

doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.01.015>

УДК 519.6, 550.8

Н.Л. Миронцов

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

Численное решение обратной задачи индукционного каротажа для тонкослоистых разрезов типа «рябчик»

Представлено членом-корреспондентом НАН Украины А.Н. Трофимчуком

Рассмотрены особенности численного решения обратной неустойчивой задачи электрометрии скважин на нефть и газ для тонкослоистых разрезов типа «рябчик». Показано, что созданный и реализованный в численном виде алгоритм для четырехзондового индукционного низкочастотного каротажа позволяет количественно и качественно точно решать обратную задачу (в пределах допустимой погрешности).

Ключевые слова: обратная задача, электрометрия скважин, индукционный каротаж.

Геофизические исследования скважин (ГИС) традиционно относят к наукам о Земле. При этом электрометрия скважин, как составляющая ГИС, предоставляет конечному Заказчику геофизических услуг ответы на два главных вопроса [1,2]: где в разрезе, пересеченном скважиной, находятся углеводороды? сколько их там? Актуальность их сложно переоценить в настоящее время [3].

Однако ответы на эти вопросы, как и многие задачи геофизики [4] требует численного решения сложной, неустойчивой по Адамару, математической обратной задачи.

Вообще при решении обратных задач электрометрии [5] принято использовать прямые методы моделирования [6, 7].

Мы будем следовать подходу, который позволяет упрощать прямые вычисления, используя физически содержательные упрощения [8], но так, чтобы конечный результат был представлен в виде, позволяющем его дальнейшее использование геофизиками, то есть в виде информации о каждом пласте-коллекторе в привычном виде [9].

Заметим, что кроме неустойчивости, естественным образом заложенной во многих обратных задачах геофизики, решение обратной задачи электрометрии часто усугубляется и сложными начальными условиями.

На практике геоэлектрические параметры исследуемых объектов (пластов-коллекторов) часто оказываются сопоставимы с величиной пространственного и/или измерительного разрешения используемой аппаратуры [10, 11].

© Н.Л. Миронцов, 2018

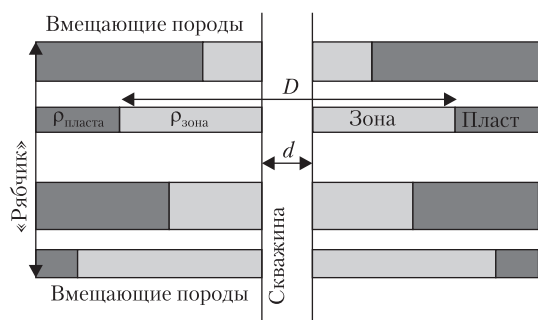


Рис. 1. Модель сложнопостроенного разреза типа «рябчик»: □ — зона проникновения (зона); ■ — незатронутая буровым раствором часть пласта (пласт)

В данной работе представлены результаты успешного численного решения одной из таких неустойчивых задач, а именно задачи определения геоэлектрических параметров тонкослоистых разрезов типа «рябчик».

Изучение «рябчиков» осложняется тем, что существующие аппаратурно-методические комплексы в основном не предоставляют возможности выделять и изучать составляющие «рябчики» пропластки как отдельные объекты.

А именно пропластки-коллекторы и их геоэлектрические параметры в конечном итоге являются основной целью промысловой геофизики.

Из-за существовавших ранее ограничений как пространственного разрешения самой аппаратуры каротажа, так и вычислительных ресурсов для решения ее обратных задач, такие объекты некоторые исследователи даже не выделяли в отдельный класс, считая их всего лишь частным случаем «сложнопостроенного разреза» [12].

В последнее десятилетие ситуация коренным образом изменилась.

Ниже будет изложен алгоритм и дан пример успешного решения обратной задачи индукционного каротажа для тонкослоистых разрезов типа «рябчик».

На рис. 1 приведен пример модели такого разреза. Разрез представляет собой тонкослоистое напластование, в котором пласты-коллекторы чередуются с пропластками без проникновения. Мощность пропластков без проникновения и пластов-коллекторов может варьироваться в пределах 0,5–2,0 м. Само напластование, как правило, имеет суммарную мощность 4–12 м и ограничено вмещающими породами без проникновения. Наиболее типичные параметры такого напластования для ДДВ представлены в таблице.

