

И. В. Михайлов¹✉, М. И. Энов¹, И. В. Суродина¹, М. Н. Никитенко¹

Электрокаротажные системы с тороидальными катушками для определения УЭС керна в процессе бурения: обоснование двумерным численным моделированием

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: MikhaylovIV@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Для актуальной задачи электрокаротажа в процессе колонкового бурения выполнено двумерное численное моделирование реальной и мнимой составляющих вертикальной компоненты электрического поля и тангенциальной компоненты магнитного поля для практически значимого диапазона УЭС керна из терригенных коллекторов. Образец только что выбуренного керна находится в изолирующей или сильнопроводящей трубе с тороидальными катушками внутри ферромагнитного стального корпуса керноприёмника. По результатам численного моделирования выбраны оптимальные длины измерительных систем, а также операционные частоты и типы измеряемых сигналов. Предложены взаимно-однозначные трансформации последних в значения кажущихся УЭС вертикально-неоднородных керновых образцов.

Ключевые слова: тороидальная катушка, колонковое бурение, электрокаротаж, конечно-разностное моделирование, двумерная модель, трансформация сигнала

I. V. Mikhaylov¹✉, M. I. Epov¹, I. V. Surodina¹, M. N. Nikitenko¹

Resistivity logging systems with toroidal coils for determining core resistivity while drilling: substantiation through 2D numerical modeling

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: MikhaylovIV@ipgg.sbras.ru

Abstract. With regard to a topical problem of resistivity logging while core drilling, we performed 2D numerical modeling of the real and imaginary parts of the electric field vertical component and magnetic field tangential component for a relevant range of core resistivities typical of terrigenous reservoirs. A freshly drilled core sample is contained in an insulating or highly conductive pipe with toroidal coils inside a ferromagnetic steel core barrel. Based on the numerical modeling results, we selected the optimal lengths of the measuring systems, as well as the operating frequencies and measured signal types. One-to-one transforms of the latter into apparent resistivity values for vertically inhomogeneous core samples were proposed.

Keywords: toroidal coil, core drilling, resistivity logging, finite-difference modeling, two-dimensional model, signal transform

Введение

В мировой практике для лабораторных петрофизических исследований кернов применяются различные методы и подходы. Одно из наиболее развивающихся

направлений связано с цифровыми кернами на основе методов сканирующей электронной микроскопии и рентгеновской микротомографии [1, 2, 3]. Неизменно сопоставляются разномасштабные каротажные и керновые данные [4]. Стоит отдельно отметить группу методов электрометрии, которые являются основными для последующей оценки коэффициента нефтегазонасыщения горных пород [5, 6].

Удельное электрическое сопротивление (УЭС) керна может определяться как многочастотными электродными системами, так и индукционными с соленоидальными катушками. Однако научно-прикладным потенциалом для изучения пространственного распределения УЭС в керне обладают и другие подходы: например, с использованием тороидальных катушек [7].

Источник поля в виде тороидальной катушки можно математически описать сторонним круговым магнитным гармоническим током [8]. Разработан и верифицирован алгоритм двумерного конечно-разностного моделирования электрических и магнитных сигналов от стороннего кругового тока, эквивалентного тороидальной катушке [7]. Относительная погрешность двумерного моделирования не превышает 1.5% в целевом диапазоне УЭС керна из терригенных коллекторов.

Как известно, в процессе извлечения керна и при его последующей доставке в петрофизическую лабораторию с ним неизбежно происходят изменения, порою необратимые. В связи с этим, на сегодняшний день значительный интерес представляет подход, обеспечивающий оценку петрофизических характеристик керна непосредственно в процессе колонкового бурения.

Для решения такой задачи выполняется двумерное численное моделирование сигналов тороидальной катушки для практически значимого диапазона УЭС керна, когда только что выбуренный образец находится в изолирующей или сильнопроводящей трубе с тороидальными катушками внутри ферромагнитного стального корпуса керноприёмника. На основе численного моделирования выбираются оптимальные длины измерительных систем, а также операционные частоты и типы измеряемых сигналов. Предлагаются трансформации последних в значения кажущихся УЭС вертикально-неоднородных образцов.

Геоэлектрическая модель каротажа в процессе отбора керна

Рассматривается геоэлектрическая модель отбора керна при колонковом бурении (рис. 1). Цилиндрическая колонка керна радиуса r_0 и длины L расположена осесимметрично внутри трубы, в которую стационарно вмонтированы генераторная (Г) и измерительная (И) тороидальные катушки. Вся система размещена внутри ферромагнитного стального корпуса керноприёмника; между трубой с тороидами и корпусом циркулирует буровой раствор. Внутри керноприёмника, вокруг и снизу него расположена электропроводящая геологическая среда. Концентрические цилиндрические слои вокруг керна ограничены снизу на уровне $z = 0$ м и имеют значительную протяжённость для глубин $z > 0$ м. Колонка керна поступает в керноприёмник и перемещается относительно трубы с измерительной системой на глубинах $z > 0$ м. Измерительная тороидальная катушка размещена на фиксированном расстоянии от нижней грани керноприёмника ($z = 0$ м);

расстояние между генераторной и измерительной катушкой (длина зонда) варьируется.

