

doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.05.016>

УДК 519.6, 550.8

Н.Л. Миронцов

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

Критерий достоверности решения обратной задачи электрометрии скважин

Представлено членом-корреспондентом НАН Украины А.Н. Трофимчуком

Рассмотрен способ численного решения обратной неустойчивой задачи электрометрии скважин на нефть и газ. Показано, что существует возможность введения простого и физически содержательного критерия достоверности найденного решения обратной задачи электрометрии скважин. Приведен пример использования такого критерия для четырехзондового индукционного низкочастотного каротажа в непроницающей скважине.

Ключевые слова: обратная задача, электрометрия скважин, критерий достоверности решения обратной задачи.

Существующие методы решения обратной задачи электрометрии, как составляющей геофизического исследования скважин (ГИС), предоставляют в конечном счете исследователю некий набор чисел. Однако почти всегда у исследователя возникает вопрос: можно ли считать, что найденные числа — это правильное (единственное и устойчивое) решение?

Все чаще возникает ситуация, когда полученные числовые значения с одной стороны являются единственным найденным решением математической задачи, а с другой — не наполненным физическим содержанием и, как следствие, не позволяют исследователю ответить на два главных вопроса промысловой геофизики [1, 2]:

где в разрезе, пересеченном скважиной, находятся углеводороды?
сколько их там?

В настоящее время эти вопросы более чем актуальны [3]. Однако ответ на них требует численного решения обратной, неустойчивой по Адамару, математической задачи, которая часто встречается во многих прикладных науках, в том числе и в геофизике [4].

При решении этой и подобных задач электрометрии итерационными численными методами [5] принято использовать прямые методы моделирования [6, 7].

Весьма эффективным при этом оказывается упрощать некоторые прямые вычисления с помощью физически обоснованных упрощений [8]. Полный результат решения

при этом должен содержать информацию о геоэлектрических параметрах каждого пласта-коллектора [9].

Действительно, если цифровые значения, полученные в результате численного решения, являются значениями параметров некоей модели, то их величины, по крайней мере, не должны противоречить физическому ее содержанию.

Типичным примером такого противоречия может служить возможное нахождение отрицательного значения удельного электрического сопротивления, обеспечивающего минимизацию функционала невязки соответствующей задачи (без дополнительных ограничений на знак этой величины). В этом примере найденное число будет лишено физического смысла.

Для понимания глубины некорректности иногда получаемых математических решений можно разве что вспомнить известный пример “решения” школьных задач типа “полтора землекопа”.

Конечно, для некоторой новой, еще только разрабатываемой аппаратуры, уже на стадии проектирования была заложена максимальная устойчивость измеряемых величин от изменений параметров разреза. Для такой аппаратуры решение обратной задачи становится нечувствительным по отношению ко многим искажающим факторам [10, 11].

Но для большинства эксплуатируемой в Украине геофизической каротажной аппаратуры электрометрии скважин ее пространственное и измерительное разрешение оказывается сопоставимым с величинами геоэлектрических параметров исследуемых объектов (пластов-коллекторов) [12, 13], что значительно усложняет поиск устойчивого и физически содержательного решения.

Также известны случаи, когда существование устойчивого решения для одной и той же аппаратуры зависит от особенностей разреза, в котором выполнялся каротаж [1, 2].

Как понять, что полученное математически решение физически верно? Оказывается, что для многозондовой аппаратуры электрометрии скважин возможно введение и практическое использование простого и физически содержательного критерия достоверности решения обратной задачи, а значит, и эффективности алгоритма ее решения. Суть этого критерия скрыта в особенностях класса моделей пластов, используемых при решении задач электрометрии.

Аппаратура четырехзондового индукционного каротажа (4ИК) [2, 7, 15] предоставляет нам четыре независимых значения для каждого положения прибора в скважине. Соответственно, мы можем определять значения максимум четырех неизвестных параметров для этого положения.

