

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2026.2.13>

УДК 550.837.6+004.94

Электрокаротаж с тороидальными катушками в процессе отбора керна: математическое моделирование

М.И. Эпов¹, И.В. Михайлов^{1, 2*}, И.В. Суродина¹, М.Н. Никитенко¹, В.Г. Мамяшев³

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

Впервые в мировой практике предложены генераторно-измерительные системы с тороидальными катушками для определения удельного электрического сопротивления (УЭС) цилиндрического керна в процессе колонкового бурения. Рассмотрено два расположения тороидальных катушек: в изолирующей стеклопластиковой трубе и в металлической сильнопроводящей немагнитной трубе внутри ферромагнитного стального корпуса керноприёмника. Разработан алгоритм двумерного конечно-разностного моделирования электрических и магнитных сигналов от стороннего кругового магнитного гармонического тока, эквивалентного тороидальной катушке, с учётом магнитной проницаемости корпуса керноприёмника. Выполнено двумерное численное моделирование реальной (синфазной) и мнимой (противофазной) составляющих вертикальной компоненты электрического поля и тангенциальной компоненты магнитного поля для практически значимого диапазона УЭС керна из терригенных коллекторов. По результатам численного моделирования выбраны оптимальные длины измерительных систем, а также операционные частоты и типы измеряемых сигналов при расположении катушек как в стеклопластиковой, так и в металлической немагнитной трубах. Предложены трансформации измеренных сигналов в кажущиеся УЭС для вертикально-неоднородных образцов. Установлены критерии соответствия измеряемых сигналов в тонкослоистых и эквивалентных электрически макроанизотропных образцах при изменении электрического контраста и толщины прослоев.

Ключевые слова: тороидальная катушка, колонковое бурение, каротаж в процессе керноотбора, удельное электрическое сопротивление, электрическая макроанизотропия, конечно-разностное моделирование, двумерная модель, трансформация сигнала

Для цитирования: Эпов М.И., Михайлов И.В., Суродина И.В., Никитенко М.Н., Мамяшев В.Г. (2026). Электрокаротаж с тороидальными катушками в процессе отбора керна: математическое моделирование. *Георесурсы*, 28(2), с. 133–151. <https://doi.org/10.18599/grs.2026.2.13>

Введение

Мировой опыт нефтепромысловой геофизики показывает, что отбор кернового материала в скважине с его дальнейшим детальным петрофизическим анализом не теряет своей актуальности. Традиционно исследуются электрические, сейсмические и тепловые свойства керна (David et al., 2017; Muraoka et al., 2023). Используются и многие другие методы, среди которых: определение объёмной влажности (Родивилов и др., 2018), пикнометрия, порометрия и газовая пермеаметрия (Zauner et al., 2020). Эффективным оказывается как комплексирование разных методов исследования петрофизических свойств (Kadhim et al., 2020), так и каротажных и керновых данных (Галкин и др., 2019).

Предлагаются новые подходы к повышению качества отбора керна (Хайруллин и др., 2022). Всё большее число кернов извлекают боковым грунтоносом. При этом необходимо достичь компромисса между снижением стоимости работ и получением достаточного количества материала для лабораторных анализов. Боковой керн сокращает время бурения скважины (Volonté et al., 2023), вместе с тем по представительности и информативности он заметно уступает забойному (Хайруллин и др., 2022).

Динамично развивается компьютерная рентгеновская микротомография керна для решения прикладных задач нефтегазовой отрасли (Пономарев и др., 2021): дефектоскопия образцов с оценкой их пригодности к стандартным петрофизическим исследованиям; определение минерального состава с анализом типа цемента; оценка глубины кольматации керна буровым раствором; выявление изменений в структуре порового пространства нефтематеринских пород в результате прогрева. Компьютерная рентгеновская микротомография обладает рядом преимуществ: например, неразрушающее воздействие на образец и возможность объёмной визуализации

* Ответственный автор: Игорь Владиславович Михайлов
e-mail: mikhayloviv@ipgg.sbras.ru

© 2026 Коллектив авторов

Статья находится в открытом доступе и распространяется в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution (CC BY) License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

скелета породы и ёмкостного пространства (Мелкишев и др., 2024). Распространённый подход заключается в восстановлении трёхмерной структуры цифрового керна по дискретному набору двумерных цифровых изображений (Hou et al., 2023). Активно применяются свёрточные нейронные сети для определения литологического состава по цифровым кернам, что является задачей нелинейной классификации (Zhang et al., 2024). На основе микрофотографических снимков разработана методика точного воспроизведения структуры пустотного пространства низкопроницаемых коллекторов в искусственных композитных структурах – кремниевых микрофлюидных чипах (Латыпова и др., 2025).

Предложен новый импульсный электромагнитный сканер для электрического профилирования полноразмерных извлечённых кернов на полу буровой установки (Mirza et al., 2024). Устройство состоит из генераторной и приёмной антенны, расположенных на противоположных боковых поверхностях керна. Сканер вставляется в опоясывающее керн или колонковку неметаллическую трубу с керном положение и движется вдоль его оси в ручном или автоматическом режиме. В излучающей антенне возбуждаются микроволновые импульсы (средняя частота 3,8 ГГц). Сначала измеряются амплитуда сигнала и время пробега импульса через сечение керна. Затем, в ходе совместной инверсии, определяют удельное электрическое сопротивление (УЭС) и диэлектрическую проницаемость поперечного среза керна с разрешающей способностью около 0,02 м. В результате получают детальную оценку водонасыщенной пористости и водонасыщения. Керновый сканер испытан на скважинах, достигнута высокая степень совпадения УЭС по керну с результатами электрокаротажа в открытом стволе, но с намного большим разрешением отдельных прослоев. Результаты инверсии достигаются в течение десятков минут после завершения сканирования керна.

Неизменно выполняется комплексирование литологических и петрофизических особенностей пород по керну и геофизическим характеристикам в разрезах скважин (Исакова и др., 2021). Одна из основных проблем оценки коллекторских свойств в этом случае – разное время проведения каротажа и отбора кернового материала (Ashena, Thonhauser, 2018). Как следствие, возникает вопрос адекватности соотнесения каротажных и керновых данных, так как свойства околоскважинного пространства между их получением изменяются. Кроме того, известную сложность, особенно в разведочных скважинах, представляет своевременный выбор оптимального интервала отбора керна (Ashena et al., 2016; Carpenter, 2016). Негативным фактором является и продолжительное время между отбором керна и его лабораторным исследованием.

При использовании стандартной конфигурации керноотбора, нет возможности получить информацию в реальном времени для локализации кровли целевого пласта: необходимо ждать полной циркуляции скважинного флюида для анализа бурового шлама с целью принятия дальнейших решений. Также, затруднительно однозначно определить, что происходит в области забоя скважины – заклинивание керна или попадание в плотный пласт. Отсутствие точного и непрерывного стратиграфического контроля приводит к временным и финансовым

затратам, связанным с дополнительными спуско-подъёмными операциями. Таким образом, традиционный отбор керна является дорогостоящей операцией не из-за самого процесса отбора керна, а из-за всех необходимых спуско-подъёмных операций (Nunez et al., 2024).