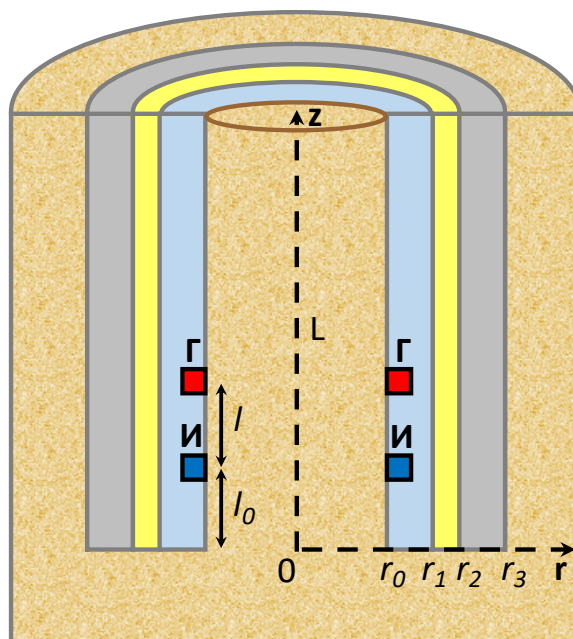


Рис. 1. Геоэлектрическая модель каротажа в процессе отбора керна: керна (коричневый цвет) и измерительный зонд, состоящий из генераторной (красный) и измерительной (синий) тороидальных катушек внутри трубы (голубой). Система заключена в ферромагнитный стальной корпус кернаприёмника (серый); между корпусом и трубой циркулирует буровой раствор (жёлтый). В модели не учтена режущая часть кернаотборного долота

Методом конечных разностей в двумерной постановке моделируются реальная и мнимая составляющие вертикальной компоненты электрического поля E_z и тангенциальной компоненты магнитного поля H_φ .

Профилирование протяжённого однородного изотропного керна в стеклопластиковой трубе

Рассматривается случай, когда геологическая среда вокруг корпуса кернаприёмника характеризуется одинаковым значением УЭС $15 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, что соответствует нефтенасыщенному песчанику. Высота колонки однородного керна увеличивается с шагом 0.01 м .

Трансформации сигналов $\text{Im } H_\varphi$ в кажущиеся УЭС при электропрофилеировании выбуриваемого керна показаны на рис. 2. Начальная точка на оси ординат соответствует положению верхней границы керна на глубине $z = 0 \text{ м}$ (расстояние от измерительной катушки $l_0 = 0.10 \text{ м}$). Пунктирными линиями показаны две асимптоты: серая характеризует УЭС бурового раствора $2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, а чёрная – УЭС керна $15 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