Считая радиус скважины r и ее удельное электрическое сопротивление ρ_c (УЭС) известными, мы таким образом можем достоверно определить остальные неизвестные параметры так называемой трехслойной модели пласта (рис. 1).

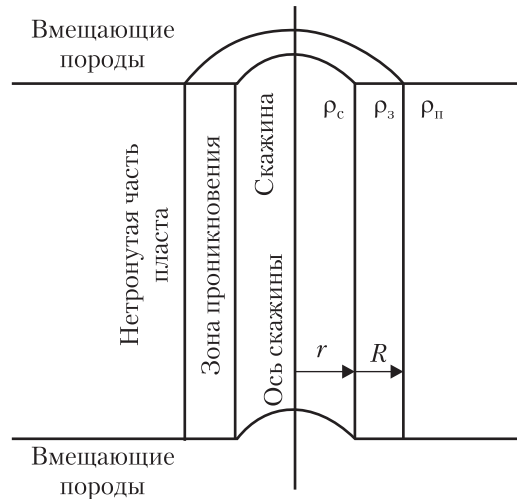


Рис. 1. Трехслойная модель пласта

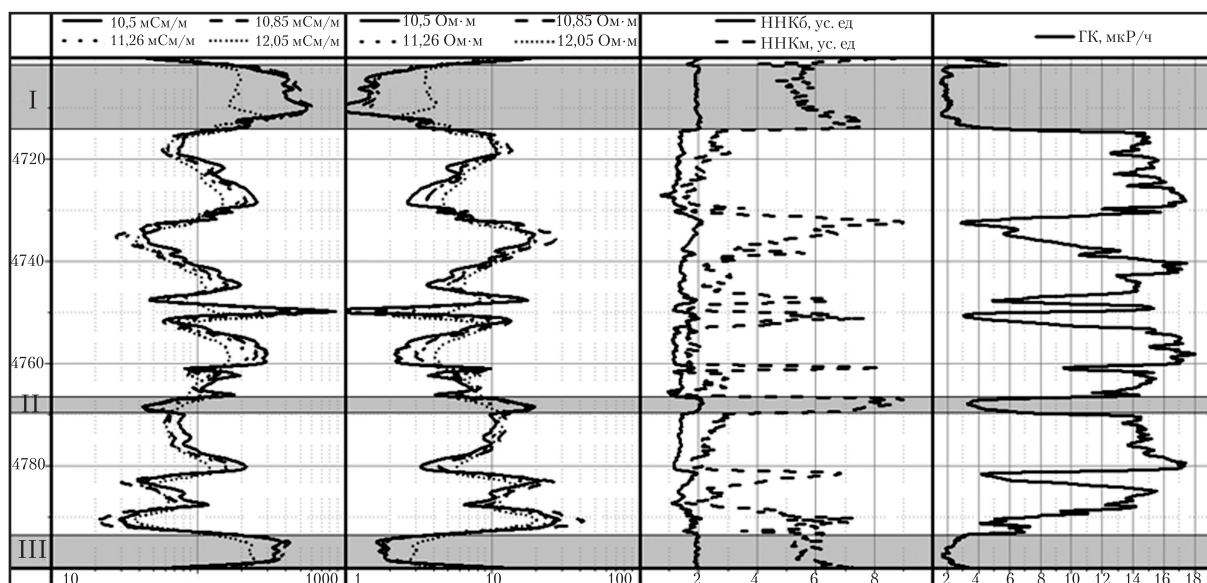


Рис. 2. Каротажные диаграммы (УЭС бурового раствора $300 \pm 3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$): – пласты-коллекторы (I, III – водонасыщенные; II – газонасыщенные)

Параметры пластов-коллекторов

№	Кажущаяся электрическая проводимость, мСм/м				Исправленное удельное электрическое сопротивление, Ом·м				Насыщение
	10.5	10.85	11.26	12.05	10.5	10.85	11.26	12.05	
1	553,8	611,8	508,8	179,15	1,33	2,25	2,28	3,79	Водонасыщенный
2	49,2	50,5	68,9	80,2	19,3	9,6	9,3	6,7	Газонасыщенный
3	370,8	421,4	389,8	217,5	1,9	2,0	2,0	3,1	Водонасыщенный

Искомыми параметрами будут: УЭС незатронутой буровым раствором части пласта (УЭС пласта) – $\rho_{п1}$; УЭС зоны проникновения (УЭС зоны) – ρ_3 ; диаметр зоны проникновения (диаметр зоны) – R . Такая задача будет даже переопределена: по четырем известным мы определяем значения трех неизвестных параметров.