Всё более широкое применение находит каротаж в процессе бурения (logging-while-drilling, LWD), характеризующийся рядом достоинств и выраженной экономической эффективностью по сравнению с каротажом на кабеле (Новиков и др., 2021). Во-первых, существенно сокращается время на исследование наклонно-горизонтальной скважины за счёт отказа от части спуско-подъёмных операций. Во-вторых, данные, записанные вскоре после вскрытия целевых горизонтов, соответствуют малой глубине проникновения фильтрата бурового раствора (первые сантиметры), что обеспечивает наиболее достоверную оценку петрофизических свойств исследуемых пластов. В-третьих, получение каротажных данных в реальном времени даёт возможность осуществлять геонавигацию – оперативную корректировку траектории ствола наклонно-горизонтальной скважины с целью предотвращения выхода из целевой зоны и наиболее оптимального дренирования резервуара (Bittar, Aki, 2015; Pavlov et al., 2024). В последнее время разрабатываются быстрые алгоритмы многомерной инверсии данных самой распространённой модификации – электромагнитного каротажа в процессе бурения (Saputera et al., 2024). Применительно к изучению разрезов в наклонно-горизонтальных скважинах, проводится сравнительный анализ результатов электромагнитного и бокового каротажа, по-разному реагирующих на распределение геоэлектрических параметров в околоскважинном пространстве (Manuaba et al., 2024). Отдельное развитие получило направление по упреждающей геонавигации с помощью сверхглубинного азимутального электромагнитного каротажа (Sinha et al., 2022): заявленная глубинность составляет от первых до десятков метров.

Для объединения преимуществ каротажа в процессе бурения и изучения кернового материала, в начале 21-го века была предложена и успешно испытана в полевых условиях система каротажа в процессе керноотбора (logging-while-coring, LWC) (Goldberg et al., 2003, 2004, 2006). В ней были скомбинированы приборы наддолотного каротажа в процессе бурения и кабельного керноотборника. Преимущество системы заключается в возможности изучения образцов газовых гидратов, максимально приближенных к реальным условиям ненарушенного коллектора. Она включает модуль измерения УЭС с помощью электрода вблизи долота, кольцевого электрода и трёх азимутальных на некотором отдалении, а также датчик естественного гамма-излучения. Было отмечено, что при использовании такой системы отпадает необходимость каротажа на кабеле, что компенсирует дополнительные затраты, вызванные её применением. Временные издержки на каротаж во время отбора керна оказались такими же, как и на отдельные операции по отбору керна. Данные каротажа записывались в память скважинной системы.

В ходе полевых скважинных измерений в процессе керноотбора извлекались цилиндрические керны длиной 4,5 и 9,0 м. Полученные результаты верифицировались

посредством данных из соседней скважины: традиционно каротажа в процессе бурения и измерений на точечных образцах керна. Абсолютная погрешность определения глубины отбора последних составляла $\pm 0,5$ м, что неизбежно отражалось на погрешностях увязки керновых и каротажных данных (Goldberg et al., 2003, 2004, 2006). Результаты признали успешными, а технология каротажа в процессе керноотбора была запатентована (Goldberg, Myers, 2007).

Наряду с этим, были предложены датчики системы каротажа в процессе керноотбора для измерения динамических параметров бурения на долоте: забойная нагрузка на долото; момент вращения долота; давление в стволе скважины; затрубное давление; температура (Myers et al., 2006). Тестирование этих датчиков в полевых условиях показало, что они способствуют оптимизации керноотбора – достижению высокого выноса качественного керна, особенно для последующих отборов (Ashena, Thonhauser, 2018). Параметры бурения либо записывались в память прибора, либо передавались на поверхность с определённой периодичностью, например, через каждые 10 м отбора керна. Был предложен и третий вариант – телеметрия в реальном времени, но на тот момент он не был реализован на практике.

Ретроспективный анализ примерно через 10 лет после описанных исследований показал, что каротаж в процессе керноотбора значительно повысил понимание того, следует ли приступать к отбору керна или нет. При этом основная причина, по которой каротаж в процессе керноотбора не получил широкого распространения на практике, – дополнительные расходы. Кроме того, измерение параметров динамики бурения в скважине в то время не вошло в практику. В результате, нежелательная вибрация и низкая скорость каротажа и отбора керна влияли на качество керна (из-за механических причин или проникновения бурового раствора) и его заклинивание (Ashena et al., 2016; Carpenter, 2016).

В последнее время в нефтегазовой индустрии вновь появился интерес к каротажу в процессе керноотбора, была запатентована ещё одна скважинная система для экономии времени в скважине и повышения точности керноотбора – «первая в своём роде» интеллектуальная система отбора керна (intelligent coring system, ICS) (Berger, 2018; Nunez et al., 2023). Её два основных модуля, как и у вышеописанной LWC, – электро- и гамма-каротаж. Датчики УЭС – точечные или кольцевые – расположены как вблизи колонкового долота (на расстоянии около 0,10 м), так и на удалении (1,50 м), диапазон операционных частот: 50–1000 Гц. Определяется распределение УЭС поперёк и вдоль керна. Датчики гамма-излучения смонтированы на расстоянии 0,60 м от долота. Кроме того, измеряются параметры бурения в скважине: вибрация на забое, вращение внутренней колонковой трубы (индикатор заклинивания керна), угол наклона, температура (Nunez et al., 2023). Информация о вибрации помогает определять условия отбора керна, оптимизировать рабочие параметры и потенциально сохранять состояние керна. Индикатор заклинивания указывает, произошло ли заклинивание или встретился более плотный пласт, что предотвращает ненужные спуско-подъёмные операции во втором случае (Nunez et al., 2024).

Цель полевых испытаний интеллектуальной системы ICS заключалась в передаче параметров колонкового бурения и данных каротажа из скважины на поверхность в режиме реального времени – то, что не было сделано для системы LWC в начале 21-го века из-за отсутствия в то время соответствующих технологий. По результатам полевых испытаний авторы утверждают, что сделана первая в мировом опыте успешная попытка. Реализована и запись результатов измерений в память прибора. Длина извлечённого керна составила 5,0 м (Nunez et al., 2023).

Вслед за этим, интеллектуальная система отбора керна ICS была доработана с целью ещё большего уменьшения числа спуско-подъёмных операций. А именно, было реализовано внутрискважинное переключение долота между режимами бурения и керноотбора неограниченное число раз, контролируемое с поверхности (Nunez et al., 2024). В сочетании с каротажом в процессе керноотбора, кардинально сокращается число спуско-подъёмных операций, необходимых для завершения исследования всего интервала скважины. При этом обеспечивается непрерывный стратиграфический контроль. В конечном счёте, достигается экономия времени работ на скважине от нескольких часов до нескольких дней и, как следствие, ощутимое снижение стоимости.

В ходе полевых испытаний система использовалась для отбора керна длиной 6,0 м, затем последовало бурение на интервал 14,0 м, и, вслед за этим, был отобран второй керн длиной 1,0 м. Это был первый в мире задокументированный случай, когда два керна с буровой секцией между ними были взяты без подъёма забойной компоновки на поверхность для смены оборудования между режимами бурения и отбора керна (Nunez et al., 2024).

Таким образом, к настоящему времени зарубежными исследователями предложены две системы каротажа в процессе керноотбора. Однако в отечественном сервисе аналогичные системы до настоящего времени не рассматривались ни в теоретическом, ни в практическом плане. При этом принципиальная возможность определения УЭС и электрической макроанизотропии цилиндрического керна с помощью тороидальных катушек на металлической трубе вокруг него показана в работе (Эпов и др., 2024) посредством численного моделирования. Представленное исследование является продолжением указанной работы; оно нацелено на численное обоснование параметров генераторно-измерительной системы с тороидальными катушками для изучения вышеуказанных электрофизических характеристик в процессе колонкового бурения в нефтегазовой скважине.