Если по данным каротажа без дополнительной обработки верно выделяются составляющие «рябчик» пропластки, то само введение нового понятия «рябчик» оказывается лишним и необоснованным. Напротив, если данные каротажа без решения обратной задачи не позволяют уверенно расчленить исследуемый объект на составляющие, то это и есть «рябчик».

Ранее исследование «рябчиков» стандартными методами ГИС состояло в определении неких «средних» по всему напластованию характеристик. Естественно, что такие «усредненные» значения параметров даже качественно не всегда верно описывали геоэлектрические особенности объекта.

Типичные геоэлектрические параметры «рябчика»

Параметр	$\rho_{\text{пласта}}$	$\rho_{\text{зоны}}$	D/d
Вмещающие	1–50	—	—
Пласты-коллекторы	0,2–200	0,2–200	2–15
Пропастки без проникновения	1–50	—	—

Мы не будем рассматривать аппаратный способ повышения достоверности выделения таких объектов [13, 14]. Рассмотрим лишь исключительно возможности численного решения соответствующей обратной задачи.

Приведем алгоритм численного решения обратной задачи для хорошо себя зарекомендовавшей и доступной в Украине аппаратуры четырехзондового индукционного каротажа

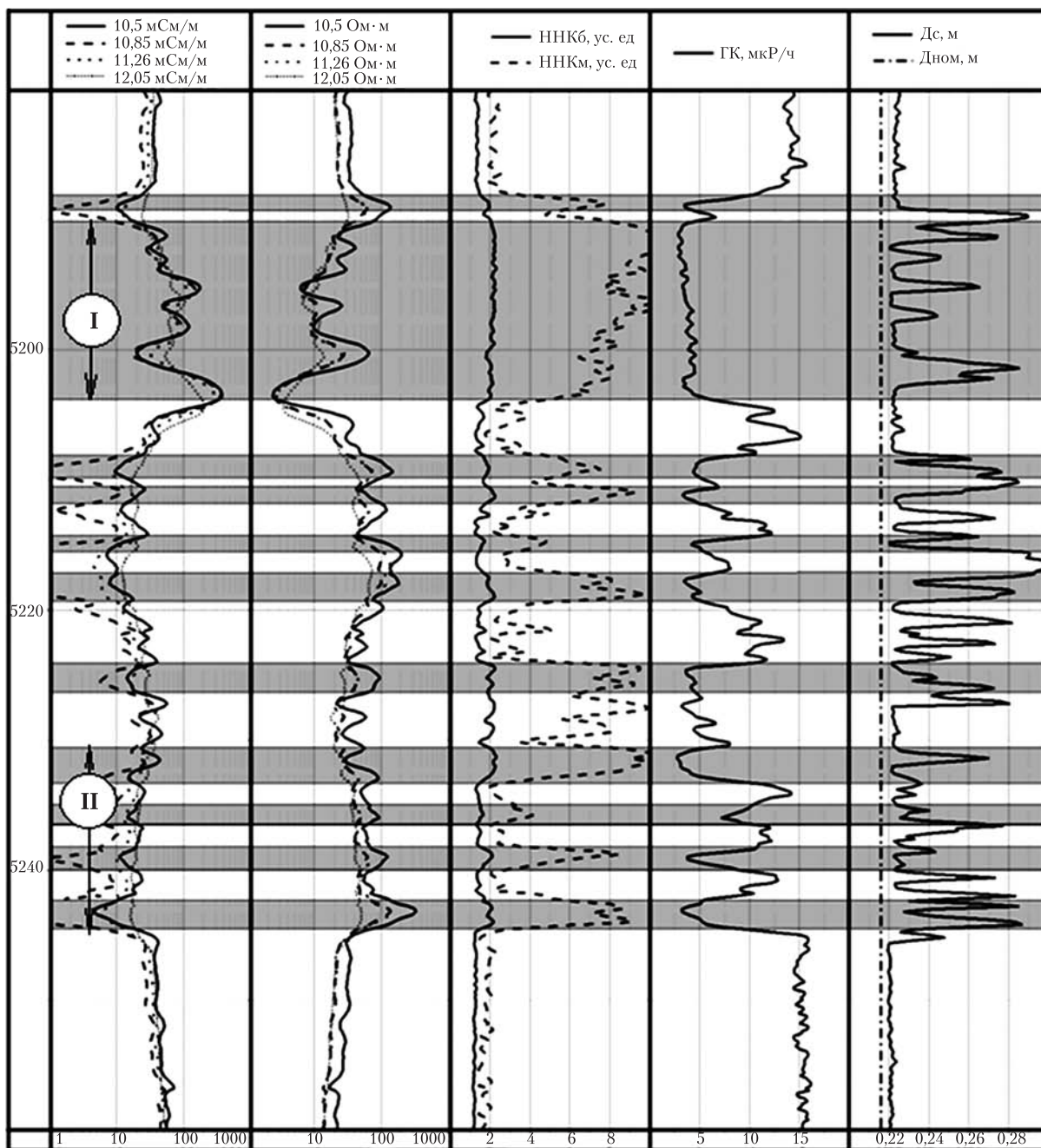


Рис. 2 Каротажные диаграммы тонкослоистого разреза типа «рябчик»: – пласты-коллекторы, выделенные по ГК и 2ННК

(4ИК) [2, 7, 15], который позволит определять геоэлектрические параметры «рябчиков» для условий ДДВ.

На рис. 2 представлены каротажные диаграммы (столбцы: 1 — глубина; 2 — значения измеренной активной составляющей электрической проводимости; 3 — значения кажущегося электрического сопротивления после введения поправок «за скин-эффект», «за скважину» и «за вмещающие»; 4 — данные двухзондового нейтрон-нейтронного каротажа; 5 — данные гамма-каротажа; 6 — кавернометрия).

В обозначении зондов 10,5; 10,85; 11,26; 12,05 цифры означают длину каждого из них в метрах. Для анализа точности выделения пластов-коллекторов мы будем использовать данные гамма-каротажа (ГК), двухзондового нейтрон-нейтронного каротажа (2ННК), а также данные кавернометрии (КМ).

