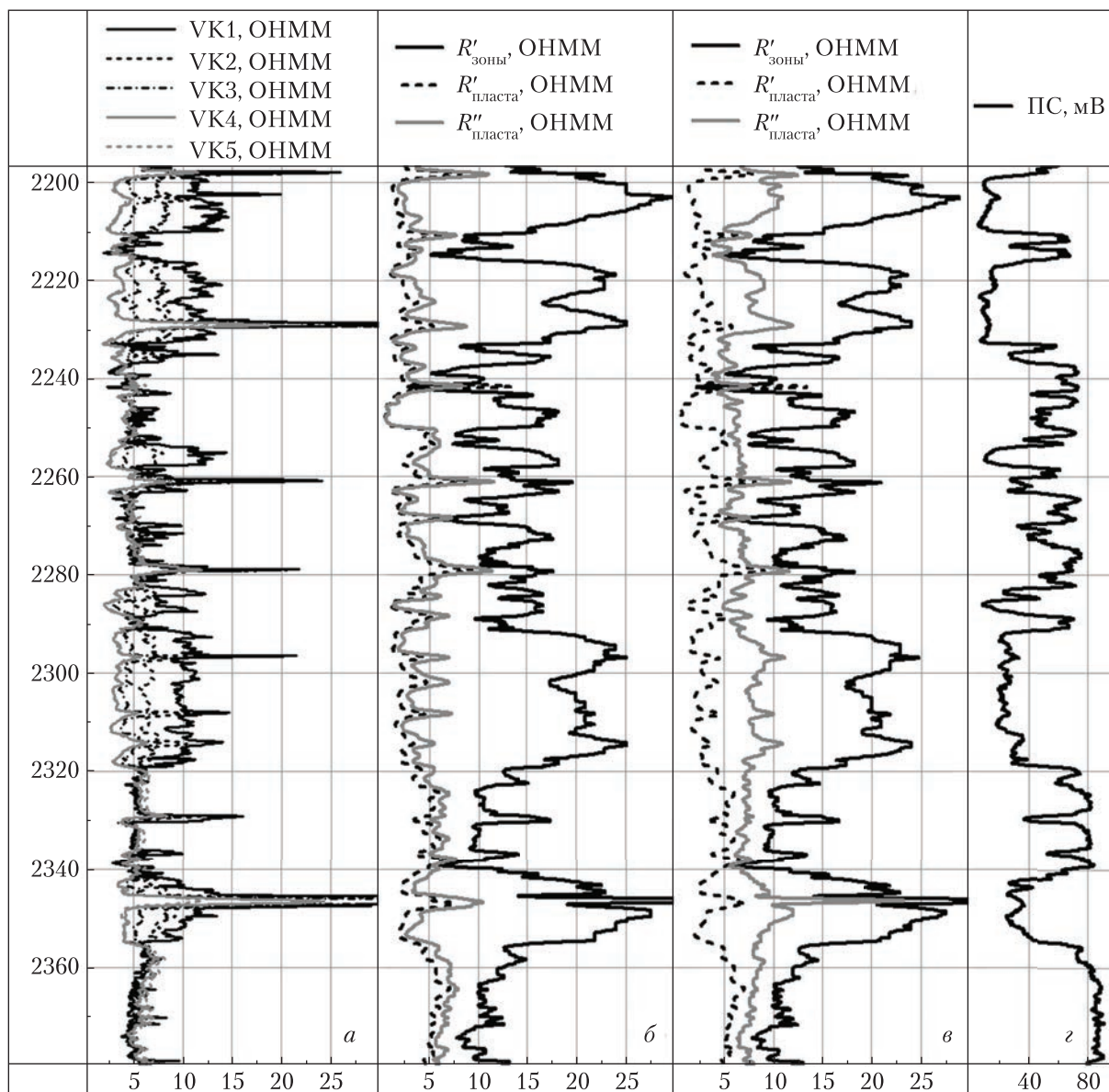


Рис. 3. Скважина Северно-Покурская (УС бурового раствора 1,2–1,3 Ом·м): *а* – диаграммы ВИКИЗ; *б* – результат решения обратной задачи “БКЗ+БК” для всех $K = 1$; *в* – результат решения обратной задачи “БКЗ+БК” при $K_{A4.0M0.5N} = 0$, $K_{A8.0M1.0N} = 0$; *г* – диаграмма спонтанной поляризации (ПС)

новением выделены по данным каротажа потенциала самопроизвольной (собственной) поляризации (ПС) и данными интерпретации ВИКИЗ.