Геоэлектрическая модель каротажа в процессе керноотбора

Рассмотрим геоэлектрическую модель отбора керна при колонковом бурении кольцевым забоем на целевом интервале пласта-коллектора, происходящим вслед за бурением сплошным забоем (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 для электрокаротажа в процессе керноотбора. Вся система размещена внутри ферромагнитного стального корпуса

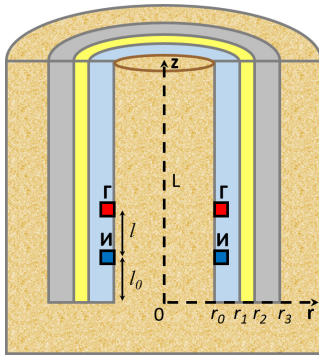


Рис. 1. Геоэлектрическая модель каротажа в процессе керна-отбора: керна (коричневый цвет) и измерительный зонд, состоящий из генераторной (красный) и измерительной (синий) тороидальных катушек внутри трубы (голубой). Система заключена в ферромагнитный стальной корпус кернаприёмника (серый); между корпусом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

кернаприёмника; между трубой с тороидами и корпусом циркулирует пресный буровой раствор. Внутри кернаприёмника, вокруг и снизу него расположена электропроводящая геологическая среда. Концентрические цилиндрические слои вокруг керна ограничены снизу на уровне $z = 0$ м и имеют бесконечную протяжённость для глубин $z > 0$ м. Колонка керна поступает в кернаприёмник и перемещается относительно трубы с измерительной системой на глубинах $z > 0$ м.

Выбраны следующие значения геометрических параметров модели: радиус керна $r_0 = 0,045$ м; внешний радиус трубы с тороидальными катушками $r_1 = 0,05$ м (толщина трубы 0,005 м); внешний радиус канала циркуляции бурового раствора $r_2 = 0,052$ м (толщина канала 0,002 м); внешний радиус корпуса кернаприёмника $r_3 = 0,057$ м (толщина корпуса 0,005 м). Измерительная тороидальная катушка размещена на фиксированном расстоянии $l_0 = 0,10$ м от нижней грани кернаприёмника ($z = 0$ м); расстояние между генераторной и измерительной катушкой (длина зонда) варьируется и составляет $l = 0,10-0,90$ м.

Параметры ферромагнитного стального корпуса кернаприёмника: УЭС $3,5 \cdot 10^{-7}$ Ом·м, относительная магнитная проницаемость $\mu^* = 80$. Анализируются два вида трубы вокруг керна: металлическая немагнитная труба с УЭС 10^{-5} Ом·м и стеклопластиковая труба с УЭС 10^6 Ом·м. УЭС пресного бурового раствора принято равным 2 Ом·м.

Численно моделируются реальная и мнимая составляющие вертикальной компоненты электрического поля E_z и тангенциальной компоненты магнитного поля H_φ . Операционные частоты – 10 кГц, 100 кГц и 1 МГц – выбраны из соображений малого влияния токов смещения на анализируемые сигналы тороидальной катушки.

Математическая постановка

Введём цилиндрическую систему координат (r, φ, z) . Пусть ось z направлена вверх и совпадает с осью цилиндрического керна. Источник поля в виде соосной тороидальной катушки описывается сторонним круговым магнитным током (Светов, 1984). Для электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} полей в изотропной среде справедливы уравнения Максвелла:

$$\begin{cases} \text{rot} \vec{H} = (\sigma - i\omega\epsilon)\vec{E} \\ \text{rot} \vec{E} = i\omega\mu\vec{H} - \vec{j}^\mu, \end{cases} \quad (1)$$

где $\sigma(r, \varphi, z)$ – удельная электропроводность среды ($\sigma = 1/\rho$, где ρ – УЭС среды), $\mu(r, \varphi, z) = \mu_0 \cdot \mu^*$ – магнитная проницаемость среды, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость немагнитной среды, μ^* – относительная магнитная проницаемость среды, зависящая от вида металла, $\epsilon(r, \varphi, z) = \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость среды, ω – циклическая частота, \vec{j}^μ – плотность стороннего магнитного тока.

В осесимметричной среде плотность стороннего магнитного тока имеет одну ненулевую тангенциальную компоненту:

$$\vec{j}^\mu = \{0, j_\varphi^\mu, 0\},$$

где $j_\varphi^\mu = i\omega\mu M_\varphi \delta(z - z_0) \delta(r - r_0)$.

Здесь $\{r_0, z_0\}$ – координаты источника, M_φ – магнитный момент, равный:

$$M_\varphi = I \cdot n_r \cdot S_r,$$

где I – ток, n_r – число витков в генераторной катушке, S_r – площадь генераторного витка. Магнитный момент при расчётах выбран равным 1 А·м².

С учётом вышеизложенного, можно переписать систему уравнений (1):

$$\begin{cases} -\frac{\partial H_\varphi}{\partial z} = (\sigma - i\omega\epsilon)E_r \\ \frac{H_\varphi}{r} + \frac{\partial H_\varphi}{\partial r} = (\sigma - i\omega\epsilon)E_z \\ \frac{\partial E_r}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial r} = i\omega\mu H_\varphi - j_\varphi^\mu. \end{cases} \quad (2)$$

Выражая компоненты E_r и E_z через H_φ , получим уравнение:

$$-\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\sigma - i\omega\epsilon} \frac{\partial H_\varphi}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r(\sigma - i\omega\epsilon)} \frac{\partial(rH_\varphi)}{\partial r} \right) - i\omega\mu H_\varphi = -j_\varphi^\mu. \quad (3)$$

Вследствие симметричности модели и источника относительно оси z :

$$H_\varphi|_{r=0} = 0.$$

Затухание магнитного поля вдали от источника:

$$\lim_{r, z \rightarrow \infty} |H_\varphi| \rightarrow 0,$$

что позволяет приближенно поставить нулевые граничные условия для реальной и мнимой составляющих компоненты H_φ на больших расстояниях R и Z от источника:

$$|H_\varphi|_{r=R} = 0, |H_\varphi|_{z=\pm Z} = 0.$$

Таким образом, сформулирована краевая задача Дирихле для уравнения (3).

Аппроксимируем задачу консервативной конечно-разностной схемой на неравномерной сетке (Самарский, Николаев, 1978). Сетка должна адекватно описывать геоэлектрическую модель, а именно образец, окруженный тонкостенными трубой и корпусом кернаприёмника. При построении сетки необходимо учесть большой контраст УЭС, возникающий на границе между образцом и внешними цилиндрическими областями, а также контрасты по магнитной проницаемости. Помимо этого, необходимо учесть, что компонента E_z определяется

из второго уравнения системы (2), и обеспечить достаточную точность для вычисления пространственной производной от H_φ .

После аппроксимации получим систему линейных алгебраических уравнений, которую целесообразно решать с помощью параллельного варианта программы PARDISO (библиотека Intel Math Kernel Library, <https://software.intel.com/en-us/articles/intel-math-kernel-library-documentation>), поскольку размерность плохо обусловленной матрицы небольшая. Численное моделирование проводилось на кластере НКС-30Т ССКЦ СО РАН, однако его можно выполнять и на персональном компьютере.

Для отладки программы двумерного конечно-разностного моделирования и оптимального выбора сетки использовались расчёты для радиально-слоистых сред, где образец и труба задавались бесконечно длинными (Эпов и др., 2018). Сравнительный анализ полученных результатов показал, что относительная погрешность двумерного моделирования не превышает 1,5% в практически значимом диапазоне УЭС керн из терригенных коллекторов.