На рис. 2 представлены соответствующие каротажные диаграммы (столбцы: 1 – глубина; 2 – значения измеренной активной составляющей электрической проводимости; 3 – значения кажущегося УЭС с учетом поправок “за скин-эффект”, “за скважину”; 4 – данные двухзондового нейтрон-нейтронного каротажа; 5 – данные гамма-каротажа). В обозначении зондов 10.5; 10.85; 11.26; 12.05 цифры означают длину зонда в метрах.

Введение поправок “за скин-эффект”, “за скважину”, “за вмещающие” всегда предоставит исследователю исправленные значения [1, 2], но не предоставит информацию, насколько эти данные согласуются с физическим содержанием модели.

Критерием такого согласования может служить эксплуатационная проверка наличия притока полезного флюида из интервалов, которые в ходе решения обратной задачи были

определены как пласты-коллекторы его содержащие. Более того, это единственный критерий эффективности алгоритма с точки зрения промысловой геофизики.

Однако с целью финансовой экономии подобный критерий было бы целесообразно иметь в наличии еще до этапа фактического использования результатов электрометрии.

Поэтому целью настоящего исследования стала возможность оценки эффективности (с точки зрения дальнейшей эксплуатации) алгоритма решения обратной задачи электрометрии до этапа внедрения его результатов в промышленную эксплуатацию.

Какое физическое отличие пласта-коллектора от плотного пласта без проникновения заложено в выбранной нами трехслойной модели?

С точки зрения электрометрии: у пласта-коллектора $\rho_{\text{п}} \neq \rho_{\text{з}}$; у плотного пласта без проникновения: $\rho_{\text{п}} = \rho_{\text{з}}$. Это означает, что после введения поправок “за скин-эффект”, “за скважину” и “за вмещающие”, то есть когда исправленные данные многозондового каротажа содержат информацию только о зоне и пласте, изменение величины показаний зондов должно монотонно меняться в зависимости от размера зонда.

Продемонстрируем это для скважины, заполненной буровым раствором УЭС 300 ± 3 Ом·м (рис.2). Такое значение УЭС раствора позволяет уверенно исключить влияние скважины [2].

Сравнивая тогда данные исправленной таким образом электрометрии с данными гамма-каротажа и нейтрон-нейтронного каротажа, мы без количественного решения обратной задачи можем утверждать, что на представленном интервале у пластов-коллекторов $\rho_{\text{п}} \neq \rho_{\text{з}}$, а у плотных пластов без проникновения — $\rho_{\text{п}} = \rho_{\text{з}}$.

Более того, сравнение неисправленных и исправленных данных для пластов-коллекторов, содержащих полезный флюид, показывает, что введение поправок меняет показания данных зонда в пластах-коллекторах таким образом, что показания, полученные каждым зондом, зависят монотонно от его длины (см. таблицу).

Под монотонным изменением понимается следующее: увеличение значений УЭС с увеличением длины зонда (для так называемых пластов с понижающим проникновением) или уменьшение УЭС с увеличением длины зонда (для так называемых пластов с повышающим проникновением).

Это означает, что критерий достоверности решения обратной задачи использует физическое содержание моделей, определяющих класс возможных решений. В нашем случае (для трехслойной модели) возможных решений может быть только два: пласт-коллектор ($\rho_{\text{п}} \neq \rho_{\text{з}}$) и плотный пласт без проникновения ($\rho_{\text{п}} = \rho_{\text{з}}$).

