

О. П. Темирбулатов^{1,2}, И. В. Михайлов^{1,2}, И. В. Суродина^{2,3}*

Влияние вмещающих пород на сигналы российских зондов электрокаротажа в горизонтальных скважинах (трехмерное моделирование)

¹ Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск,
Российская Федерация

² Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация

³ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: TemirbulatovOP@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В настоящее время в нефтегазовой отрасли широко распространено горизонтальное бурение скважин из-за большего получаемого дебита нефти и возможности более детального изучения нефтегазового месторождения. Для исследования разрезов горизонтальных скважин широко используются зонды электрокаротажа. Для отечественной практики актуально изучение таких скважин с помощью нового электромагнитного зонда с тороидальными катушками (ЗЭТ). В частности, не рассматривалось влияние вмещающих толщ на сигналы данного прибора. По этой причине, целью текущего исследования является изучение влияния вмещающих отложений на сигналы электромагнитного зонда с тороидальными катушками ЗЭТ, а также сопоставительный анализ с сигналами широко применяемых в российской практике зондов: высокочастотного индукционного каротажного изопараметрического зондирования (ВИКИЗ) и бокового каротажного зондирования (БКЗ). Выполнен анализ влияния вмещающих отложений на сигналы перечисленных зондов электрокаротажа. Сигналы были рассчитаны с помощью программ конечно-разностного трехмерного моделирования в моделях с горизонтальными скважинами и с использованием вычислительных ресурсов Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН. В результате данного исследования показано, что на значения сигналов ЗЭТ большее влияние оказывают непроводящие вмещающие толщи, в то время как на показания кажущегося сопротивления по БКЗ и сигналы ВИКИЗ, наоборот, проводящие вмещающие отложения оказывают большее влияние, чем резистивные.

Ключевые слова: электрокаротаж, горизонтальные скважины, влияние вмещающих пород, численное моделирование

О. П. Temirbulatov^{1,2}, I. V. Mikhaylov^{1,2}, I. V. Surodina^{2,3}*

Influence of shoulder beds on the Russian electromagnetic tools' signals in horizontal wells (three-dimensional simulation)

¹ Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

² Institute of petroleum geology and geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

³ Institute of computational mathematics and mathematical geophysics SB RAS, Novosibirsk,
Russian Federation

* e-mail: TemirbulatovOP@ipgg.sbras.ru

Abstract. Currently, horizontal well drilling is widespread in the oil and gas industry due to the greater oil production rate and the possibility of better exploration of oil and gas fields. To study the

sections of horizontal wells, resistivity logging tools are widely used. In Russian practice, the potential of investigating such wells with the help of the new electromagnetic tool with toroidal coils is still untapped. In particular, the influence of shoulder beds on the signals of this device has not been scrutinized. For this reason, the aim of the current research is to examine the influence of shoulder beds on the signals of the electromagnetic tool with toroidal coils, including a comparative analysis with the signals of high-frequency electromagnetic logging (VIKIZ) and lateral logging sounding (BKZ). This paper analyzes the influence of surrounding sediments on the signals of the mentioned Russian resistivity logging instruments. The signals were calculated using numerical finite-difference three-dimensional modeling programs in models with horizontal wells on the computing resources of the Siberian Supercomputer Center SB RAS. As a result of this research, the values of the toroidal tool's signals are shown to be more influenced by non-conductive shoulder beds. On the contrary, BKZ apparent resistivity readings and VIKIZ signals are more affected by conductive host rocks than resistive ones.