Численное моделирование

Чувствительность сигналов зонда

в стеклопластиковой трубе к УЭС однородного изотропного керн

Численное моделирование выполнено для характерного диапазона УЭС терригенных коллекторов: от 2 до 200 Ом·м, в геометрической прогрессии (2, 3, 6, 9, 15, 26, 43, 72, 120 и 200 Ом·м). Длина цилиндрического керн бесконечная, керн непосредственно окружён стеклопластиковой трубой (рис. 1, голубой цвет). Длина зонда l варьируется от 0,10 до 0,90 м; зонды условно называются коротким (0,10 м), средним (0,50 м) и длинным (0,90 м).

Рассматривается абсолютная чувствительность сигналов η :

$$\eta = \frac{\Delta S}{\Delta p}$$

где p – изменяемый параметр, а S – анализируемый сигнал тороидальной катушки.

Анализ составляющих вертикальной компоненты электрического поля E_z при изменении УЭС однородного керн в 100 раз (2–200 Ом·м) показывает следующее. При операционной частоте 10 кГц, сигнал $\text{Re } E_z$ изменяется от $7,0 \cdot 10^{-8}$ до $2,3 \cdot 10^{-7}$ В/м (зонд 0,10 м), от $7,3 \cdot 10^{-8}$ до $1,4 \cdot 10^{-7}$ В/м (зонд 0,50 м) и от $7,6 \cdot 10^{-8}$ до $8,1 \cdot 10^{-8}$ В/м

(зонд 0,90 м). Сигнал $\text{Im } E_z$ значительно выше по величине: варьируется в пределах $1,0 \cdot 10^{-2}$ – $7,9 \cdot 10^{-2}$ В/м (короткий зонд); $9,8 \cdot 10^{-3}$ – $4,6 \cdot 10^{-2}$ В/м (средний зонд); $9,2 \cdot 10^{-3}$ – $2,7 \cdot 10^{-2}$ В/м (длинный зонд). С ростом частоты от 10 кГц до 1 МГц, $\text{Re } E_z$ увеличивается на 2–3 порядка, а $\text{Im } E_z$ – ровно в 100 раз (прямая пропорциональность частоте).

При фиксированной операционной частоте, с увеличением длины зонда от 0,10 до 0,90 м (табл. 1), чувствительность $\text{Re } E_z$ к изменению УЭС возрастает в 3,1 раза (при 10 кГц) и в 5,4 раза (100 кГц), падает в 5,3 раза (1 МГц). При этом чувствительность $\text{Im } E_z$ к увеличению УЭС керн в 100 раз одинаково возрастает в 2,7 раза на всех рассмотренных частотах при изменении длины зонда от 0,10 до 0,90 м; изменение чувствительности $\text{Im } E_z$ для приращений сигналов соседних зондов ($l = 0,10$ – $0,50$ м и $0,50$ – $0,90$ м) одинаково и составляет 1,6. Таким образом, отмечается прямая пропорциональность сигнала $\text{Im } E_z$ к равномерному изменению длины зонда.

В то же время, при фиксированной длине зонда, с увеличением операционной частоты от 10 кГц до 1 МГц (табл. 1), ситуация следующая. Сигналу $\text{Re } E_z$ свойственна неоднозначная зависимость от УЭС керн: при 1 МГц для длины зонда до $l = 0,80$ м включительно, а также на частоте 10 кГц для малых и средних длин. При изменении частоты от 10 до 100 кГц, чувствительность $\text{Re } E_z$ к изменению УЭС падает в 2,5 раза (длина зонда $l = 0,10$ м), в 1,8 раза ($l = 0,50$ м) и в 1,5 раза ($l = 0,90$ м). В то же время, дальнейшее увеличение частоты – от 100 кГц до 1 МГц – приводит к тому, что чувствительность возрастает в 4 раза ($l = 0,10$ м) и в 1,2 раза ($l = 0,50$ м), уменьшается в 7,2 раза ($l = 0,90$ м). Что касается чувствительности $\text{Im } E_z$ к изменению УЭС керн, она отсутствует при заданной длине зонда; приращения составляют 0,1 ($l = 0,10$ м), 0,2 ($l = 0,50$ м) и 0,4 раза ($l = 0,90$ м).

Итак, чувствительность $\text{Re } E_z$ возрастает с ростом длины зонда при 10 и 100 кГц, уменьшается при 1 МГц; при увеличении частоты ведёт себя нерегулярным образом. Чувствительность $\text{Im } E_z$ возрастает с ростом длины зонда, не зависит от частоты при фиксированной длине зонда.

Однако для обеих составляющих E_z , при изменении УЭС в 100 раз от 2 до 200 Ом·м, максимальное абсолютное приращение составляет: для $\text{Re } E_z$ – 0,94, для $\text{Im } E_z$ – 0,35, абсолютная чувствительность сигналов имеет порядок 10^{-3} (табл. 1), что недостаточно для решения практических

Частота		10 кГц		100 кГц		1 МГц	
Зонд	Δp	$\Delta \text{Re } E_z$	$\Delta \text{Im } E_z$	$\Delta \text{Re } E_z$	$\Delta \text{Im } E_z$	$\Delta \text{Re } E_z$	$\Delta \text{Im } E_z$
0,10 м	100	0,30	0,13	0,12	0,13	0,48	0,13
0,50 м	100	0,54	0,21	0,30	0,21	0,36	0,21
0,90 м	100	0,94	0,35	0,65	0,35	0,09	0,35
Зонд	Δp	$\eta(\text{Re } E_z)$	$\eta(\text{Im } E_z)$	$\eta(\text{Re } E_z)$	$\eta(\text{Im } E_z)$	$\eta(\text{Re } E_z)$	$\eta(\text{Im } E_z)$
0,10 м	100	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
0,50 м	100	$5,4 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$
0,90 м	100	$9,4 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$9,0 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$

Табл. 1. Относительное изменение и чувствительность составляющих E_z зонда при увеличении УЭС однородного керн от 2 до 200 Ом·м на частотах от 10 кГц до 1 МГц. Стеклопластиковая труба.

задач. По этой причине, компонента E_z для случая стеклопластиковой трубы далее не рассматривается.

Ситуация становится существенно иной при рассмотрении составляющих тангенциальной компоненты магнитного поля H_ϕ (табл. 2). Так, при аналогичном росте УЭС в 100 раз, изменение сигналов $\text{Im } H_\phi$ составляет первые десятки единиц, а $\text{Re } H_\phi$ – десятки-сотни единиц. Другими словами, отмечается средняя чувствительность $\text{Im } H_\phi$ к рассматриваемому изменению УЭС ($\eta = 0,13-0,35$), в то время как чувствительность $\text{Re } H_\phi$ – высокая и очень высокая ($\eta = 0,72-7,30$).

Из анализа составляющих тангенциальной компоненты магнитного поля H_ϕ при изменении УЭС однородного керна от 2 до 200 Ом·м вытекает следующее. С увеличением длины зонда от 0,10 до 0,90 м при фиксированной операционной частоте, чувствительность $\text{Re } H_\phi$ к изменению УЭС возрастает примерно одинаково: в 2,8 (10 кГц), в 2,7 (100 кГц) и в 2,4 раза (1 МГц). Рассматривая попарные приращения длины зонда при фиксированной частоте (от 0,10 до 0,50 м и от 0,50 до 0,90 м), заметим, что чувствительность $\text{Re } H_\phi$ в обоих случаях одинаково возрастает в 1,7 (10 кГц), в 1,6 (100 кГц) и в 1,5 раза (1 МГц). Другими словами, наблюдается кратный рост чувствительности с увеличением длины зонда. Чувствительность $\text{Im } H_\phi$ к изменению УЭС на рассматриваемых частотах возрастает в 2,7 раза при изменении длины зонда от 0,10 до 0,90 м, в 1,6 раза при изменении длины зонда от 0,10 до 0,50 м и от 0,50 до 0,90 м. То есть, как и для $\text{Re } H_\phi$, отмечается кратный рост чувствительности с увеличением длины зонда.