Для начала мы с помощью введения поправок исключим влияние искажающих факторов на величину каждого измерения. Это позволит утверждать, что исправленные таким образом данные зондирования против каждого пласта несут информацию только о нем самом и не зависят от параметров скважины или вмещающих пластов.

И если введение поправки «за влияние скважины» или «за скин-эффект» производится в этом случае без труда, то исключение влияния вмещающих пластов само по себе есть некорректно поставленная по Адамару задача [1, 2, 4].

Это означает, что для того, чтобы иметь возможность рассматривать каждый пропласток как отдельный объект, нам следует факторизовать задачу.

Для этого заметим, что измеряемая зондом кажущаяся проводимость $\tilde{\sigma}$ связана с истинной (искомой) удельной проводимостью σ уравнением Фредгольма первого рода типа свертка:

$$\tilde{\sigma}(z) = \int_L g(z') \sigma(z - z') dz, \quad (1)$$

где z — координата в цилиндрической системе координат; g — вертикальный геометрический фактор зонда.

Чтобы факторизовать задачу, мы представим каждую из функций в (1) в виде ряда Фурье:

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma}(z) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \tilde{\sigma}_n e^{-inz}, \\ \sigma(z-x) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sigma_n e^{-inz} e^{inx}, \\ g(x) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} g_n e^{-inx}, \end{aligned}$$

при этом учтем, что коэффициенты разложения σ_n , $\tilde{\sigma}_n$, g_n будут связаны соотношением:

$$\sigma_n = \frac{\tilde{\sigma}_n}{g_n^*}. \quad (2)$$

Решение представим в виде разложения с коэффициентами, рассчитанными по (2), заметив, что число членов ряда необходимо ограничить условием теоремы Котельникова [2], поскольку известная нам δ определена дискретно со строго заданным шагом вдоль оси скважины (как правило, шаг записи данных каротажа составляет 0,1 или 0,2 м).

Проанализируем полученные таким образом решения.

Воспользуемся для сравнения коллекторских свойств вспомогательными методами КМ, ГК, 2ННК.