Keywords: resistivity logging, horizontal wells, shoulder-bed effect, numerical simulation

Введение

В мировой практике для изучения разрезов горизонтальных скважин широко применяются методы электрокаротажа, поскольку за счет разной радиальной глубинности индукционных и гальванических методов есть возможность оценивать удельное электрическое сопротивление (УЭС) пласта, его толщину и УЭС вмещающих отложений. Так, в 1990 году при помощи средств математического моделирования сигналов было детально показано влияние вмещающих пластов на сигналы приборов электромагнитного каротажного зондирования и бокового каротажа, по результатам моделирования построены коррекционные палетки для учета влияния вмещающих отложений [1]. Более того, было показано, что индукционный каротажный зонд чувствителен к более резистивному вмещающему пласту, а гальванические зонды – к проводящим вмещающим породам. Также, появляется все больше публикаций по опыту изучения горизонтальных разрезов с целью разработки сложных нефтегазоносных коллекторов [2, 3, 4].

В отечественной практике для изучения геоэлектрических свойств нефтегазоносных коллекторов широко используются боковое каротажное зондирование (БКЗ) и высокочастотный электромагнитный каротаж (ВЭМКЗ, ВИКИЗ). Кроме того, в последнее время изучаются возможности нового отечественного электромагнитного зонда с тороидальными катушками ЗЭТ [5, 6]. На сегодняшний день слабоисследованной остается применимость зонда по изучению разрезов горизонтальных скважин. Более того, в международной практике относительно мало внимания уделяется описанию возможностей зондов с тороидальными катушками [1, 3]. Следовательно, возникает необходимость изучения возможностей зондов с тороидальными катушками задачах изучения горизонтальных скважин, а также последующего сравнения сигналов ЗЭТ с распространенными методами ВИКИЗ и БКЗ, что и составляет цель данного исследования. Приводится сравнение влияния как более проводящих, так и более резистивных вмещающих толщ на сигналы приборов ЗЭТ, ВИКИЗ и БКЗ.

Методы и материалы

Для сравнения влияния вмещающих толщ на сигналы российских приборов электрокаротажа сформулированы геоэлектрические модели с пластом во вмещающих породах разной толщины от 0.5 до 8 метров с шагом 0.5 м. В середине пласта проходит горизонтальная скважина радиусом 0.062 м. УЭС скважины составляет 1 Ом·м. В рамках представленного исследования рассматриваются два случая:

1. В первом случае удельное электрическое сопротивление (УЭС) вмещающих толщ меньше УЭС пласта и равно 5 Ом·м, что можно принять в качестве глинистых толщ. УЭС пласта варьируется от 6 до 100 Ом·м.

2. Во втором случае, наоборот, УЭС вмещающих пород превалирует и составляет 120 Ом·м. УЭС пласта также варьируется от 6 до 100 Ом·м.

Влияние зоны проникновения в данном исследовании не учитывается.

Далее проведено численное трехмерное конечно-разностное моделирование сигналов электромагнитного зонда с тороидальными катушками (ЗЭТ) [7], высокочастотного индукционного каротажного изопараметрического зондирования (ВИКИЗ) [8] и бокового каротажного зондирования (БКЗ) [9]. Для моделирования использовались вычислительные ресурсы Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН.

С целью оценки влияния вмещающих пород на значения сигналов зондов ЗЭТ, ВИКИЗ и БКЗ сначала были рассчитаны сигналы в модели «скважина – однородный пласт» для значений УЭС пласта 6, 10, 20, 40, 80, 100 Ом·м. Далее были рассчитаны сигналы в модели «скважина – пласт – вмещающие породы», в которых сопротивления пласта брались те же, что и в модели «скважина – однородный пласт», а УЭС вмещающих составили 5 и 120 Ом·м.

Результаты

По итогам моделирования получены отношения сигналов в модели «скважина – пласт – вмещающие породы» к сигналам, рассчитанным в модели «скважина – однородный пласт». Ввиду того, что для зонда с тороидальными катушками наибольшее влияние вмещающих пород оказывается на сигналы тангенциальной компоненты магнитного поля H_ϕ , то графики приведены для ее реальной и мнимой составляющих ReH_ϕ и ImH_ϕ , для крайних операционных частот 50 и 250 кГц (рис. 1, 2). В данной статье отношения для компонент ReE_z и ImE_z не приводятся. Для разности фаз ($\Delta\phi$) и отношения амплитуд (dA) ВИКИЗ отображены влияния вмещающих толщ только для короткого (0.5 м) и длинного (2.0 м) зондов, поскольку они отражают минимально и максимально возможное влияние вмещающих пород на сигнал. Для прибора БКЗ были отображены отношения сигналов для метрового (A1.0M0.1N) и четырехметрового (A4.0M0.5N) зондов.