С увеличением операционной частоты от 10 кГц до 1 МГц при фиксированной длине зонда, чувствительность $\text{Re } H_\phi$ к изменению УЭС растёт в 4,3 ($l = 0,10$ м), в 4,0 ($l = 0,50$ м) и в 3,7 раза ($l = 0,90$ м). При этом попарные приращения частоты от 10 до 100 кГц и от 100 кГц до 1 МГц дают прирост чувствительности 1,9 и 2,2 ($l = 0,10$ м), 1,9 и 2,1 ($l = 0,50$ м), 1,9 и 2,0 ($l = 0,90$ м). Однако чувствительность $\text{Im } H_\phi$ к изменению УЭС для заданной длины зонда не зависит от частоты; абсолютные приращения равны 13,0 ($l = 0,10$ м), 21,2 ($l = 0,50$ м) и 34,6 ($l = 0,90$ м).

Итак, при увеличении УЭС керна в 100 раз, чувствительность $\text{Re } H_\phi$ и $\text{Im } H_\phi$ кратно возрастает с увеличением длины зонда при фиксированной частоте. Чувствительность $\text{Re } H_\phi$ при фиксированной длине зонда примерно пропорциональна частоте. Чувствительность

$\text{Im } H_\phi$ не зависит от частоты при фиксированной длине зонда, что аналогично компоненте $\text{Im } E_z$. Сравнивая табл. 1 и табл. 2, можно сделать вывод, что чувствительность $\text{Im } H_\phi$ ровно в 100 раз больше чувствительности $\text{Im } E_z$.

На рис. 2–3 показаны зависимости в билогарифмическом масштабе сигнала $\text{Re } H_\phi$ для короткого (рис. 2) и длинного (рис. 3) зондов от УЭС бесконечного однородного изотропного керна – графики трансформаций. Из анализа следует, во-первых, однозначная зависимость $\text{Re } H_\phi$ от УЭС керна. Во-вторых, достоверность аппроксимации графиков степенной функцией (коэффициент детерминации R^2) возрастает с ростом как операционной частоты, так и длины зонда. На частоте 1 МГц, для длинного зонда

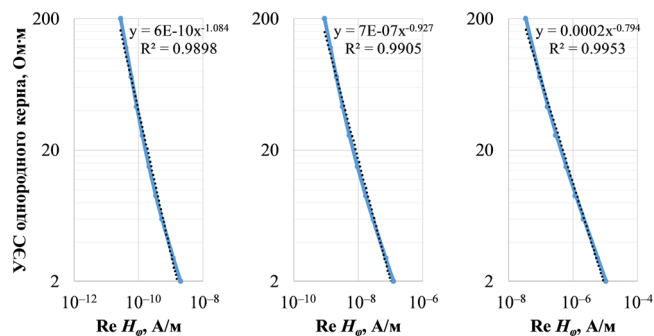


Рис. 2. Графики трансформаций $\text{Re } H_\phi$ короткого зонда в УЭС однородного изотропного керна для тороидальных катушек в стеклопластиковой трубе. Частоты: 10 кГц (слева), 100 кГц (по центру), 1 МГц (справа).

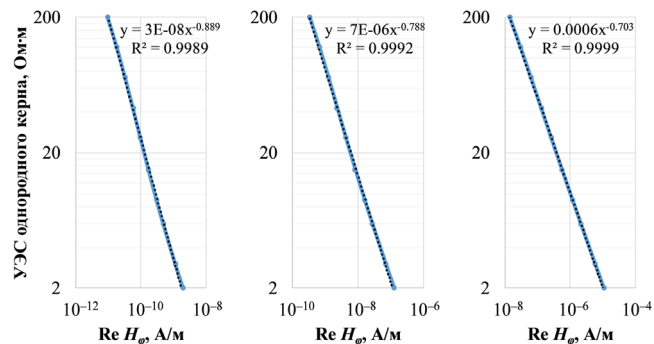


Рис. 3. Графики трансформаций $\text{Re } H_\phi$ длинного зонда в УЭС однородного изотропного керна для тороидальных катушек в стеклопластиковой трубе. Частоты: 10 кГц (слева), 100 кГц (по центру), 1 МГц (справа).

Частота		10 кГц		100 кГц		1 МГц	
Зонд	$\Delta\rho$	$\Delta\text{Re } H_\phi$	$\Delta\text{Im } H_\phi$	$\Delta\text{Re } H_\phi$	$\Delta\text{Im } H_\phi$	$\Delta\text{Re } H_\phi$	$\Delta\text{Im } H_\phi$
0,10 м	100	71,9	13,0	140	13,0	309	13,0
0,50 м	100	120	21,2	227	21,2	472	21,2
0,90 м	100	199	34,6	370	34,6	730	34,6
Зонд	$\Delta\rho$	$\eta(\text{Re } H_\phi)$	$\eta(\text{Im } H_\phi)$	$\eta(\text{Re } H_\phi)$	$\eta(\text{Im } H_\phi)$	$\eta(\text{Re } H_\phi)$	$\eta(\text{Im } H_\phi)$
0,10 м	100	0,72	0,13	1,40	0,13	3,09	0,13
0,50 м	100	1,20	0,21	2,27	0,21	4,72	0,21
0,90 м	100	1,99	0,35	3,70	0,35	7,30	0,35

Табл. 2. Относительное изменение и чувствительность составляющих H_ϕ зонда при увеличении УЭС однородного керна от 2 до 200 Ом·м на частотах от 10 кГц до 1 МГц. Стеклопластиковая труба.

(рис. 3, справа) наблюдается практически прямая пропорциональность (линейная связь) между УЭС и сигналом: $R^2 = 0,9999$.

В свою очередь, на рис. 4–5 показаны аналогичные графики для сигнала $\text{Im } H_\phi$. Основной вывод – идентичные однозначные зависимости $\text{Im } H_\phi$ от УЭС ядра при увеличении частоты от 10 кГц до 1 МГц для фиксированной длины зонда (нет частотной зависимости). С ростом длины зонда происходит ухудшение достоверности аппроксимации (возрастающее отклонение от линейности в билогарифмическом масштабе): R^2 уменьшается от 0,9991 до 0,9889.

Итак, для электрокаротажа однородного изотропного ядра в процессе бурения с помощью тороидальных катушек в стеклопластиковой трубе рекомендуется использовать составляющие $\text{Re } H_\phi$ и $\text{Im } H_\phi$, как обладающие достаточной чувствительностью к изменению УЭС ядра в целевом диапазоне УЭС терригенных коллекторов. Сигнал $\text{Re } H_\phi$ обладает высокой и очень высокой чувствительностью, а $\text{Im } H_\phi$ – средней. При этом подходят зонды любой длины – от короткого ($l = 0,10$ м) до длинного ($l = 0,90$ м).

Чувствительность сигналов зонда в металлической немагнитной трубе к УЭС однородного изотропного ядра

Ядро непосредственно окружено металлической немагнитной трубой (рис. 1, голубой цвет). Анализируются аналогичные приращения (абсолютные чувствительности)

составляющих E_z и H_ϕ при увеличении УЭС однородного изотропного ядра от 2 до 200 Ом·м (табл. 3 и 4).

