

## **ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ПРИБОРА БОКОВОГО СКАНИРУЮЩЕГО КАРОТАЖА В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

***Кирилл Николаевич Даниловский***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник, тел. (383)330-45-05, e-mail: DanilovskiiKN@ipgg.sbras.ru

***Вячеслав Николаевич Глинских***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, доцент кафедры геологии месторождений нефти и газа, главный научный сотрудник; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, профессор кафедры геофизических систем, тел. (383)330-45-05, e-mail: GlinskikhVN@ipgg.sbras.ru

***Олег Валентинович Нечаев***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)330-45-05, e-mail: NechaevOV@ipgg.sbras.ru

Пластовые микроимиджеры являются одними из наиболее высокотехнологичных приборов, применяемых при каротаже на кабеле и в процессе бурения. На основе трехмерного численного моделирования выполнена оценка пространственного разрешения первого отечественного прибора бокового сканирующего каротажа в процессе бурения (микроимиджера). Описан алгоритм построения геоэлектрической модели с пространственным распределением удельного электрического сопротивления в околоскважинном пространстве.

**Ключевые слова:** радиальная глубинность, пространственное разрешение, боковой сканирующий каротаж, электрический микроимиджер, каротаж в процессе бурения, численное моделирование, псевдогеометрический фактор.

## **EVALUATION OF THE BKS LWD TOOL SPATIAL RESOLUTION BASED ON THE NUMERICAL SIMULATION RESULTS**

***Kirill N. Danilovskiy***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptuyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher, phone: (383)330-45-05, e-mail: DanilovskiiKN@ipgg.sbras.ru

***Vyacheslav N. Glinskikh***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptuyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Associate Professor of the Department of Geology of Oil and Gas Field, Chief Researcher; Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Professor of the Department of Geophysical Systems, phone: (383)330-45-05, e-mail: GlinskikhVN@ipgg.sbras.ru

**Oleg V. Nechaev**

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)330-45-05, e-mail: NechaevOV@ipgg.sbras.ru

Reservoir microimaging tools are currently one of the most high-tech devices used in wireline logging and logging-while-drilling. Based on a three-dimensional numerical simulation, the spatial resolution of the first Russian lateral scanning logging-while drilling tool was estimated. An algorithm for constructing a geoelectric model with an arbitrary distribution of electrical resistivity in the near-wellbore space is described.

**Key words:** radial depth of investigation, spatial resolution, lateral scanning logging, resistivity microimager, logging while drilling, numerical simulation, pseudogeometric factor.

В последние десятилетия значительно увеличилось количество методов скважинной геофизики. В частности, появились пластовые микроимиджеры, используемые при каротаже на кабеле и в процессе бурения. Такие приборы вместо традиционных каротажных кривых позволяют получать имиджи – пространственные распределения измеряемого параметра в виде развертки по стенке скважины.

В рамках реализации программ импортозамещения Научно-производственным предприятием геофизический аппаратуры «Луч» (НПП ГА «Луч», г. Новосибирск) совместно с Институтом нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск) разработан аппаратный комплекс «ЛУЧ» для каротажа в процессе бурения [1-7]. В состав комплекса «ЛУЧ» вошел прибор бокового сканирующего каротажа (БКС), позволяющий получать имиджи кажущегося удельного электрического сопротивления (УЭС) в процессе бурения. Для расчета сигналов БКС разработано программное обеспечение (ПО) [8], основанное на методе конечных элементов. С использованием данного ПО выполнено численное моделирование сигналов электрического микроимиджера в реалистичных трехмерных геоэлектрических моделях сред [9], исследовано влияние условий измерения на результаты интерпретации имиджей [10], показана возможность применения прибора для решения задач геонавигации [11].

Важнейшей характеристикой приборов электрокаротажа является разрешение при оценке пространственного распределения УЭС. В случае пластового микроимиджера пространственное разрешение прибора описывают три характеристики: радиальная глубинность, вертикальное и азимутальное разрешение. Для оценки этих характеристик прибора рассматривается модифицированная классическая геоэлектрическая модель «скважина – зона проникновения – пласт». В модели зона проникновения разбивается на блоки по глубине скважины  $z$  и по азимутальному углу  $\varphi$ , при этом в каждом блоке задается свое значение УЭС  $\rho_{i,j}$  (рис. 1). Такое разбиение при малом размере блоков позволяет описывать распределение УЭС в прискважинном пространстве произвольным образом.