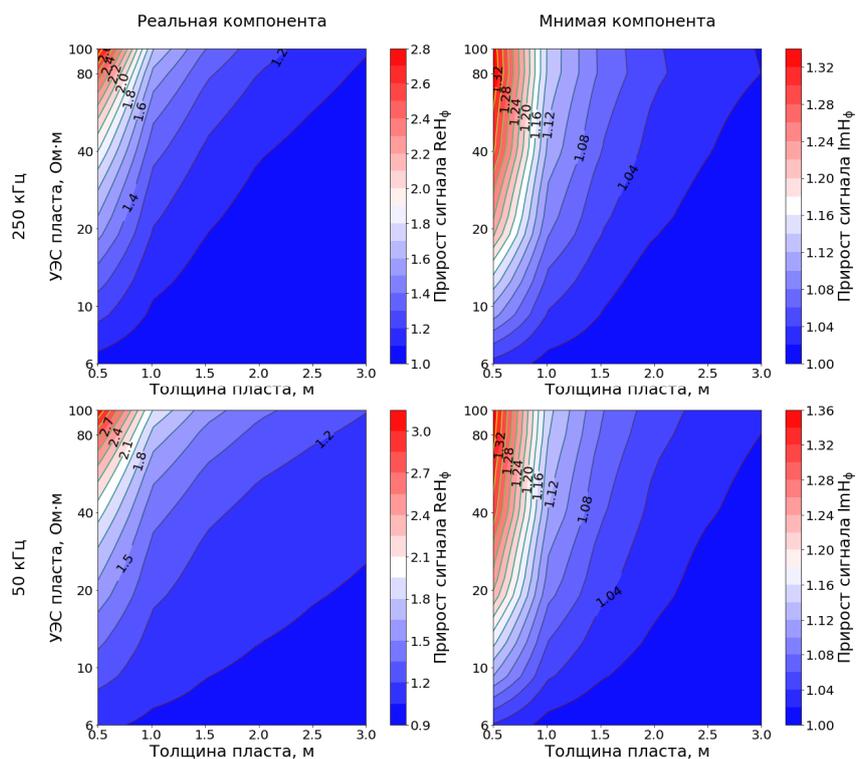


Рис. 1. Зависимости отношения сигналов ReN_ϕ и ImN_ϕ ЗЭТ при частотах 250 кГц и 50 кГц (УЭС вмещающих пород 5 Ом·м).