При операционной частоте 10 кГц, сигнал $\text{Re } E_z$ изменяется от $7,1 \cdot 10^{-7}$ до $6,8 \cdot 10^{-7}$ В/м (зонд 0,10 м), от $8,3 \cdot 10^{-7}$ до $8,1 \cdot 10^{-7}$ В/м (зонд 0,50 м) и от $8,2 \cdot 10^{-7}$ до $7,9 \cdot 10^{-7}$ В/м (зонд 0,90 м). То есть, по сравнению со стеклопластиковой трубой, сигнал $\text{Re } E_z$ в 2,9–11,4 раз больше. Сигнал $\text{Im } E_z$ при 10 кГц становится меньше на 3–4 порядка относительно стеклопластика: составляет около $6,7 \cdot 10^{-6}$ В/м (короткий зонд), изменяется в пределах $4,7 \cdot 10^{-6}$ – $4,6 \cdot 10^{-6}$ В/м (средний зонд) и $3,2 \cdot 10^{-6}$ – $3,1 \cdot 10^{-6}$ В/м (длинный зонд). С ростом частоты от 10 кГц до 1 МГц, $\text{Re } E_z$ может увеличиваться на 2 порядка (короткий зонд), расти в 20,0 раз (средний зонд), уменьшаться в 1,2 раза (длинный зонд). Сигнал $\text{Im } E_z$ короткого зонда при этом может как увеличиваться до 4,8 раз, так и уменьшаться до 12,4 раз, для среднего зонда увеличивается в 4,0 раза, а для длинного зонда – растёт в 2,7 раза. То есть, изменение сигналов $\text{Re } E_z$ и $\text{Im } E_z$ для тороидов на металлической немагнитной трубе происходит нерегулярно с ростом частоты сигнала; прямая пропорциональность $\text{Im } E_z$ частоте, отмеченная для стеклопластиковой трубы, отсутствует.

Для $\text{Re } E_z$ (табл. 3), при изменении УЭС однородного изотропного ядра от 2 до 200 Ом·м, наибольшее приращение равно 1,1 ($\eta = 1,1 \cdot 10^{-2}$), а для $\text{Im } E_z$ – 2,2 ($\eta = 2,2 \cdot 10^{-2}$) при коротком зонде, что недостаточно для решения практических задач. По этой причине, составляющие $\text{Re } E_z$ и $\text{Im } E_z$ для металлической немагнитной трубы, как и для стеклопластиковой, далее не рассматриваются.

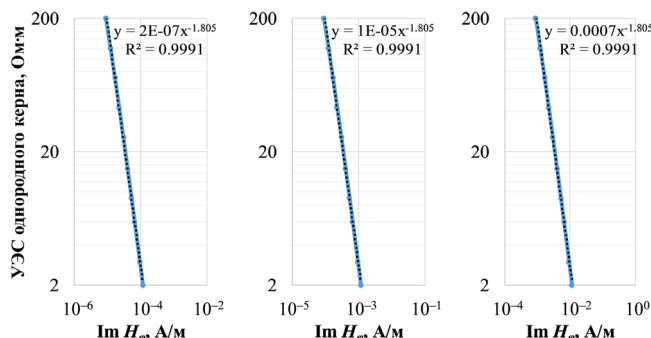


Рис. 4. Графики трансформаций $\text{Im } H_\phi$ короткого зонда в УЭС однородного изотропного ядра для тороидальных катушек в стеклопластиковой трубе. Частоты: 10 кГц (слева), 100 кГц (по центру), 1 МГц (справа).

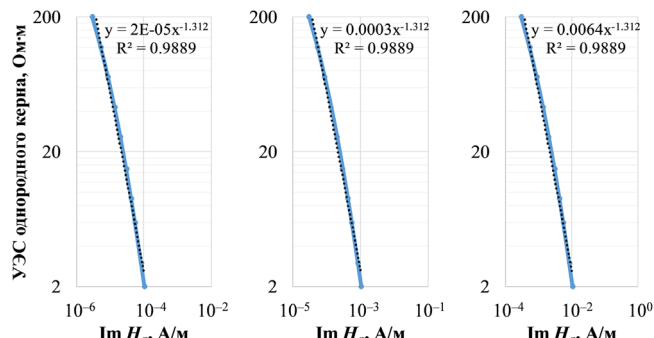


Рис. 5. Графики трансформаций $\text{Im } H_\phi$ длинного зонда в УЭС однородного изотропного ядра для тороидальных катушек в стеклопластиковой трубе. Частоты: 10 кГц (слева), 100 кГц (по центру), 1 МГц (справа).

Частота		10 кГц		100 кГц		1 МГц	
Зонд	$\Delta\rho$	$\Delta\text{Re } E_z$	$\Delta\text{Im } E_z$	$\Delta\text{Re } E_z$	$\Delta\text{Im } E_z$	$\Delta\text{Re } E_z$	$\Delta\text{Im } E_z$
0,10 м	100	1,05	1,01	1,05	0,99	0,30	2,18
0,50 м	100	1,03	1,03	1,03	1,03	1,02	1,03
0,90 м	100	1,03	1,03	1,03	1,02	0,99	1,03
Зонд	$\Delta\rho$	$\eta(\text{Re } E_z)$	$\eta(\text{Im } E_z)$	$\eta(\text{Re } E_z)$	$\eta(\text{Im } E_z)$	$\eta(\text{Re } E_z)$	$\eta(\text{Im } E_z)$
0,10 м	100	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$9,9 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$
0,50 м	100	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$
0,90 м	100	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$9,9 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$

Табл. 3. Относительное изменение и чувствительность составляющих E_z зонда при увеличении УЭС однородного ядра от 2 до 200 Ом·м на частотах от 10 кГц до 1 МГц. Металлическая немагнитная труба.

Частота		10 кГц		100 кГц		1 МГц	
Зонд	$\Delta\rho$	$\Delta\text{Re } H_\varphi$	$\Delta\text{Im } H_\varphi$	$\Delta\text{Re } H_\varphi$	$\Delta\text{Im } H_\varphi$	$\Delta\text{Re } H_\varphi$	$\Delta\text{Im } H_\varphi$
0,10 м	100	1,09	11,4	1,10	16,2	1,01	83,8
0,20 м	100	1,05	1,11	1,05	1,15	1,01	2,80
0,50 м	100	1,05	1,05	1,05	1,05	1,04	1,00
Зонд	$\Delta\rho$	$\eta(\text{Re } H_\varphi)$	$\eta(\text{Im } H_\varphi)$	$\eta(\text{Re } H_\varphi)$	$\eta(\text{Im } H_\varphi)$	$\eta(\text{Re } H_\varphi)$	$\eta(\text{Im } H_\varphi)$
0,10 м	100	0,01	0,11	0,01	0,16	0,01	0,84
0,20 м	100	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
0,50 м	100	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Табл. 4. Относительное изменение и чувствительность составляющих H_φ зонда при увеличении УЭС однородного керна от 2 до 200 Ом·м на частотах от 10 кГц до 1 МГц. Металлическая немагнитная труба.

Очень низкая чувствительность к изменению УЭС керна в 100 раз отмечается и для сигнала $\text{Re } H_\varphi$ (табл. 4): относительное приращение не превышает 1,1 ($\eta = 0,01$, короткий зонд). Поэтому компонента $\text{Re } H_\varphi$ для металлической немагнитной трубы далее не анализируется.