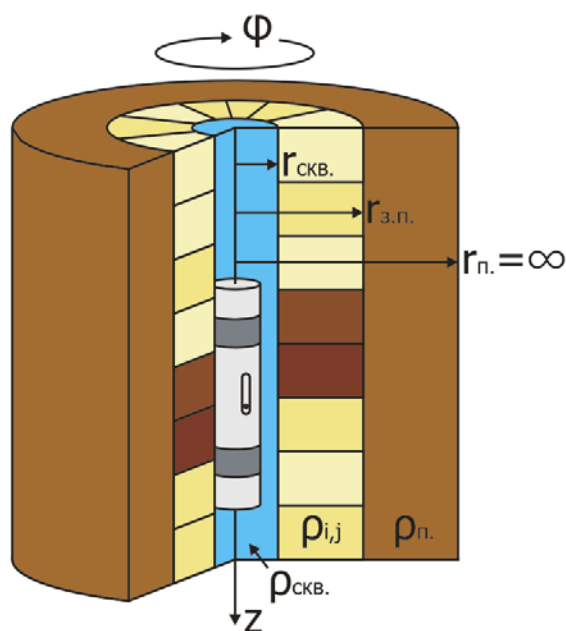


Рис. 1. Геоэлектрическая модель среды для оценки параметров пространственного разрешения прибора БКС

Для оценки радиальной глубинности прибора рассматриваются геоэлектрические модели, в которых зона проникновения однородна, а ее толщина варьируется от 0,01 до 0,20 м. УЭС зоны проникновения и пласта варьируются от 3 до 1000 Ом·м. При численном моделировании также задаются следующие параметры: УЭС бурового раствора в скважине 1 Ом·м, диаметр скважины 0,220 м, диаметр прибора 0,202 м.

Измеряемый сигнал представляется в виде линейной комбинации вкладов от зоны проникновения и от пласта:

$$\rho_k = J(h_{з.п.})\rho_{з.п.} + (1 - J(h_{з.п.}))\rho_{п.},$$

где  $\rho_k$  – кажущееся УЭС,  $J$  – псевдогеометрический фактор, представляющий собой нормированный весовой коэффициент, определяющий вклады в измеряемый сигнал от зоны проникновения и пласта [12].

Будем считать, что радиальная глубинность прибора определяется, как толщина зоны проникновения, при которой псевдогеометрический фактор равен 0,5.

В результате моделирования получены зависимости псевдогеометрического фактора от толщины зоны проникновения в геоэлектрических моделях с УЭС зоны проникновения и пласта от 3 до 1000 Ом·м (рис. 2).

Результаты моделирования показывают, что на радиальную глубинность исследования в основном влияет значение УЭС зоны проникновения. При  $\rho_{з.п.}$  3 Ом·м радиальная глубинность варьируется от 0,08 до 0,17 м, а при  $\rho_{з.п.}$  1000 Ом·м – превышает 0,20 м во всех рассмотренных моделях.