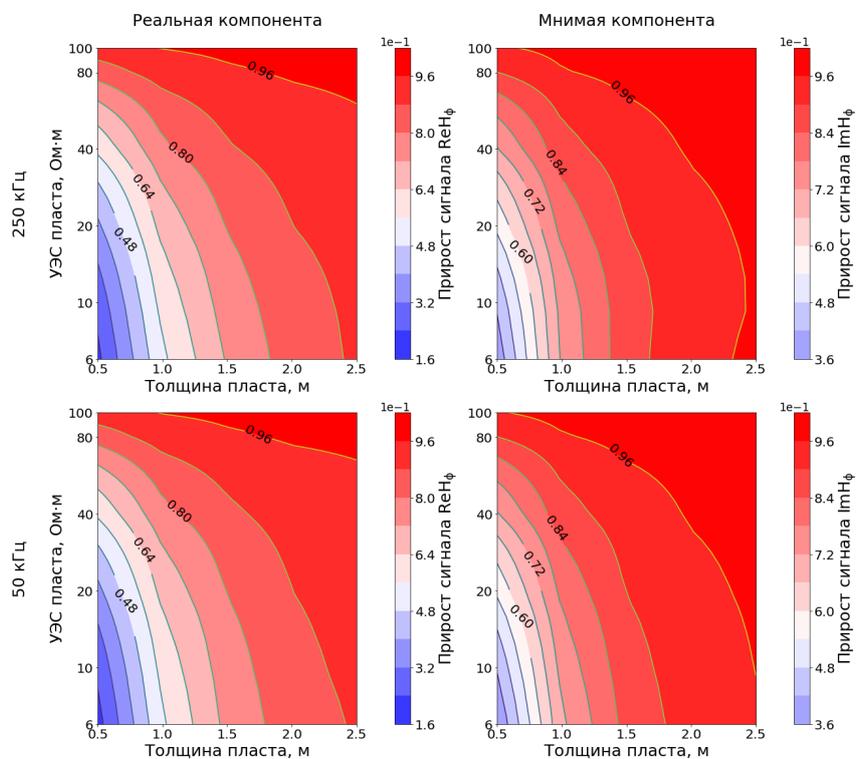


Рис. 2. Зависимости отношения сигналов ReN_ϕ и ImN_ϕ ЗЭТ при частотах 250 кГц и 50 кГц (УЭС вмещающих пород 120 Ом·м).

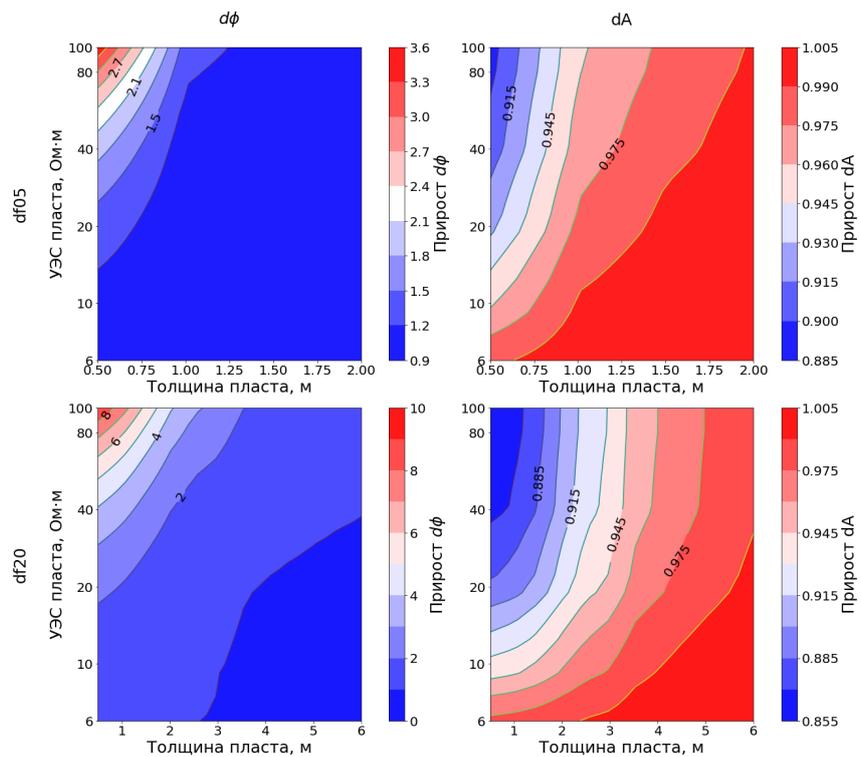


Рис. 3. Зависимости отношения сигналов $\Delta\phi$ и dA зондов ВИКИЗ (УЭС вмещающих пород $5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$).