Повышение точности ожидается при добавлении к комплексу “БКЗ+БК” других зондов электрометрии, например, хотя бы одного зонда ИК. Подобный подход без ограничения общности возможен и при решении обратной задачи для других комплексов электрометрии нефтегазовых скважин.

Выводы. Для корректного использования алгоритма решения необходимо иметь оценку вертикальной разрешающей способности метода в целом, т.е. иметь оценку возможнос-

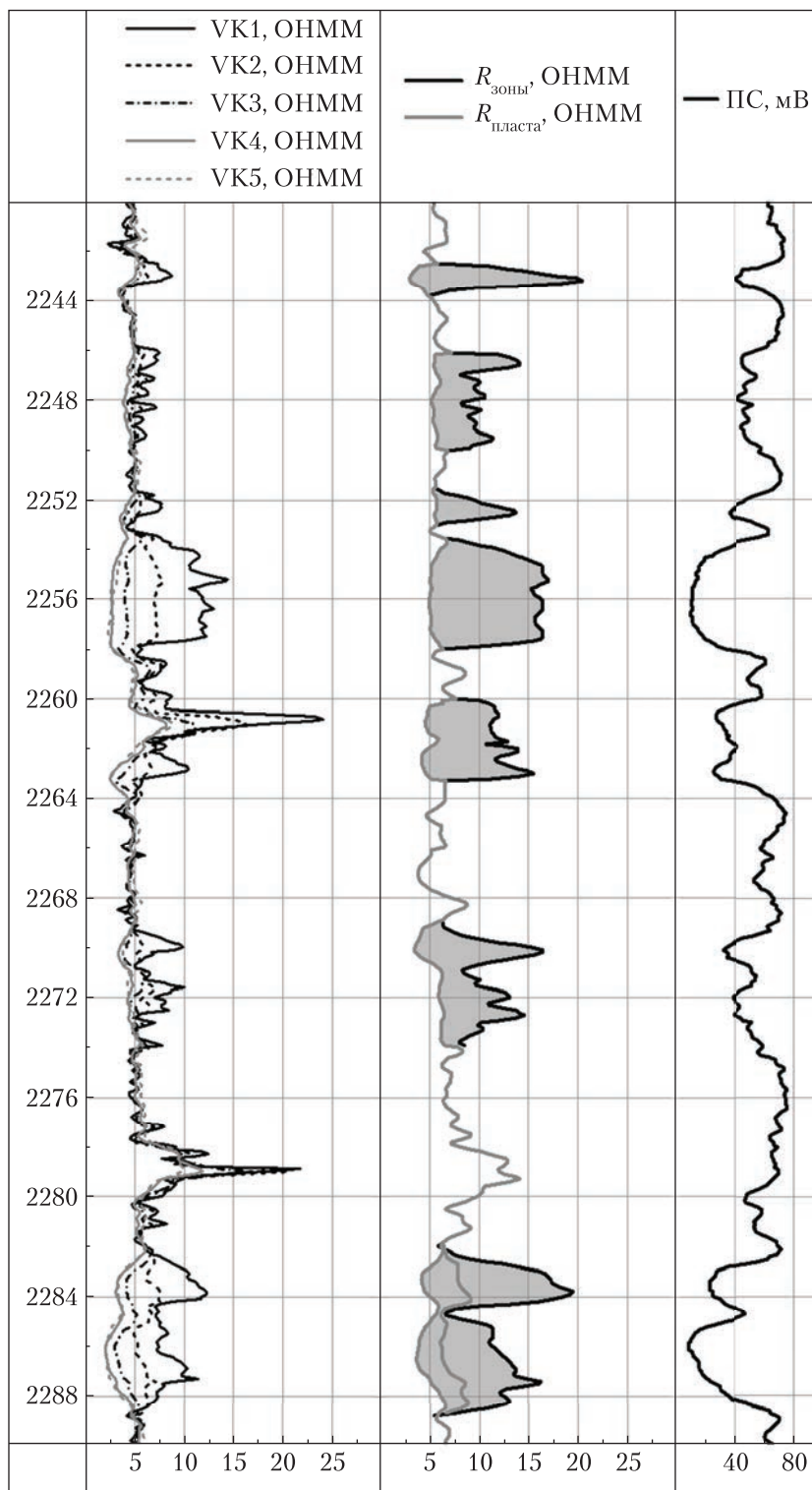


Рис. 4. Скважина Северно-Покурская. Результат решения обратной задачи “БКЗ+БК” с использованием дополнительной информации о характере проникновения на исследуемом интервале

тей совокупности алгоритма решения и реального влияния граничных эффектов на измерение КС зондов комплекса. Однако использование функционала (2) позволяет изменять влияние зондов различной длины на конечный результат и тем самым позволяет достичь удовлетворительной точности даже при исследовании геоэлектрических параметров пластов, мощность которых меньше, чем длина самых больших зондов электрометрического комплекса. Результаты работы для комплекса “БКЗ+БК+ИК” внедрены в производственный процесс ООО “Приднепровская горно-химическая корпорация” и ООО “Укрспецгеология”.