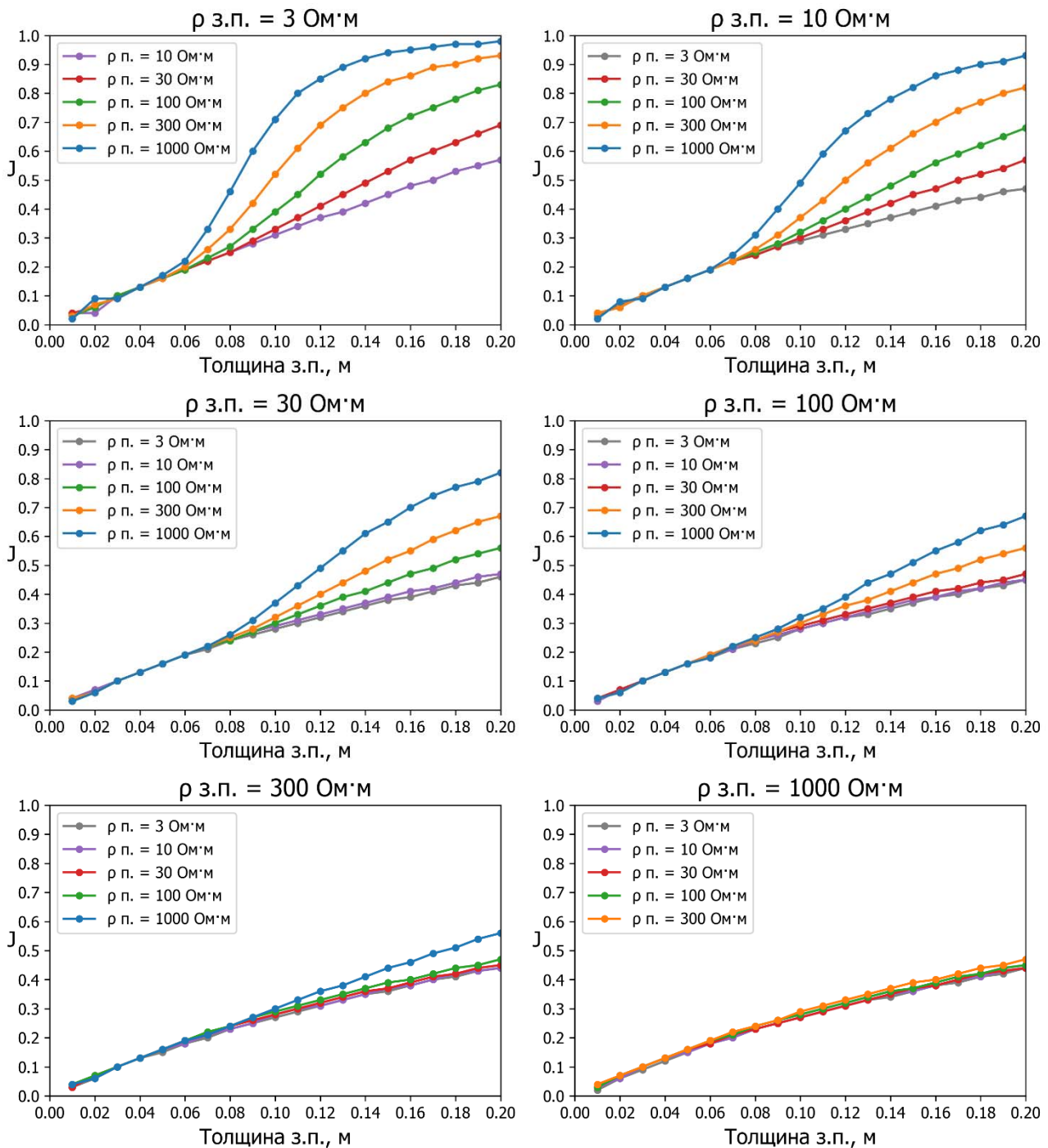


Рис. 2. Псевдогеометрические факторы в зависимости от толщины зоны проникновения, рассчитанные в геоэлектрических моделях сред с разными значениями УЭС зоны проникновения и пласта

Для оценки вертикального и азимутального разрешения прибора рассматривается более сложная геоэлектрическая модель, в которой околоскважинное пространство разбивается на сегменты малого размера. Для задания УЭС этих блоков используется адаптированный из [13] акустический имидж, на котором присутствуют трещины различной ширины. Цвета исходного рисунка преобра-

зуются в оттенки серого, при этом каждому оттенку ставится в соответствие определенное значение УЭС от 1 до 2000 Ом·м (рис. 4). Полученная таким образом геоэлектрическая модель описывает реалистичную трещиноватую высокоомную среду, где трещины заполнены проводящим буровым раствором. При численном моделировании также задаются следующие параметры: УЭС бурового раствора в скважине 1 Ом·м, УЭС пласта 2000 Ом·м, толщина зоны проникновения 0,50 м, диаметр скважины 0,220 м, диаметр прибора 0,202 м, число секторов 16, шаг дискретизации по вертикали 0,05 м.