Объект I (см. рис. 2) по ГК выделяется как однородный объект, но 2ННК и КМ однозначно показывают его неоднородную структуру. Такому объекту следует присвоить статус «возможный рябчик».

Объект II имеет явно тонкослоистую структуру, что подтверждается и по ГК, и по 2ННК, и по КМ. Этот объект имеет статус «рябчик».

Оказывается, что после введения поправок «за скин-эффект», «за скважину» и «за вмещающие» оба эти объекта хорошо расчленяются на маломощные пропластки различных геоэлектрических параметров и по 4ИК.

Более того, для пропластков, которые по 2ННК, ГК и КМ значение D_c (реальный диаметр скважины) приближается или равно значению $D_{ном}$ (номинальный диаметр скважины) выделяются как «подозрительные на коллектор» данные 4ИК показывают монотонную зависимость показаний зондов комплекса от его длины, что соответствует физическому содержанию понятия «пласт с проникновением».

Следует заметить, что на примере объекта I становится очевидным, что и отбитие границ пластов при изучении «рябчиков» следует выполнять не по вспомогательным методам, таким как ГК, а по одному (самому малому) зонду комплекса электрометрии. Так, на рис. 2 отображены основные границы пластов, соответствующие точкам, в которых вторая производная каротажной кривой зонда 0,5 м равна нулю после процедуры десятикратного сглаживания [2].

Таким образом, основным результатом данной работы стало успешное создание алгоритма решения обратной задачи индукционного каротажа в условиях тонкослоистого напластования и его численной реализации.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Anderson B.I. Modeling and inversion methods for the interpretation of resistivity logging tool response. Delft: Delft Univ. Press, 2001. 377 с.
2. Миронцов Н.Л. Численное моделирование электрометрии скважин. Киев: Наук. думка, 2012. 224 с.
3. Довгий С.О., Евдошук 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.
4. Страхов В.Н. О решении некорректных задач магнито- и гравиметрии, представляемых интегральным уравнением типа свертки. *Физика Земли*. 1967. № 4. С. 36–54.
5. Колосов А.Л. Прямые, смешанные и обратные задачи электрометрии скважин. Киев: Наук. думка, 1985. 196 с.
6. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. Москва: Наука, 1971. 552 с.
7. Миронцов М.Л. Метод розв'язання прямої та зворотної задачі електричного каротажу. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2007. № 2. С. 128–131.
8. Гомилко А.М., Савицкий О.А., Трофимчук А.Н. Методы суперпозиции, собственных функций и ортогональных многочленов в граничных задачах теории упругости и акустики. Киев: Наук. думка, 2016. 433 с.

9. Технология исследования нефтегазовых скважин на основе ВИКИЗ. Методическое руководство. Под ред. М.И. Эпова, Ю.Н. Антонова. Новосибирск: НИЦ ОИГГМ СО РАН. Изд-во СО РАН, 2000. 270 с.
10. Миронцов Н.Л. Метод распознавания "ошибочных" коллекторов и коллекторов остаточного нефтенасыщения при геофизическом исследовании скважин. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2012. № 4. С. 100–105.
11. Миронцов Н.Л. Эффективный метод исследования сложнопостроенных анизотропных пластов-коллекторов в терригенных разрезах. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2012. № 5. С. 119–125.
12. Єгурнова М.Г., Зайковський М.Я., Заворотько Я.М., Цьоха О.Г., Кнішман О.Ш., Муляр П.М., Дем'яненко І.І. Нафтогазоперспективні об'єкти України. Нафтогазоносність та особливості літогеофізичної будови відкладів нижнього карбону і девону Дніпровсько–Донецької западини. Київ: Наук. думка, 2005. 196 с.
13. Миронцов Н.Л. Новый принцип многозондового электрического каротажа. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2010. № 6. С. 103–106.
14. Миронцов Н.Л. Импульсный боковой каротаж с повышенным пространственным разрешением. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2010. № 5. С. 120–122.
15. Myrontsov N. Method for improving the spatial resolution of resistivity logging. *Геофиз. журн.* 2010. №4. С. 119–121.