Работа реализована в рамках научно-технического проекта научных учреждений НАН Украины в 2019 г., а также содержит результаты исследований, выполненных при поддержке гранта Президента Украины для молодых докторов наук (конкурсный проект Ф44) за 2019 г.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимчук О.М., Миронцов М.Л. Сучасні дисертаційні дослідження Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору: математичне моделювання і обчислювальні методи. *Мат. моделювання в економіці*. 2018. **10**, № 1. С. 7–30.
2. Трофимчук О.М., Миронцов М.Л. Сучасні дисертаційні дослідження Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору: інформаційні технології. *Мат. моделювання в економіці*. 2018. **11**, № 2. С. 5–25.
3. Трофимчук О.М., Миронцов М.Л. Сучасні дисертаційні дослідження Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору: екологічна безпека. *Мат. моделювання в економіці*. 2018. **12**, № 3. С. 7–25.
4. Миронцов М.Л. Вектор сучасних досліджень електрометрії нафтогазових свердловин. *Мат. моделювання в економіці*. 2018. **12**, № 3. С. 26–36.
5. Довгий С.О., Євдошук М.І., Коржнев М.М., Куліш Є.О., Курило М.М., Малахов І.М., Трофимчук О.М., Яковлев Є.О. Енергетично-ресурсна складова розвитку України. Київ: Ніка-Центр, 2010. 263 с.
6. Миронцов Н.Л. Численное моделирование электрометрии скважин. Київ: Наук. думка, 2012. 224 с.
7. Миронцов М.Л. Электрометрия нафтогазовых свердловин. Київ: ТОВ “Вид-во ЮСТОН”, 2019. 217 с.
8. Миронцов Н.Л. Эффективный метод исследования сложнопостроенных анизотропных пластов-коллекторов в терригенных разрезах. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2012. № 5. С. 119–125.
9. Миронцов Н.Л. Метод распознавания “ошибочных” коллекторов и коллекторов остаточного нефтенасыщения при геофизическом исследовании скважин. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2012. № 4. С. 100–106.
10. Миронцов Н.Л. Аппаратурно-методический комплекс для исследования коллекторов аномально низкого сопротивления. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2012. № 1. С. 117–122.
11. Глинских В.Н., Эпов М.И. Двумерная реконструкция геоэлектрического изображения по данным высокочастотного электромагнитного каротажа. *Каротажник*. 2006. **147**, № 6. С. 59–68.
12. 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.
13. Миронцов Н.Л. Критерий достоверности решения обратной задачи электрометрии скважин. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2018. № 5. С. 16–21. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.05.016>
14. Миронцов Н.Л. Особенности численного решения обратной задачи индукционного каротажа в контрастном скважинном разрезе. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2018. № 2. С. 19–24. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.02.019>
15. Миронцов Н.Л. Численное решение обратной задачи индукционного каротажа для тонкослоистых разрезов типа “рябчик”. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2018. № 1. С. 15–21. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.01.015>

