

## МЕТОДИКА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК (571.53)550.379:372

DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(133-138)

**В. С. ЕМЕЛЬЯНОВ<sup>2</sup>, И. В. БУДДО<sup>1</sup>, М. В. ШАРЛОВ<sup>2</sup>, Н. В. МИСЮРКЕЕВА<sup>2</sup>,  
А. В. ПОСПЕЕВ<sup>1</sup>, Ю. А. АГАФОНОВ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Иркутский научный центр СО РАН,

664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134, Россия, biv@ierp.ru, avp@ierp.ru

<sup>2</sup> АО «Иркутское электроразведочное предприятие», 664011, Иркутск, ул. Рабочая, 2а,  
Бизнес-центр «Премьер», Россия, evs@ierp.ru, smv@ierp.ru, mnv@ierp.ru, aua@ierp.ru

### ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГОРИЗОНТОВ-КОЛЛЕКТОРОВ ПО ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ДАННЫМ

*В геологическом плане разрез Ковыктинского газоконденсатного месторождения и окружающих территорий сложен тремя геоэлектрическими комплексами: надсолевым терригенно-карбонатным, карбонатно-галогенным и залегающим на фундаменте терригенно-карбонатным подсоевым. В пределах двух нижних комплексов региональным распространением пользуются горизонты-коллекторы, в ряде которых установлены промышленные залежи углеводородов. Из-за наличия проводящих высокоминерализованных поровых растворов коллекторы характеризуются пониженным удельным электрическим сопротивлением, что обуславливает геологическую эффективность электромагнитных методов при оконтуривании зон развития коллекторов.*

*Метод зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) традиционно применяется в Восточной Сибири при поисках и разведке месторождений углеводородов. Современные технологии математического моделирования и инверсии сигналов ЗСБ позволяют определять геоэлектрические характеристики не только интервалов разреза мощностью в сотни метров, но и непосредственно горизонтов-коллекторов. Соответственно, встает вопрос о точности определения удельного электрического сопротивления каждого из горизонтов.*

*Для решения поставленной задачи разработана оригинальная методика синтезирования и зашумления сигналов ЗСБ, а также их инверсии с расчетом погрешности восстановления удельного электросопротивления каждого из горизонтов разреза. Для проведения инверсии использованы автоматизированные процедуры минимизации, основанные на алгоритме метода Монте-Карло. Снижение затрат времени на инверсию достигнуто путем использования стартовых моделей по результатам ручной инверсии с закреплением оптимального размаха вариаций удельного электрического сопротивления.*

*Рассмотрены модели продольного сопротивления слоя, включающего различные по проводимости горизонты, оценена степень интегральности указанных геоэлектрических параметров. Использование предложенной методики позволило оценить достоверность прогноза наличия коллекторов в осадочном чехле в зависимости от контраста их геоэлектрических свойств и глубины залегания.*

*Ключевые слова: сигналы зондирования становлением поля в ближней зоне, удельное электрическое сопротивление, инверсия, коллектор, нефть и газ.*

**V. S. EMEL'YANOV<sup>2</sup>, I. V. BUDDO<sup>1</sup>, M. V. SHARLOV<sup>2</sup>, N. V. MISYURKEEVA<sup>2</sup>,  
A. V. POSPEEV<sup>1</sup>, AND YU. A. AGAFONOV<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Irkutsk Scientific Center SB RAS, 664033, Irkutsk, Lermontova str., 134, Russia, biv@ierp.ru, avp@ierp.ru

<sup>2</sup> JSC «Irkutsk Electroprospecting Company» (IERP), 664011, Irkutsk, Rabochaya str., 2a,  
Premier Business-Center, Russia, evs@ierp.ru, smv@ierp.ru, mnv@ierp.ru, aua@ierp.ru

### THE ACCURACY OF GEOELECTRIC HORIZONS RESISTIVITY ESTIMATION USING ELECTROMAGNETIC DATA

*In geological terms the section of the Kovykta gas condensate field and the surrounding areas is composed by three geoelectric complexes—the post-salt terrigenous-carbonate; carbonate-halogen; and the pre-salt terrigenous-carbonate, lying at the basement. Within the two lower complexes reservoir horizons are spread regionally, with some of them bearing commercial hydrocarbons.*

© 2016 Емельянов В. С., Буддо И. В., Шарлов М. В., Мисюркеева Н. В.,  
Поспеев А. В., Агафонов Ю. А.

rocarbon deposits. Due to the presence of conductive saline pore solutions, the reservoirs are characterized by low electrical resistivity. This leads to the geological effectiveness of the use of electromagnetic methods in the delineation of the zones of reservoir development.