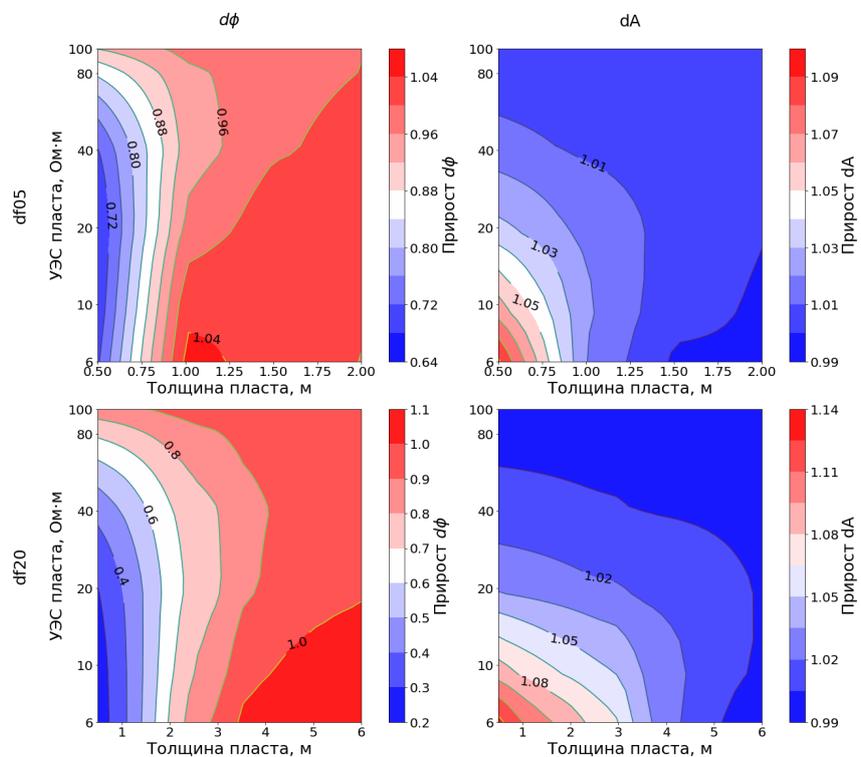


Рис. 4. Зависимости отношения сигналов $\Delta\phi$ и dA зондов ВИКИЗ (УЭС вмещающих пород $120 \text{ Ом}\cdot\text{м}$).