Таким образом, для тороидов в металлической немагнитной трубе остаётся рассмотреть сигнал $\text{Im } H_\varphi$. При фиксированной длине зонда $l = 0,10$ м, с ростом частоты от 10 кГц до 1 МГц, чувствительность $\text{Im } H_\varphi$ к изменению УЭС в 100 раз – от средней при 10–100 кГц ($\Delta\text{Im } H_\varphi$ 11,4–16,2 раза, $\eta = 0,11$ –0,16) до высокой при 1 МГц ($\Delta\text{Im } H_\varphi$ 83,8 раза, $\eta = 0,84$).

При увеличении длины зонда лишь до 0,20 м, чувствительность резко падает: приращение $\Delta\text{Im } H_\varphi$ составляет лишь 1,1–1,2 раза ($\eta = 0,01$) на частотах 10–100 кГц, и 2,8 раза ($\eta = 0,03$) на 1 МГц. При средней длине зонда ($l = 0,50$ м), чувствительность $\text{Im } H_\varphi$ к изменению УЭС уже фактически отсутствует ($\eta = 0,01$).

Резюмируя, для металлической немагнитной трубы рекомендуется использовать короткий зонд ($l = 0,10$ м), сигнал $\text{Im } H_\varphi$, при этом оптимальная частота – 1 МГц (обеспечивает высокую чувствительность к изменению УЭС керна), в то время как частоты 10 и 100 кГц обеспечивают среднюю чувствительность.

Графики трансформаций $\text{Im } H_\varphi$ короткого зонда в билигарифмическом масштабе (рис. 6) показывают, что с увеличением частоты повышается достоверность их аппроксимации степенной функцией; на частоте 1 МГц зависимость сигнала от УЭС однородного керна становится почти линейной, $R^2 = 0,9996$.

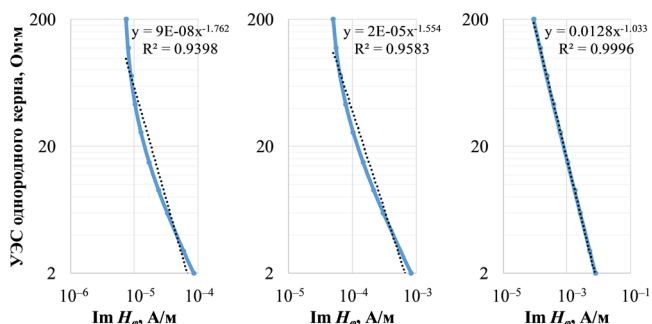


Рис. 6. Графики трансформаций $\text{Im } H_\varphi$ короткого зонда в УЭС однородного изотропного керна для тороидальных катушек в металлической немагнитной трубе. Частоты: 10 кГц (слева), 100 кГц (по центру), 1 МГц (справа).

На следующем этапе, для задач электрического профилирования однородных и неоднородных цилиндрических кернов внутри керноприёмника, проводилось всестороннее тестирование алгоритма трансформаций сигналов в кажущиеся УЭС по построенным степенным зависимостям. Были рассмотрены стеклопластиковая и металлическая немагнитная трубы с тороидами, набор длин и операционных частот зондов, разные распределения УЭС вдоль керна. Тестирование показало, что небольшое отклонение коэффициента детерминации R^2 от единицы может приводить к заметным ошибкам при трансформации сигналов в УЭС керна. Иными словами, аппроксимация степенными функциями не обеспечивает достаточной точности в практически значимом диапазоне УЭС терригенных коллекторов 2–200 Ом·м. По этой причине, был реализован алгоритм одномерной сплайн-интерполяции кубическими сплайнами (de Boor, 2001) для восстановления УЭС вдоль керна по реальной или мнимой составляющим тангенциальной компоненты магнитного поля H_φ . Все представленные далее трансформации сигналов в УЭС керна получены на основе сплайн-интерполяции.

Профилерование протяжённого однородного изотропного керна в стеклопластиковой трубе

Рассматривается упрощённый случай, когда геологическая среда вокруг корпуса керноприёмника характеризуется одинаковым значением УЭС 15 Ом·м, что соответствует нефтенасыщенному песчанику. Высота колонки однородного керна увеличивается от 0,0 м до бесконечности, с шагом 0,01 м. Тороидальные катушки закреплены в стеклопластиковой трубе вокруг керна. На рис. 7 показаны основные этапы электрокаротажа при отборе керна. После бурения до целевого интервала керноотбора, внутреннее пространство керноприёмника заполнено буровым раствором с УЭС 2 Ом·м (рис. 7, слева). Затем, по мере продвижения вверх внутри трубы, керн заполняет сначала часть её пространства (рис. 7, в центре), а потом всё пространство внутри (рис. 7, справа). Численно моделируются сигналы $\text{Re } H_\varphi$ и $\text{Im } H_\varphi$, длина зонда: $l = 0,10$ –0,90 м.

Трансформации сигналов электропрофилерования выбуриваемого керна в кажущиеся УЭС показаны на рис. 8 ($\text{Re } H_\varphi$) и рис. 9 ($\text{Im } H_\varphi$). Начальная точка на оси ординат соответствует положению верхней границы керна

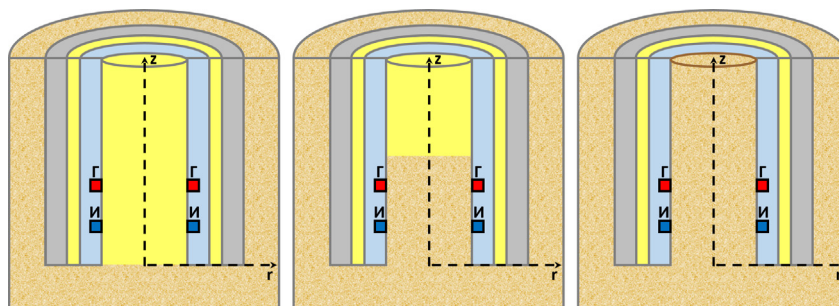


Рис. 7. Этапы электрокаротажка с тороидальными катушками в процессе отбора протяжённого однородного изотропного керна. Слева – перед отбором целевого керна, в центре – промежуточный этап отбора, справа – конечный этап.

на глубине $z = 0$ м (расстояние от измерительной катушки $l_0 = 0,10$ м). Пунктирными линиями показаны две асимптоты: серая соответствует УЭС бурового раствора $2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, а чёрная – УЭС керна $15 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

В начальный момент керноотбора 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. Далее принято, что выход на асимптоту происходит тогда, когда относительное отклонение между значением сигнала и его асимптотическим значением не превышает 3%.

Из анализа диаграмм трансформаций $\text{Re } H_\phi$ в кажущиеся УЭС вдоль однородного нефтенасыщенного керна песчаника с УЭС $15 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (рис. 8) следует, прежде всего, незначительное влияние операционной частоты: отмечается минимальное расхождение диаграмм для частот в рассматриваемом диапазоне от 10 кГц до 1 МГц . Говоря о влиянии длины зонда на скорость достижения асимптотического значения УЭС керна, нет строгой зависимости. Однако можно отметить, что для рассмотренных длин зонда от $0,10$ до $0,90$ м, асимптота достигается при высоте колонки керна $6,62$ – $7,24$ м. При уменьшении УЭС керна до $3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (водонасыщенный песчаник), выход на асимптоту существенно замедляется; она достигается при значительно большей высоте колонки: $9,52$ – $10,04$ м. В обратной ситуации, для высокоомного керна с УЭС

$120 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (газонасыщенный песчаник), достижение асимптоты происходит для колонки керна высотой $2,45$ – $3,25$ м. Добавим, что расхождение трансформаций $\text{Re } H_\phi$ начинает проявляться тем сильнее, чем больше УЭС керна. Так, например, для колонки высокоомного керна с УЭС $120 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ отмечается выраженное расхождение диаграмм трансформаций на разных частотах при высоте колонки до около $3,0$ м, после чего диаграммы накладываются друг на друга.