*Transient electromagnetic soundings in the near field zone (TEM) is traditionally applied in Eastern Siberia in prospecting and exploration of hydrocarbon accumulations. Modern technologies of mathematical modeling and inversion of TEM signals allow to define geoelectric characteristics not only in the intervals whose thickness measures hundreds of meters, but also directly in thin reservoirs. Accordingly, the question arises on the accuracy of the electrical resistivity determination in each of the horizons.*

*To solve this problem an original technique was developed consisting in synthesizing and noising of TEM signals and their inversion with estimation of resistivity recovery error of each horizon. Using the proposed method allows to evaluate the accuracy of the of reservoirs prediction in the sedimentary cover from TEM studies. To provide the inversion the automated minimization procedure based on the algorithm of the Monte Carlo method was used. The starting models based on the results of manual inversion and optimal scale of layers resistivity variations were used for reduction of the inversion time.*

*The model of the longitudinal resistance of the layer comprising different conductivity horizons, evaluates the integrity of these geoelectric parameters considered. The use of the proposed method allowed us to estimate the accuracy of prediction of the presence of reservoirs in the sedimentary cover, depending on the resistivity contrast their properties and depth.*

Keywords: TEM signals, electrical resistivity, inversion, reservoir, oil and gas.

## ВВЕДЕНИЕ

Метод зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) в течение нескольких десятилетий успешно применяется при решении нефтегазопроисковых задач в Восточной Сибири. На территории Ковыктинского газоконденсатного месторождения (ГКМ) подобные работы проводятся с середины 90-х гг. прошлого века. Совершенствование технологий электромагнитных исследований позволило существенно повысить разрешающую способность и детальность метода [1, 2].

Методика, позволяющая выполнить достоверные оценки ошибки определения удельного электрического сопротивления (УЭС) по результатам инверсии кривых ЗСБ в зависимости от геоэлектрических особенностей разреза и уровня электромагнитного шума (ЭМ) [3], разработана и протестирована в условиях Ковыктинского ГКМ.

## ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ И ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОВЫКТИНСКОГО ГКМ

Геологический разрез Ковыктинского газоконденсатного месторождения сложен нижнепалеозойскими породами суммарной мощностью до 3,5 км [4].

*Верхний (первый) геоэлектрический комплекс* включает отложения ордовика и средневерхнего кембрия и подразделяется на несколько горизонтов с продольным сопротивлением от 10–30 до 300–500 Ом·м. Мощность комплекса составляет 450–650 м, продольная проводимость — 2–3 См.

*Второй геоэлектрический комплекс* включает карбонатно-галогенные отложения нижнего и среднего кембрия. Он состоит из ряда горизонтов высокого и низкого сопротивления. Высокоомными (200–800 Ом·м) являются пласты солей, плотных доломитов литвинцевской, ангарской, булайской, бельской и усольской свит. Низкоомные (9–80 Ом·м) горизонты — это трещиноватые карбонатные коллекторы (келорский, бильчирский, биркинский, атовский, христофоровский), выделяемые в разрезе вышеуказанных свит. Суммарная мощность комплекса достигает 1800 м, продольная проводимость — 5–6 См.

*Третий геоэлектрический комплекс* представлен терригенными отложениями чорской свиты, карбонатными отложениями даниловского горизонта и нижней части усольской свиты (осинский горизонт). На фоне высокоомных пород выделяются низкоомные карбонатный (осинский) и терригенный коллекторы (парфёновский) с продольным сопротивлением 3,8–7,8 Ом·м. Суммарная мощность комплекса достигает 750 м.

*Четвертый геоэлектрический комплекс* отражает поведение кристаллического фундамента; его сопротивление превышает многие сотни ом-метров.

Пониженное удельное электрическое сопротивление горизонтов-коллекторов связано с наличием высокоминерализованных проводящих пластовых вод, полностью или частично заполняющих их поровое пространство [5].