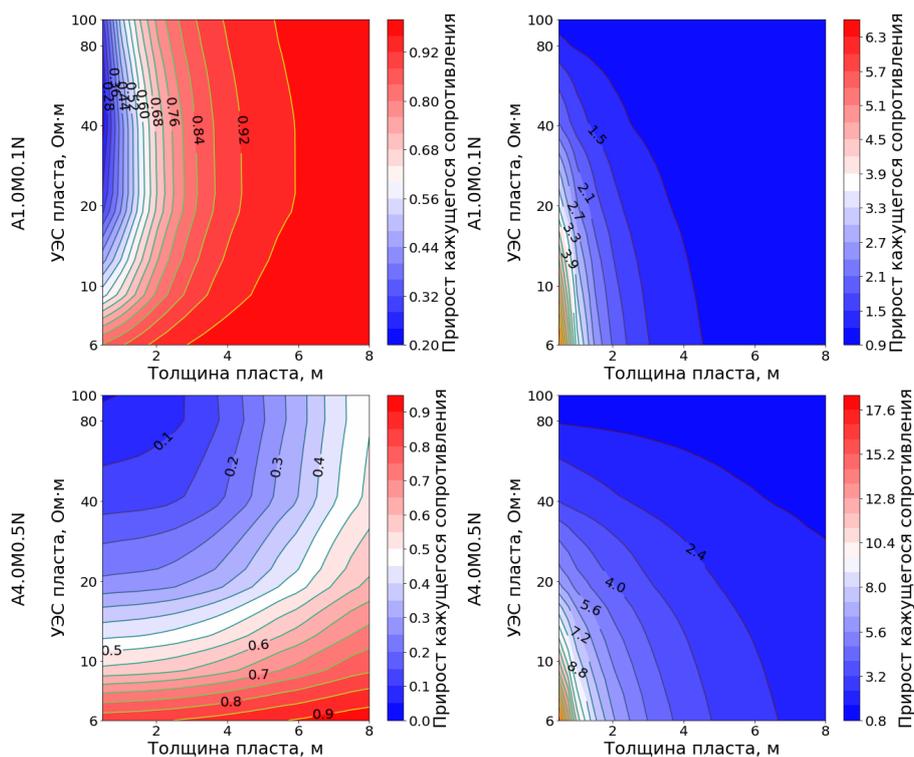


Рис. 5. Зависимости отношения сигналов кажущегося УЭС БКЗ. УЭС вмещающих пород 5 Ом·м (слева) и 120 Ом·м (справа).

Обсуждение

По итогам проведенного моделирования можно отметить, что для зонда с тороидальными катушками влияние вмещающих толщ уменьшается с ростом частоты сигналов от 50 до 250 кГц (рис. 1, 2). Наибольшее влияние на сигналы зонда с тороидальными катушками оказывают резистивные толщи, когда зонд находится в центре более проводящего пласта относительно вмещающих пород (рис. 2). Так, при нахождении зонда в относительно более проводящем пласте прирост значения сигнала достигает 215% (увеличение в 3.15 раз) (ReN_{ϕ} при 50 кГц). Более резистивные вмещающие толщи уменьшают значения сигнала ReN_{ϕ} при 50 кГц максимум на 85% (уменьшение в 6.6 раз) (рис. 1). Данные изменения значений сигналов достигаются при контрастах УЭС, равных 20, и толщинах пласта, составляющих 0.5 м.

Для зондов ВИКИЗ выделяются следующие особенности. Разность фаз более чувствительна к контрасту между УЭС пласта и УЭС вмещающих пород, чем отношение амплитуд (рис. 3, 4). Например, при вмещающих толщах, более резистивных относительно пласта, максимального уменьшения (75%) сигнал $\Delta\phi$ достигает при толщине пласта 0.5 м и УЭС пласта, равном 10 Ом·м и менее; сигнал dA увеличивается максимум на 15% при наименьшей толщине пласта и наибольшем контрасте УЭС (рис. 4). Вмещающие толщи сильнее оказывают влияние на значения сигналов зондов ВИКИЗ (разности фаз и отношения амплитуд), если эти толщи более проводящие относительно пласта: при положении прибора ВИКИЗ в резистивном пласте минимальной толщины 0.5 м и с максимальным кон-

трастом УЭС сигнал $\Delta\varphi$ зонда 2.0 м увеличивается в 8 раз (рис. 3). При прочих равных условиях (контраст УЭС 20, толщина 0.5 м) и при высокоомных вмещающих толщах сигнал $\Delta\varphi$ двухметрового зонда уменьшается на 75% (рис. 4). Вмещающие породы закономерно оказывают наибольшее влияние на значения сигналов зонда длиной 2.0 м, наименьшее – на сигналы зонда 0.5 м.

Эффект от вмещающих толщ наиболее проявлен в значениях кажущегося сопротивления по зондам БКЗ, когда эти породы более проводящие. Так, в непроводящем пласте толщиной 0.5 м и при контрасте УЭС 20 кажущееся сопротивление по зонду А4.0М0.5N достигает 5% (уменьшается в 20 раз) от значения кажущегося сопротивления без влияния (рис. 5, слева), в то время как в проводящем пласте из-за влияния резистивных вмещающих пород кажущееся сопротивление увеличивается на 1650% (возрастает в 17.5 раз) (рис. 5, справа).

Таким образом, на показания электромагнитного зонда с тороидальными катушками сильнее воздействует непроводящий вмещающий пласт. В то же время, на значения кажущегося сопротивления зондов БКЗ и сигналов зондов ВИКИЗ большее влияние оказывает проводящий вмещающий пласт.