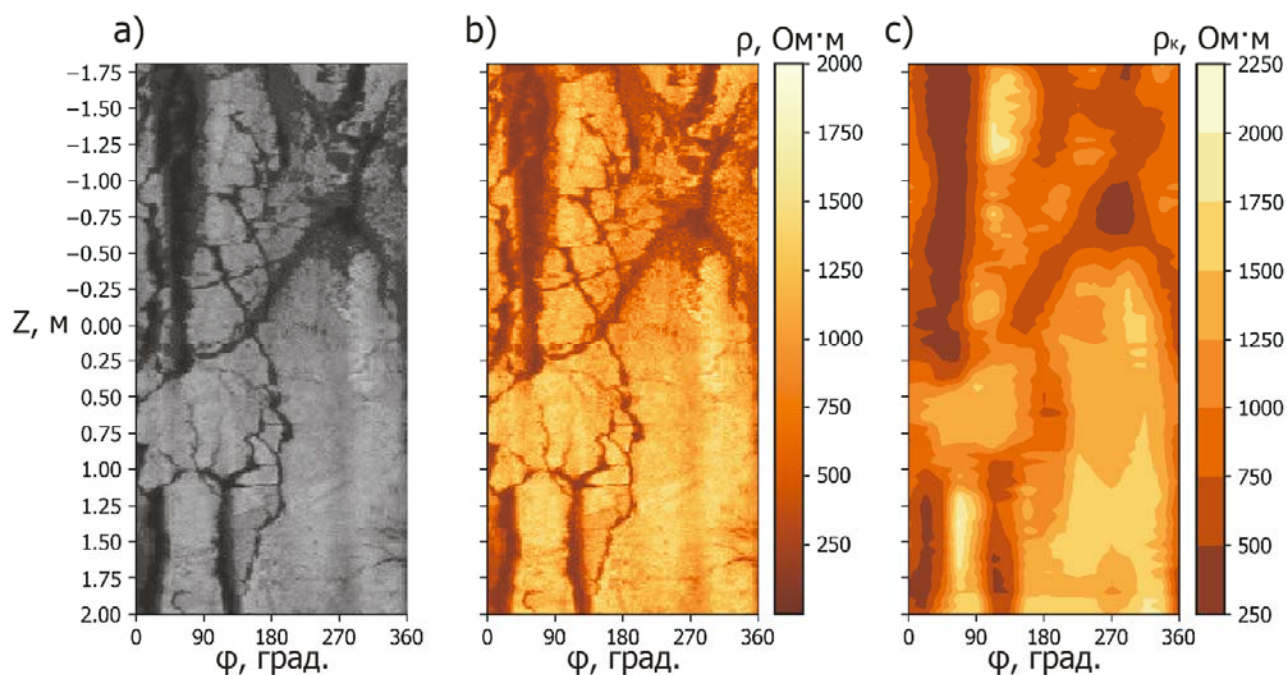


Рис. 3. *a)* Акустический имидж высокого пространственного разрешения, *b)* пространственное распределение УЭС в геоэлектрической модели околоскважинного пространства, *c)* имидж кажущегося УЭС, полученный в результате численного моделирования

Из-за малого размера токового электрода прибора его вертикальное и азимутальное разрешение обусловлено, соответственно, шагом дискретизации по глубине скважины и числом азимутальных секторов, в которых проводятся измерения. Результаты моделирования показывают, что на имидже четко прослеживаются трещины шириной не менее 0,10 м, что соответствует удвоенному шагу дискретизации измерений в вертикальном и азимутальном направлениях.