Интегральные геоэлектрические характеристики модели зависят от степени дифференциации УЭС входящих в нее компонентов. В том случае, когда УЭС отдельных подгоризонтов в пределах слоя меняется незначительно, его продольное сопротивление является объективной исчерпывающей геоэлектрической характеристикой. Продольная проводимость в этом случае является интегральным параметром, величина которого зависит от толщины слоя, и ее использование не столь удобно.

В случае, когда УЭС в пределах «толстого» слоя варьирует значительно, продольное сопротивление также становится интегральным параметром. Если высокоомный геоэлектрический горизонт с фоновым сопротивлением  $\rho_{\phi}$  содержит тонкие пласти-коллекторы с конечной проводимостью, то продольная проводимость горизонта определяется как

$$\rho_l = h / \left( \sum_{i=2}^n \frac{h_i}{\rho_i} \right), \quad (1)$$

где  $h_i, \rho_i$  — толщины и удельные сопротивления подгоризонтов соответственно. Полагая УЭС непроводящей матрицы  $\rho_{\phi}$ , толщину  $h_{\phi}$ , проводимость коллекторов  $S_k$ , толщину  $h_k$ , так что  $\rho_{\phi} \gg \rho_k$  и  $h_{\phi} \gg h_k$ , из (1) получим

$$\rho_l = h / \left( \sum \frac{h_{\phi}}{\rho_{\phi}} + S_k \right) = \frac{h}{S_{\phi} + S_k}. \quad (2)$$

Отсюда следует, что для моделей «непроводящая матрица + проводящие коллекторы» исчерпывающей геоэлектрической характеристикой, позволяющей оценивать коллекторские свойства разреза, является проводимость. Из формулы (2) следует

$$S_k = S - \frac{h_{\phi}}{\rho_{\phi}}. \quad (3)$$

Для определения продольного сопротивления непосредственно коллектора требуется информация об его эффективной толщине и фоновой проводимости непроводящей матрицы.

#### МЕТОДИКА СИНТЕЗИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ ЗАШУМЛЕННЫХ СИГНАЛОВ ЗСБ

Реальные сигналы становления, наблюдаемые в полевых условиях, осложнены композицией ЭМ-помех различного происхождения. Распределение ЭМ-шума во временной области, как правило, не является нормальным, так как наблюдаемый сигнал может содержать стационарные, периодические (промышленные 50 Гц) и аperiodические помехи.