Заключение

В рамках текущей работы проведено численное трехмерное конечно-разностное моделирование сигналов электромагнитного зонда с тороидальными катушками (ЗЭТ), высокочастотного индукционного каротажного изопараметрического зондирования (ВИКИЗ) и бокового каротажного зондирования (БКЗ) в моделях с пластом разной толщины во вмещающих проводящих или резистивных пластах. Скважина располагалась в середине пласта. Выявлены зависимости влияния вмещающих толщ (проводящих и резистивных) на сигналы российских приборов электрокаротажа от толщины пласта и параметров каждого прибора. В дальнейшем предполагается рассмотрение скважин с реалистичными траекториями в пласте ограниченной толщины во вмещающих толщах.

Результаты исследования могут применяться для учета влияния вмещающих толщ при изучении электрических свойств продуктивных пластов в горизонтальных скважинах с использованием рассмотренных зондов электрокаротажа. При этом с практической точки зрения важно, что на сигналы ЗЭТ большее влияние оказывают высокоомные вмещающие отложения, а на кажущееся сопротивление зондов БКЗ и сигналы ВИКИЗ, наоборот, сильнопроводящие. Учитывая разный характер влияния вмещающих пород, сигналы трех указанных зондов информационно дополняют друг друга.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2022-0026 «Инновационные аспекты электродинамики в задачах разведочной и промысловой геофизики».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gianzero S., Chemali R., Su S.-M. Induction, resistivity, and MWD tools in horizontal wells // *The Log Analyst*. – 1990. – Nos. 5–6. – P. 158–171.
2. Sinclair P., Anzong L., Otteman A., Wennekamp A. LWD azimuthal laterolog resistivity logging in unconventional reservoirs // *The IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, Tianjin, China, July 2012*.
3. Ortenzi L., Dubourg I., van Os R., Han S.Y., Koepsell R., Ha S.C.Y. New Azimuthal Resistivity and High-Resolution Imager Facilitates Formation Evaluation and Well Placement of Horizontal Slim Boreholes // *SPWLA 52nd Annual Logging Symposium (May 14-18, 2011)*. – Colorado Springs, CO, USA, 2011. – Paper SPWLA-2011-LLL.
4. Omeragic D., Sun L., Polyakov V., Chen Y., Cao X., Habashy T., Vik T., Rasmus J., Denichou J. Characterizing teardrop invasion in horizontal wells in the presence of boundary using LWD directional resistivity measurement // *SPWLA 54th Annual Logging Symposium (June 22-26, 2013)*. – New Orleans, LA, USA, 2013. – Paper SPWLA- 2013-000.
5. Эпов М.И., Михайлов И.В., Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Суродина И.В. Алгоритмы обработки и инверсии данных электромагнитного зонда с тороидальными катушками при изучении макроанизотропных свойств пластов-коллекторов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330, № 6. – С. 187–197.
6. Михайлов И.В., Суродина И.В., Темирбулатов О.П. Сигналы электромагнитного зонда с тороидальными катушками в наклонных скважинах (по результатам численного моделирования) // *Геофизические технологии*. – 2021. – № 3. – С.18-27.
7. Суродина И.В., Михайлов И.В., Глинских В.Н. Математическое моделирование сигналов тороидального источника в трехмерных изотропных моделях геологических сред // *Естественные и технические науки*. – 2020. – № 12. – С. 131–134.
8. Surodina I. The GPU solvers for high-frequency induction logging // *Numerical Analysis and Its Applications. 6th International Conference, NAA 2016 (Lozenetz, Bulgaria, June 15-22, 2016). Revised Selected Papers. (Lecture Notes in Computer Science 10187)* – Springer Verlag – С. 640–647. – 2017.
9. Суродина И.В. Параллельные алгоритмы для решения прямых задач электрического каротажа на графических процессорах // *Математические заметки СВФУ – том 22 – № 2* – С. 51-61 – 2015.

© О. П. Темирбулатов, И. В. Михайлов, И. В. Суродина, 2023