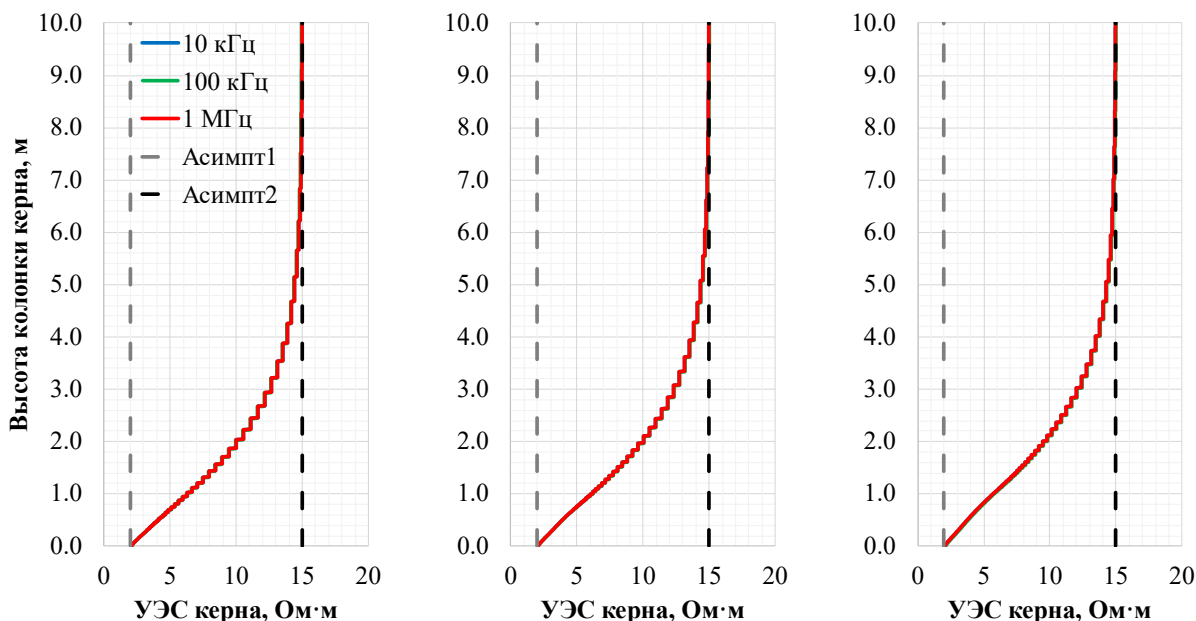


Рис. 2. Кажущиеся УЭС по $\text{Im } H_\varphi$ при профилировании протяжённого однородного керна нефтенасыщенного песчаника с УЭС 15 Ом·м.
Тороидальные катушки в стеклопластиковой трубе.
Длина зонда: 0.10 м (слева), 0.50 м (по центру), 0.90 м (справа)

В начальный момент отбора керна регистрируемые отклики тороидальной катушки в значительной степени определяются буровым раствором. По мере увеличения длины цилиндрического керна, буровой раствор влияет всё меньше; в конечном счёте, сигналы выходят на асимптоту, соответствующую керну. Частотная зависимость трансформаций $\text{Im } H_\varphi$ отсутствует при любом УЭС керна в диапазоне 2–200 Ом·м. По сравнению с $\text{Re } H_\varphi$, $\text{Im } H_\varphi$ – более локальный сигнал; асимптотическое значение достигается для разных длин зонда быстрее.

Профилирование протяжённого однородного изотропного керна в металлической немагнитной трубе

Представлен аналогичный случай, при этом тороидальные катушки смонтированы в металлической немагнитной трубе. Анализируется сигнал $\text{Im } H_\varphi$ при компактной длине зонда 0.10 м. УЭС однородного керна 3, 15 и 120 Ом·м, что характерно для водо-, нефте- и газонасыщенного песчаника (рис. 3).

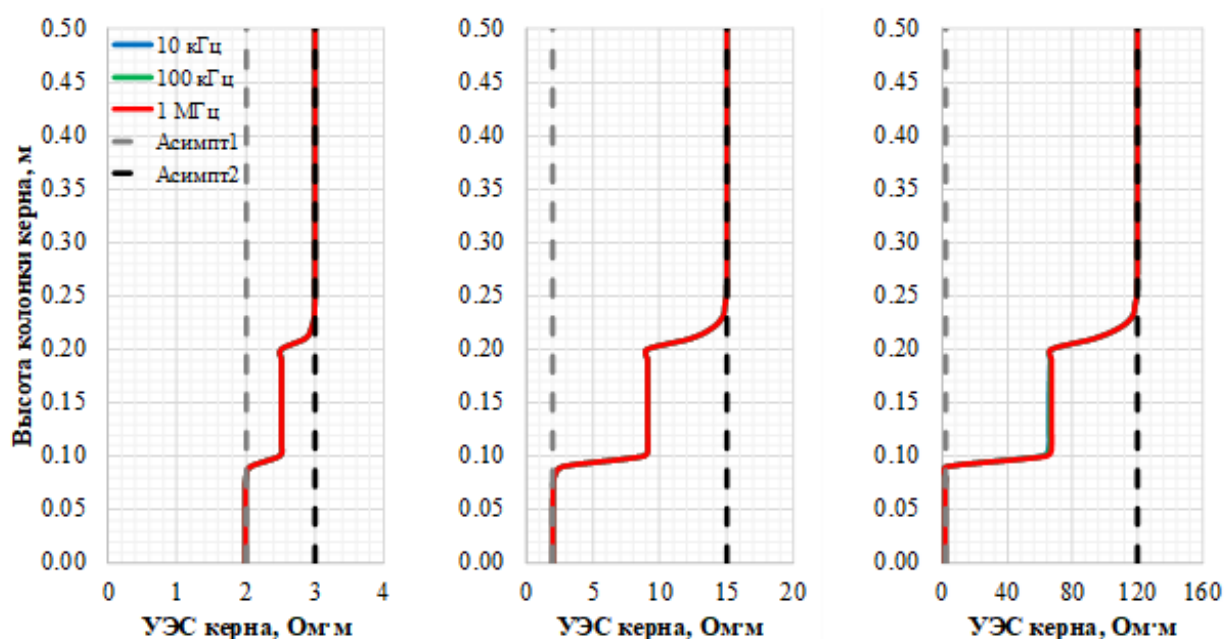


Рис. 3. Кажущиеся УЭС по $\text{Im } H_\phi$ при профилировании протяжённого однородного керна. Тороидальные катушки в металлической немагнитной трубе. Длина зонда 0.10 м. УЭС керна: 3 Ом·м (слева), 15 Ом·м (по центру), 120 Ом·м (справа)