Поступило в редакцию 19.09.2017

REFERENCES

1. Anderson, B. I. (2001). Modeling and inversion methods for the interpretation of resistivity logging tool response. Delft: Delft University Press.
2. Myrontsov, M. L. (2012). Numerical modeling of electrometry in wells. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
3. 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. Kiev: Nika-Center (in Ukrainian).
4. Strakhov, V. N. (1967). On the solution of ill-posed problems of magneto- and gravimetry, represented by an integral equation of convolution type. *Physics of the Earth*. No. 4, pp. 36-54 (in Russian).
5. Kolosov, A. L. (1985). Direct, mixed and inverse problems of well electrometry. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
6. Samarskii, A. A. (1971) Introduction to the theory of difference schemes. Moscow: Science (in Russian).
7. Myrontsov, M. L. (2007). Method of solving the direct and inverse problems of electric logging. *Dopov. Nac. akad. nauk. Ukr.*, No. 2, pp. 128-131 (in Ukrainian).
8. Gomilko, A. M., Savitsky, O. A. & Trofimchuk, A. N. (2016). Methods of superposition, eigenfunctions and orthogonal polynomials in boundary value problems in the theory of elasticity and acoustics. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
9. Epov, M. I. & Antonov, Yu. N. (Eds.). (2000). Technology of exploration of oil and gas wells based on VIKIZ. Methodical direction. Novosibirsk: Publishing House of SB RAS (in Russian).
10. 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. 100-105 (in Russian).
11. Myrontsov, M. L. (2012). Efficient investigation method for complex structures and anisotropic formations in clastic deposits. *Dopov. Nac. akad. nauk. Ukr.*, No. 5, pp. 119-125 (in Russian).
12. Yegurnova, M. G., Zaikovskiy, M. Ya., Zavorotko, Y. M., Tsoha, O. G., Knishman, O. Sh., Mulyr, P. M. & Demyanenko, I. I. (2005). Oil and gas prospecting facilities of Ukraine. Oil-gas content and features of lithogeophysical construction of deposits of the lower Carboniferous and Devonian of the Dnipro-Donets depression. Kyiv: Naukova Dumka (in Ukrainian).
13. Myrontsov, M. L. (2010). A new principle of multiprobe electric logging. *Dopov. Nac. akad. nauk. Ukr.*, No. 6, pp. 103-106 (in Russian).
14. Myrontsov, M. L. (2010). Pulse lateral logging with high spatial resolution. *Dopov. Nac. akad. nauk. Ukr.*, No. 5, pp. 120-122 (in Russian).
15. Myrontsov, N. L. (2007). A quick method of solving the inverse problem of induction logging. *Geophys. J.*, No. 5, pp. 128-131 (in Ukrainian).

Received 19.09.2017

М. Л. Миронцов

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

**ЧИСЛОВЕ РОЗВ'ЯЗАННЯ ОБЕРНЕНОЇ ЗАДАЧІ ІНДУКЦІЙНОГО КАРОТАЖУ
ДЛЯ ТОНКОШАРУВАТИХ РОЗРІЗІВ ТИПУ «РЯБЧИК»**

Розглянуто особливості числового розв'язання оберненої нестійкої задачі електрометрії свердловин на нафту і газ для тонкошаруватих розрізів типу «рябчик». Показано, що створений і реалізований у числовому вигляді алгоритм для чотиризондового індукційного низькочастотного каротажу дозволяє розв'язувати якісно і кількісно точно обернену задачу (в межах допустимої похибки).

Ключові слова: *обернена задача, електрометрія свердловин, індукційний каротаж.*

M. L. Myrontsov

Institute of Telecommunications and Global Information Space of the NAS of Ukraine, Kiev
E-mail: myrontsov@ukr.net

**NUMERICAL SOLUTION OF THE INVERSE INDUCTION LOGGING PROBLEM
FOR THIN-LAYERED SECTIONS ("GROUSE"-TYPE)**

The features of a numerical solution of the inverse unstable problem for the electrometry of oil and gas wells for thin-layered sections ("grouse"-type) are considered. It is shown that the created and developed algorithm for the four-probe induction low-frequency logging allows one to solve the inverse problem.

Keywords: *inverse problem, electrometry in wells, induction logging.*