Поступило в редакцию 30.09.2019

REFERENCES

1. Trofymchuk, O. M. & Myrontsov, M. L. (2018). Modern dissertation researches of the Institute of Telecommunications and Global Information Space: Mathematical Modeling and Computational Methods. *Matematychni modelyuvannya v ekonomitsi*, 10, No. 1, pp. 7-30 (in Ukrainian).
2. Trofymchuk, O. M. & Myrontsov, M. L. (2018). Modern dissertation researches of the Institute of Telecommunications and Global Information Space: Information Technologies. *Matematychni modelyuvannya v ekonomitsi*, 11, No. 2, pp. 5-25 (in Ukrainian).
3. Trofymchuk, O. M. & Myrontsov, M. L. (2018). Modern dissertation researches of the Institute of Telecommunications and Global Information Space: Environmental safety. *Matematychni modelyuvannya v ekonomitsi*, 12, No. 3, pp. 7-25 (in Ukrainian).
4. Myrontsov, M. L. (2018). Vector of modern studies of electrometry of oil and gas wells. *Matematychni modelyuvannya v ekonomitsi*, 12, No.3, pp. 26-36 (in Ukrainian).
5. Dovgiy, S. O., Yevdoschuk, M. I., Korjnev, M. M., Kulish, Ye. O., Kurilo, M. M., Malakhov, I. M., Trofimchuk, O. M. & Yakovlev, Ye. O. (2010). Energy resource component of Ukraine's development. Kyiv: Nika-Center (in Ukrainian).
6. Myrontsov, M. L. (2012). Numerical modeling of electrometry in wells. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
7. Myrontsov, M. L. (2019). Eletrometry of oil and gas wells. Kyiv: "Publishing house Yuston" (in Ukrainian).
8. Myrontsov, M. L. (2012). Efficient investigation method for complex structures and anisotropic formations in elastic deposits. *Dopov. Nac. akad. nauk. Ukr.*, No. 5, pp. 119-125 (in Russian).
9. Myrontsov, M. L. (2012). Investigation method for "wrong" formations and the relict oil content under the well logging. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, No. 4, pp. 100-106 (in Russian).
10. Myrontsov, M. L. (2012). Hardware-methodical complex for the investigation of collectors with abnormally low resistance. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, No. 1, pp. 117-122 (in Russian).
11. Glinskyh, V. N. & Epov, M. I. (2006) Two-dimensional reconstruction of a geoelectric image according to high-frequency electromagnetic logging. *Karotagnik*, 147, No. 6, pp. 59-68 (in Russian).
12. Kneller, L. E. & Potapov, A. P. (2010) Determination of electrical resistivity of formations with radial and vertical heterogeneity of a well section. *Geolohiya i geofizyka*, No. 1, pp. 52-64 (in Russian).
13. Myrontsov, M. L. (2018). A criterion of reliability for a solution of the resistivity logging inverse problem. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, No. 5, pp. 16-21 (in Russian). <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.05.016>
14. Myrontsov, M. L. (2018). Features of a numerical solution of the inverse problem of induction logging in the contrast wells. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, No. 2, pp. 19-24 (in Russian). <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.02.019>
15. Myrontsov, M. L. (2018). Numerical solution of the inverse induction logging problem for thin-layered sections ("grouse"-type). *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, No. 1, pp. 15-21 (in Russian). <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.01.015>

Received 30.09.2019

М.Л. Миронцов

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київ
E-mail: myrontsov@ukr.net

РОЗВ'ЯЗАННЯ ОБЕРНЕНОЇ ЗАДАЧІ БОКОВОГО КАРОТАЖНОГО
ЗОНДУВАННЯ В УМОВАХ ТЕРИГЕННОГО РОЗРІЗУ

На прикладі бокового каротажного зондування показана можливість оцінки впливу вміщуючих пластів і граничних ефектів на реальну вертикальну роздільну здатність розв'язання оберненої задачі. Показана можливість покращення такої здатності за допомогою нового підходу до розв'язання оберненої задачі, який дозволяє враховувати кількісний вклад вимірювання кожного зонда в остаточний результат. Наведено приклад такого розв'язання оберненої задачі комплексу "БКЗ+БК" для реального свердловинного матеріалу у терригенному розрізі.

Ключові слова: обернена задача електрометрії, електричний картаж, бокове каротажне зондування, боковий картаж, вертикальна роздільна здатність.

M.L. Myrontsov

Institute of Telecommunications and Global Information Space of the NAS of Ukraine, Kyiv
Email: myrontsov@ukr.net

THE SOLUTION OF THE INVERSE PROBLEM
OF LATERAL LOGGING SOUNDING IN A TERRIGENOUS SECTION

Using the example of lateral logging sounding, the possibility of assessing the influence of the adjacent beds and boundary effects on the real vertical resolution of the inverse problem is shown. It is shown how it is possible to improve this ability using a new approach to solving the inverse problem, which allows one to account for the quantitative contribution of the measurement of each probe to the final result. An example of such solution to the inverse problem of the “BKZ+BK” complex for a real well material in a terrigenous section is given. The following conclusions are made: for the correct use of the algorithm for solving the inverse problem, it is necessary to have an estimate of the vertical resolution of the electrometry method as a whole; a real assessment of the influence of boundary effects on the measurement of the apparent resistance of the probes of the complex allows us to evaluate the effectiveness of the method; the use of the proposed residual functional allows us to change the effect of probes of different lengths on the final result and thereby allows us to achieve a satisfactory accuracy even when studying the geoelectric parameters of formations whose power is less than the length of the largest probes of the electrometric complex. The results of the work were introduced into the production of a number of commercial geophysical organizations.

Keywords: *inverse electrometry problem, electric logging, lateral logging sounding, lateral logging, vertical resolution, numerical simulation, well logging, oil and gas well.*