Отмечается очень высокая локальность сигнала $\text{Im } H_\phi$ и его трансформаций. Так, асимптотическое значение, соответствующее УЭС керна, достигается на малом расстоянии 0.23 м от начала отбора керна ($z = 0$ м). Особенности диаграмм на глубинах $z = 0.10$ и 0.20 м характеризуют последовательный переход наращиваемой колонки керна через измерительную и генераторную тороидальную катушку. Таким образом, выход на асимптоту происходит практически мгновенно – на 0.03 м выше положения генераторной катушки.

Результаты

Из анализа результатов численного моделирования следует, что электрокаротаж в процессе отбора керна возможен как с использованием стеклопластиковой трубы (короткие и длинные зонды, реальная и мнимая составляющие тангенциальной компоненты магнитного поля), так и металлической немагнитной трубы (короткий зонд, мнимая составляющая тангенциальной компоненты магнитного поля). Оптимальный диапазон операционных частот – от 10 кГц до 1 МГц. Для однородных кернов построены взаимно-однозначные трансформации сигналов в кажущиеся УЭС. С использованием трансформаций получены достоверные распределения УЭС при профилировании однородных и вертикально-неоднородных кернов внутри кернаприёмника. Тороидальные катушки на металлической немагнитной трубе обеспечивают повышенные локальность измерений и достоверность кажущихся УЭС вдоль керна.

Заключение

Двумерным численным моделированием обоснованы скважинные системы с генераторной и измерительной тороидальными катушками для электрокаротажа в процессе отбора цилиндрического керна при колонковом бурении. Рассмотрено два случая: в первом тороидальные катушки расположены в изолирующей стеклопластиковой трубе вокруг керна, а во втором – в металлической сильнопроводящей немагнитной трубе. КERN и зонды находятся внутри ферромагнитного стального корпуса керноприёмника. Предложенные взаимно-однозначные трансформации сигналов тороидальной катушки позволяют в реальном времени оценивать УЭС вертикально-неоднородных выбуриваемых кернов, включая маломощные с переменным флюидонасыщением и тонкослоистые (макроанизотропные).

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2026-0049 «Электродинамика многомасштабной геологической среды как основа наукоёмких технологий в нефтяной и рудной геологоразведке и инженерной геологии в Сибири и Арктической зоне РФ».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pang M., Balcewicz M., Ba J., Carcione J.M., Siegert M., Saenger E.H. Acoustical-electrical models of tight rocks based on digital rock physics and double-porosity theory // *Geoenergy Science and Engineering*. – 2024. – V. 235. – Paper 212634. – P. 1–21.
2. Иванов Е.Н., Коробков Д.А., Стукан М.Р. Влияние параметров течения реакционного флюида на скорость растворения породы коллектора // *Георесурсы*. – 2025. – Т. 27. – № 2. – С. 206–215.
3. Закиров Т.Р., Хаюзкин А.С., Маннапова Л.М., Елизаров А.М. Влияние фильтрационно-емкостных свойств природных терригенных пород-коллекторов на эффективность нефтевытеснения при различной минерализации пластовой воды // *Георесурсы*. – 2026. – Т. 28. – № 1. – С. 54–64.
4. Morales M.M., Raheem O., Pyrcz M.J., Torres-Verdin C. Anisotropic resistivity inversion and multiple core data assimilation using physics-guided neural network for improved petrophysical interpretation and uncertainty quantification // *Computers & Geosciences*. – 2026. – V. 212. – Paper 106167. – P. 1–17.
5. Mirza D., Birkeland K., Øy L., Chemali R., Barrouillet B. Core Scanner for Electrical Profiling of Full-Bore Cores at the Well Site with Advanced Pulse Electromagnetic Technology // *The SPWLA 65th Annual Logging Symposium (Rio de Janeiro, Brazil)*. – 2024. – Paper SPWLA-2024-0098. – P. 1–13.
6. Ran Q, Lai Q, Zhang B, Wu Y, Tang J, Wu Z. Surface Resistivity Imaging for Drilling Columnar Cores // *Symmetry*. – 2025. – V. 17. – No. 8. – Paper 1238. – P. 1–16.
7. Эпов М.И., Мамяшев В.Г., Михайлов И.В., Суродина И.В., Никитенко М.Н. Определение удельного электрического сопротивления керна с помощью тороидальных катушек: математическое моделирование // *Георесурсы*. – 2024. – Т. 26. – № 3. – С. 151–161.
8. Светов Б.С. Основы геоэлектрики. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 656 с.

© И. В. Михайлов, М. И. Эпов, И. В. Суродина, М. Н. Никитенко, 2026