Таким образом, физическое содержание, основанное на особенностях проводимости, определяет критерий достоверности решения обратной задачи: после введения поправки “за скин-эффект”, “за скважину” и “за вмещающие” для каждого положения аппаратуры в скважине показания всех зондов могут или совпадать (против плотных пластов без проникновения), или отличаться (для пластов-коллекторов) изменяясь строго монотонно в зависимости от длины зонда. Последнее также определяет и тип проникновения пласта.

Также нельзя не заметить, что наличие достоверно известных коллекторских характеристик (по гамма-каротажу, нейтрон-нейтронному каротажу и т.д.) на исследуемом интервале опорного пласта только увеличит достоверность предложенного алгоритма решения обратной задачи электрометрии, использующего введенный нами критерий.

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 электротометрии скважин. Киев: Наук. думка, 2012. 224 с.
3. 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.
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 электротометрии 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: Эпов М.И., Антонов Ю.Н. (ред.). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 270 с.
10. Миронцов Н.Л. Импульсный боковой каротаж с повышенным пространственным разрешением. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2010. № 5. С. 120–122.
11. Миронцов Н.Л. О методе импульсного индукционного каротажа. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2010. № 7. С. 110–112.
12. Миронцов Н.Л. Аппаратурно-методический комплекс для исследования коллекторов аномально низкого сопротивления. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2012. № 1. С. 117–122.
13. 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.
14. 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.
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. Kiev: 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. Samarskiy, A. A. (1971) Introduction to the theory of difference schemes. Moscow: Nauka (in Russian).
7. Myrontsov, N. L. (2007). Method of solving the direct and inverse problem 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. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).

9. Епов, М. І., Антонов, Ю. Н. (Eds.). (2000). Technology of exploration of oil and gas wells based on VIKIZ. Methodical direction. Novosibirsk: Izd. SO RAN (in Russian).
10. Myrontsov, M. L. (2010). Pulse lateral logging with high spatial resolution. *Dopov. Nac. akad. nauk. Ukr.*, No. 5, pp. 120-122 (in Russian).
11. Myrontsov, M.L. (2010). On the method of electromagnetic-pulse logging. *Dopov. Nac. akad. nauk. Ukr.*, No. 7, pp. 110-112 (in Russian).
12. 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).
13. 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).
14. Yegurnova, M. G., Zaikovsky, 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 litho-geophysical construction of deposits of the lower Carboniferous and Devonian of the Dnipro-Donets depression. Kiev: Naukova Dumka (In Ukrainian).
15. Myrontsov, N. L. (2007). A quick method of solving the inverse problem of induction logging. *Geophys. J.*, No. 5, pp. 128-131.

Received 19.09.2017

М.Л. Миронцов

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

КРИТЕРІЙ ДОСТОВІРНОСТІ РОЗВ'ЯЗКУ ОБЕРНЕНОЇ ЗАДАЧІ ЕЛЕКТРОМЕТРІЇ СВЕРДЛОВИН

Розглянуто спосіб числового розв'язання оберненої нестійкої задачі електрометрії свердловин на нафту і газ. Показано, що існує можливість ввести простий та фізично змістовний критерій достовірності знайденого розв'язку оберненої задачі електрометрії свердловин. Наведено приклад використання такого критерію для чотиризондового індукційного низькочастотного каротажу в непровідній свердловині.

Ключові слова: обернена задача, електрометрія свердловин, критерій достовірності розв'язку оберненої задачі.

M.L. Myrontsov

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

A CRITERION OF RELIABILITY FOR A SOLUTION OF THE RESISTIVITY LOGGING INVERSE PROBLEM

The method of numerical solution of the inverse unstable problem of resistivity logging for oil and gas is considered. It is shown that it is possible to introduce a simple physically meaningful criterion of reliability for a solution of the resistivity logging inverse problem. An example of the use of this criterion for four-probe low-frequency induction logging in a nonconducting well is given.

Keywords: inverse problem, electrometry in wells, criterion of reliability for a solution of the inverse problem.