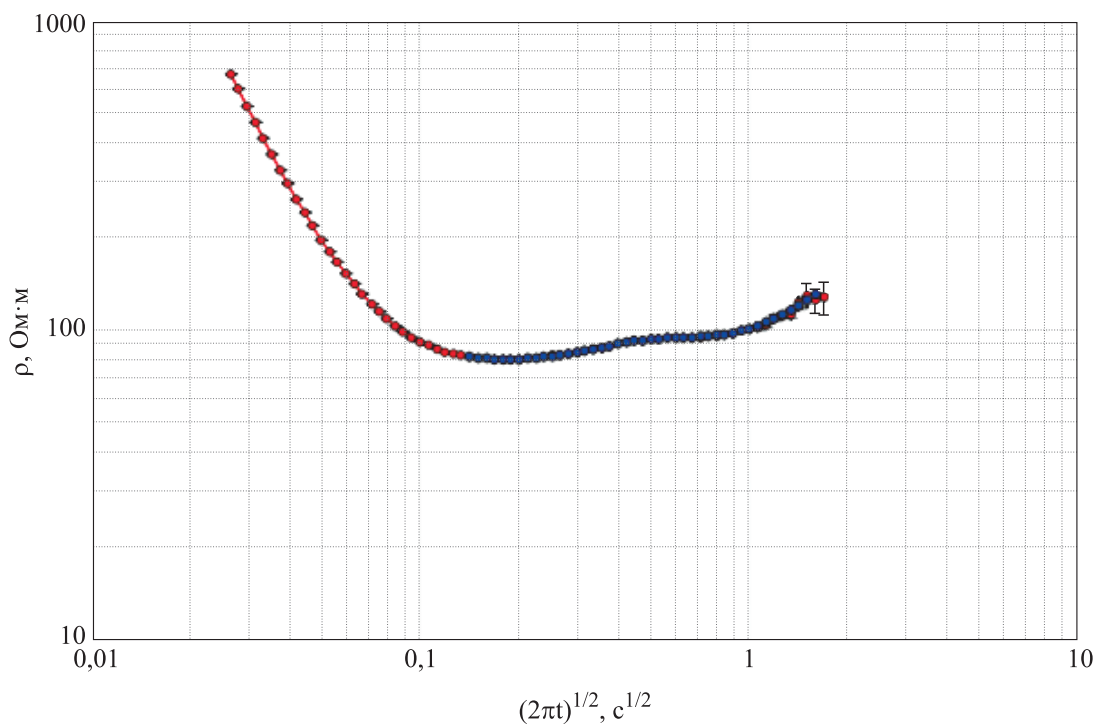


Рис. 1. Синтезированная кривая кажущегося сопротивления, осложненная влиянием «реального» шума.

Для максимального приближения предлагаемой методики к практической ситуации исследовалась погрешность инверсии модельных кривых ЗСБ, «нагруженных» реальными электромагнитными шумами, содержащимися в базе данных АО «ИЭРП». При этом использовались геоэлектрические разрезы Ковыктинского ГКМ с типичными вариациями геоэлектрических параметров. Далее сгенерированные данные проходили автоматическую обработку в программе TEM-Processing. Основными операциями автоматической обработки являются: внутрисерийное робастное осреднение, интерполяция осредненных сигналов на логарифмической временной сетке «Цикл», межсерийное суммирование, оценка дисперсии сигналов [6].

В результате обработки было получено более 100 уникальных кривых, информативную составляющую которых представляет синтетический сигнал от заданной геоэлектрической модели, при этом каждая кривая осложнена собственным уровнем ЭМ-шума, оставшегося в сигнале после традиционных процедур обработки сигналов ЗСБ. Синтезированная кривая ЗСБ, осложненная влиянием «реального» шума, приведена на рис. 1.

### МЕТОДИКА ИНВЕРСИИ СИГНАЛОВ ЗСБ

При проведении инверсии синтетических кривых ЗСБ использовалась 1D-задача геоэлектрики для неполяризуемого разреза с закрепленной геометрией (мощности и глубины залегания слоев не изменялись). Применялся алгоритм минимизации целевой функции, реализованный на основе метода Монте-Карло с элементами имитации отжига. С целью снижения эквивалентности решений была применена регуляризация обратной задачи путем определения доверительного интервала поиска для каждого слоя модели. Диапазон выбирался исходя из типа горных пород и характерных для них УЭС (рис. 2) [7].

Стартовая геоэлектрическая модель формировалась на основе данных ручной инверсии и задавалась со ступенчатым изменением продольного сопротивления слоев в первом геоэлектрическом комплексе и набором залегающих ниже в относительно непроводящей матрице с УЭС  $\approx 800$  Ом·м слоев-коллекторов (биркинский, атовский, христофоровский, осинский, парфёновский) [8].