Таким образом, в рамках выполненного исследования разработан алгоритм, позволяющий проводить расчеты сигналов БКС в геоэлектрических моделях сред с произвольным распределением УЭС в околоскважинном пространстве. Результатами моделирования показано, что прибор БКС обладает высоким пространственным разрешением: вертикальное и азимутальное разрешение составляет 0,10 м, а радиальная глубинность превышает 0,08 м. Лучшие

показатели вертикального и азимутального разрешения могут быть достигнуты при уменьшении шага дискретизации измерений, однако, передача более плотных данных на поверхность в реальном времени может быть затруднительна в силу ограниченной пропускной способности гидравлического канала связи.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Телеметрические системы каротажа: программно-методическое обеспечение в процессе бурения наклонного-горизонтальных скважин / В.Н. Глинских, М.Н. Никитенко, К.Н. Даниловский, В.Н. Еремин, И.А. Москаев // *Neftegaz.RU*. – 2017. – № 10. – С. 42–49.
2. Еремин В. Н., Волканин Ю. М., Тарасов А. В. Аппаратурно-методическое обеспечение электромагнитного каротажа в процессе бурения // *Каротажник*. – 2013. – № 226. – С. 62–69.
3. Аппаратура и интерпретационная база электромагнитного каротажа в процессе бурения / К.Н. Каюров, В.Н. Еремин, М.И. Эпов, В.Н. Глинских, К.В. Сухорукова, М.Н. Никитенко // *Нефтяное хозяйство*. – 2014. – № 12. – С. 112–115.
4. Численное моделирование и инверсия данных электромагнитного каротажа в процессе бурения и шаблонирования нефтегазовых скважин / М.И. Эпов, В.Н. Глинских, К.В. Сухорукова, М.Н. Никитенко, В.Н. Еремин // *Геология и геофизика*. – 2015. – № 56(8). – С. 1520–1529.
5. Численное моделирование и анализ сигналов электромагнитного каротажа в процессе бурения / М.И. Эпов, М.Н. Никитенко, В.Н. Глинских, К.В. Сухорукова // *Каротажник*. – 2016. – № 245. – С. 29–42.
6. Development of LWD High-frequency Resistivity Tool / M.N. Nikitenko, M.I. Epov, V.N. Glinskikh, K.V. Suhorukova, V.N. Eremin // *Geosciences – Investing in the Future: 6th Saint Petersburg International Conference & Exhibition: proceeding of the conf. (Saint Petersburg, 7 - 10 April 2014) – Saint Petersburg, 2014. – Paper ThD05.*
7. Алгоритмы и программное обеспечение для геонавигации по данным электромагнитного каротажа в процессе бурения / В.Н. Глинских, М.Н. Никитенко, М.И. Эпов, В.Н. Еремин // *Горизонтальные скважины 2017: Проблемы и перспективы: 2-я научн.-практ. конф.: Материалы конференции (Казань, 15-19 мая 2017 г.) – Казань, 2017. – Статья 3G05.*
8. Глинских В. Н., Даниловский К. Н., Нечаев О. В. Трехмерное численное моделирование сигналов азимутального микробокового каротажа в процессе бурения // *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. – 2018. – № 10. – С. 32–39.
9. Danilovskiy K., Glinskikh V., Nechaev O. 3D modelling of the new resistivity microimaging tool signals for logging while drilling // *Extended Abstracts of the 80th EAGE Conference & Exhibition (Copenhagen, 11-14 June 2018)*. – Copenhagen, 2018. – Paper Tu SP2 01.
10. Даниловский К. Н. Оценка влияния условий измерения на результаты интерпретации данных азимутального микробокового каротажа в процессе бурения // *IX Сибирской научно-практической конференции молодых ученых по наукам о Земле: Материалы конф. (Новосибирск, 19-23 ноября 2018 г.) – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2018. – С. 165–167.*
11. Даниловский К. Н., Нечаев О. В. Моделирование сигналов электрического LWD-микроимиджера применительно к задаче геонавигации горизонтальных скважин // *Науки о Земле. Современное состояние: V Всеросс. молодеж. научн.-практ. конф.: Материалы конф. (Геологический полигон «Шира», Республика Хакасия, Россия, 30 июля-5 августа 2018 г.)*. – Новосибирск: РИЦ НГУ, 2018. – С. 23–25.
12. Ellis D., Singer J. *Well Logging for Earth Scientists*, 2d Ed. – Springer, 2008. – 699 p.
13. Davatzes N., Hickman S. Comparison of acoustic and electrical image logs from the Coso geothermal field, CA // *Thirtieth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. – Stanford, 2005. – Paper SGP-TR-176.

© К. Н. Даниловский, В. Н. Глинских, О. В. Нечаев, 2019