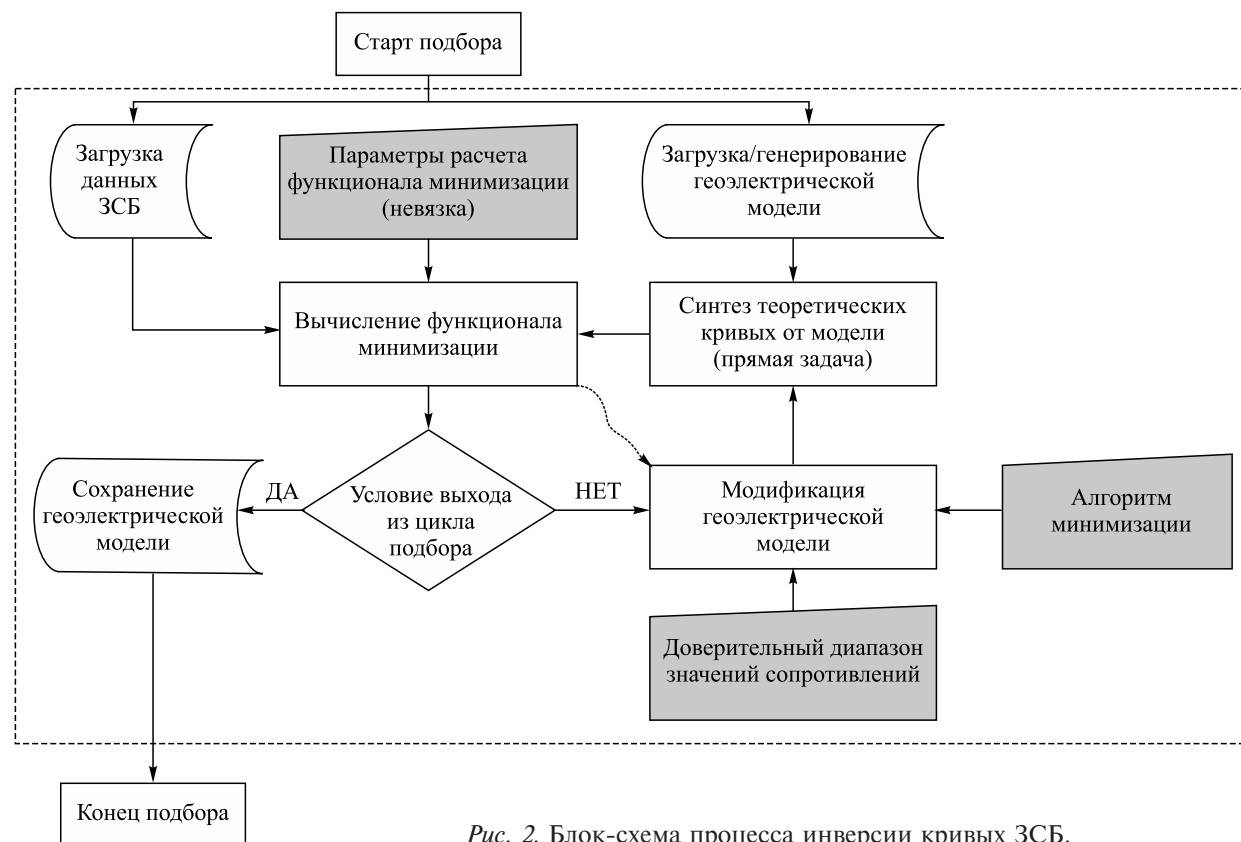


Рис. 2. Блок-схема процесса инверсии кривых ЗСБ.

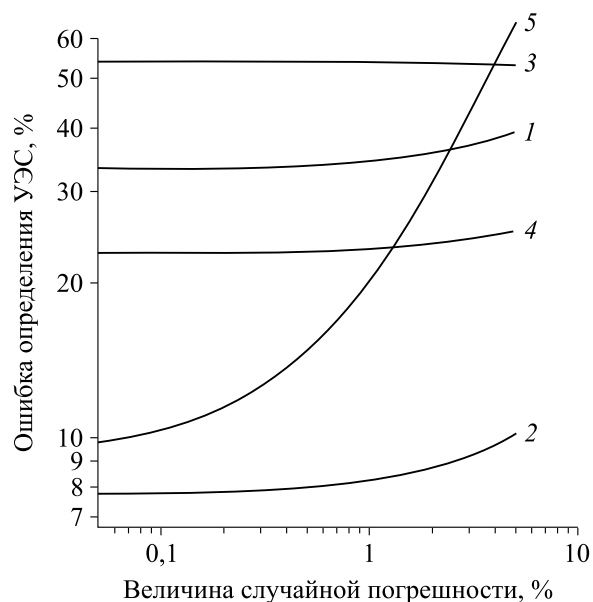
Рис. 3. Зависимость погрешности восстановления УЭС горизонтов-коллекторов от величины случайной погрешности.

Горизонты-коллекторы: 1 — атовский, 2 — биркинский, 3 — христофоровский, 4 — осинский, 5 — парфёновский.

В качестве функционала невязки использовалось среднее квадратическое расхождение практической и теоретической кривых в усеченном временном окне.

За счет применения стохастической составляющей алгоритм минимизации позволяет обойти попадание в локальные минимумы, а многомерная градиентная составляющая дает возможность подбора параметров нескольких слоев. Это обеспечивает большую устойчивость и быстродействие алгоритма.

Поскольку эффективность работы многомерных алгоритмов в значительной степени зависит от близости стартовой модели к истинной, для каждого слоя модели был сформирован доверительный диапазон поиска, примерно равный удвоенной реальной дисперсии геоэлектрических параметров горизонтов. Практически использовались следующие значения продольного сопротивления горизонтов-коллекторов, а также нижние и верхние пределы поиска соответственно: биркинский — 9,6; 4,8; 19,2 Ом·м; атовский — 72; 36; 140 Ом·м; христофоровский — 260; 130; 500 Ом·м; осинский — 7,8; 4; 16 Ом·м; парфёновский — 3,8; 1,9; 7,6 Ом·м.



## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В ходе исследований создан представительный банк синтетических кривых ЗСБ различного качества. Дальнейшая инверсия кривых позволит оценить точность восстановления УЭС каждого из целевых горизонтов-коллекторов.

По результатам автоматической инверсии определена точность восстановления УЭС горизонтов-коллекторов типовой геоэлектрической модели Ковыктинского ГКМ (рис. 3).

Как видно на рис. 3, наивысшая погрешность определения УЭС характерна для христофоровского горизонта. Для атовского и осинского горизонтов она существенно ниже. Разница погрешностей инверсии легко объясняется различной геоэлектрической контрастностью коллекторов и глубиной их залегания. Если учесть, что реальные погрешности инверсии (среднеквадратические расхождения практических и теоретических кривых) в 95 % случаев составляют 0,2–1 %, это оказывается достаточным для определения геоэлектрических параметров осинского, биркинского и парфёновского горизонтов с погрешностью не хуже 25 %.

## ВЫВОДЫ

1. Особенность разработанной методики оценки погрешности определения УЭС в зависимости от уровня шума заключается в оригинальном подходе зашумления кривых, оптимизированном графе инверсии и получении вероятностной оценки.

2. Применение предложенной методики позволяет на стадии опережающего моделирования оценить вероятную точность определения УЭС целевых горизонтов разреза, а следовательно, и достоверность решения геологических задач.

3. Погрешность восстановления УЭС горизонтов напрямую зависит от величины их продольной проводимости, глубины залегания и качества кривых ЗСБ (уровня электромагнитного шума). Если в искомом интервале (горизонте) проявляется коллектор, его геоэлектрические параметры могут быть восстановлены по результатам инверсии ЗСБ с известной точностью.

*Работа выполнена в рамках Интеграционной программы ИНЦ СО РАН «Фундаментальные исследования и прорывные технологии как основа опережающего развития Байкальского региона и его межрегиональных связей».*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов А. С., Горлов И. В., Яицкий Н. Н., Горский О. М. и др. Интеграция геолого-геофизических данных — путь к созданию достоверной модели Ковыктинского газоконденсатного месторождения // Геология нефти и газа. — 2016. — № 2. — С. 56–66.
2. Агафонов Ю. А., Кондратьев В. А., Ольховик Е. А., Пашевин А. М., Поспеев А. В. Результаты применения новых технологий электромагнитных зондирований на юге Сибирской платформы // Разведка и охрана недр. — 2004. — № 8–9. — С. 26–28.
3. Гусейнов Р. Г., Петров А. В., Агафонов Ю. А., Шарлов М. В. и др. Система оценки качества сигналов нестационарных электромагнитных зондирований // Вестн. ИргТУ. — 2015. — № 5. — С. 53–60.
4. Ващенко В. А., Мандельбаум М. М. Геофизические исследования в скважинах юга Сибирской платформы // Геофизика. Спец. вып. «Иркутскгеофизика». — 1999. — С. 49–55.
5. Турицын К. С., Мандельбаум М. М. Петрофизические закономерности формирования пористости песчаных коллекторов на Ковыктинском месторождении // Там же. — С. 56–58.
6. Шарлов М. В., Агафонов Ю. А., Стефаненко С. М. Современные телеметрические электроразведочные станции SGS-TEM и FastSnap. Эффективность и опыт использования // Приборы и системы разведочной геофизики. — 2010. — № 1 (31). — С. 27–31.
7. Емельянов В. С., Гусейнов Р. Г., Буддо И. В., Агафонов Ю. А. Оценка устойчивости решения обратной задачи ЗСБ на основе инверсии зашумленных синтетических кривых // Тезисы докл. междунар. конф. EAGE «GeoBaikal 2016». — Иркутск, 2016. — <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=86376>
8. Поспеев А. В., Буддо И. В., Агафонов Ю. А., Кожевников Н. О. Выделение пластов-коллекторов в разрезе осадочного чехла юга Сибирской платформы по данным зондирований становлением электромагнитного поля в ближней зоне // Геофизика. — 2010. — № 6. — С. 47–52.

*Поступила в редакцию 26 октября 2016 г.*

---