Анализ схожих диаграмм трансформаций $\text{Im } H_\phi$ (рис. 9) показывает, что частотная зависимость получаемых трансформаций отсутствует при любом УЭС керна в диапазоне 2 – $200 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. По сравнению с $\text{Re } H_\phi$, $\text{Im } H_\phi$ – более локальный сигнал; асимптотическое значение достигается для разных длин зонда быстрее. Так, для керна нефтенасыщенного песчаника с УЭС $15 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ – при высоте колонки керна $5,15$ – $5,55$ м, для водонасыщенного песчаника $3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ – при высоте колонки $7,24$ – $7,64$ м, для газонасыщенного песчаника $120 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ – при высоте $2,23$ – $2,51$ м.

Профилирование протяжённого однородного изотропного керна в металлической немагнитной трубе

Рассматривается аналогичный случай (рис. 7), когда тороидальные катушки смонтированы в металлической немагнитной трубе (рис. 10). Анализируется сигнал $\text{Im } H_\phi$ при компактной длине зонда $0,10$ м. УЭС однородного

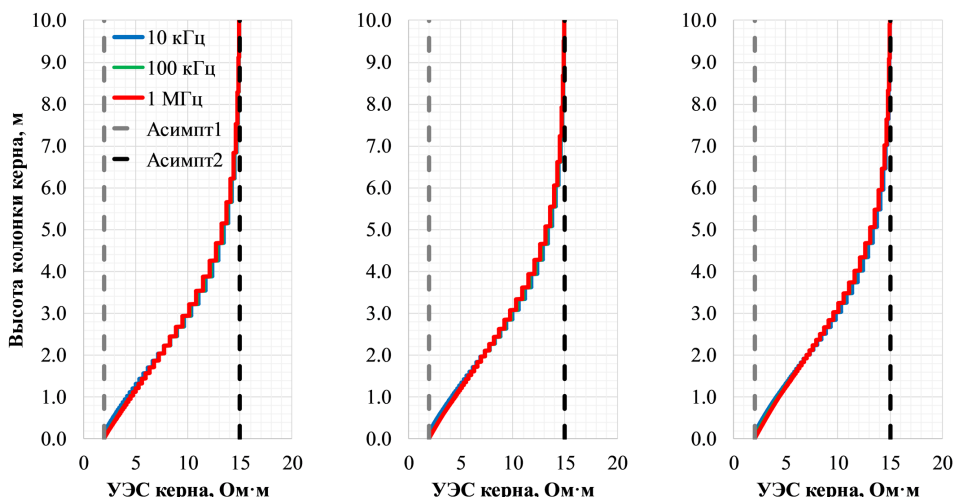


Рис. 8. Кажущиеся УЭС по $\text{Re } H_\phi$ при профилировании протяжённого однородного керна нефтенасыщенного песчаника с УЭС $15 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Тороидальные катушки в стеклопластиковой трубе. Длина зонда: $0,10$ м (слева), $0,50$ м (по центру), $0,90$ м (справа).

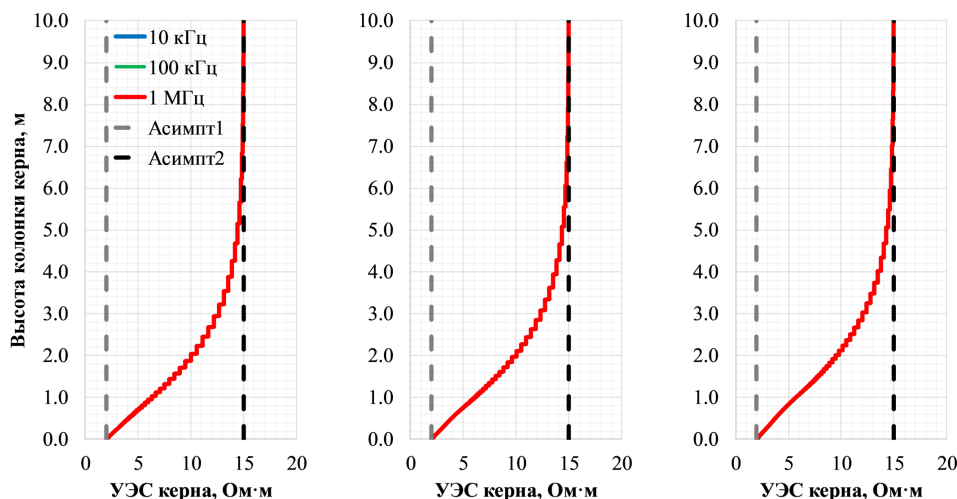


Рис. 9. Кажущиеся УЭС по $\text{Im } H_\varphi$ при профилировании протяжённого однородного керна нефтенасыщенного песчаника с УЭС 15 Ом·м. Тороидальные катушки в стеклопластиковой трубе. Длина зонда: 0,10 м (слева), 0,50 м (по центру), 0,90 м (справа)

кернa составляет 3, 15 и 120 Ом·м, что соответствует водо-, нефте- и газонасыщенному песчанику.

Из анализа диаграмм электрокаротажа в процессе отбора керна вытекает очень высокая локальность сигнала $\text{Im } H_\varphi$ 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 $z = 0,10$ м и $z = 0,20$ 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 тороидальной катушки.

Подводя итог численному моделированию сигналов электрокаротажа протяжённого однородного керна в процессе бурения, отметим следующее. Для стеклопластиковой трубы с тороидальными катушками в рассмотренном диапазоне УЭС керна 2–200 Ом·м, локальность измерений существенно зависит от его УЭС. Так, при высоких УЭС (120–200 Ом·м), асимптотическое значение внутри керна достигается при длине керна 1,9–3,0 м (по $\text{Re } H_\varphi$) и 1,5–2,5 м (по $\text{Im } H_\varphi$). При низких УЭС (первые

омметры) выход трансформаций на асимптоту происходит значительно дальше: при длине керна 9,0–10,0 м ($\text{Re } H_\varphi$) и 7,0–8,0 м ($\text{Im } H_\varphi$). То есть, сигнал $\text{Im } H_\varphi$ более локален. С ростом операционной частоты скорость выхода диаграмм трансформаций на асимптоту либо не изменяется ($\text{Re } H_\varphi$, $\text{Im } H_\varphi$), либо замедляется ($\text{Re } H_\varphi$). Зависимость от длины зонда в диапазоне 0,10–0,90 м слабая. При рассмотрении металлической немагнитной трубы с тороидальными катушками ($\text{Im } H_\varphi$, короткий зонд 0,10 м), выход диаграмм трансформаций на асимптотическое значение происходит через 0,03 м после перехода края керна через генераторную ($z = 0,20$ м) тороидальную катушку во всём рассмотренном диапазоне УЭС керна. Другими словами, локальность измерений керна в металлической немагнитной трубе выше на порядки по сравнению со стеклопластиковой трубой.

Профилирование составного керна в стеклопластиковой трубе

Моделируется ситуация, когда отбор керна производится с целевого интервала пласта-коллектора толщиной 6 м с переменным газо-нефте-водонасыщением (рис. 11).

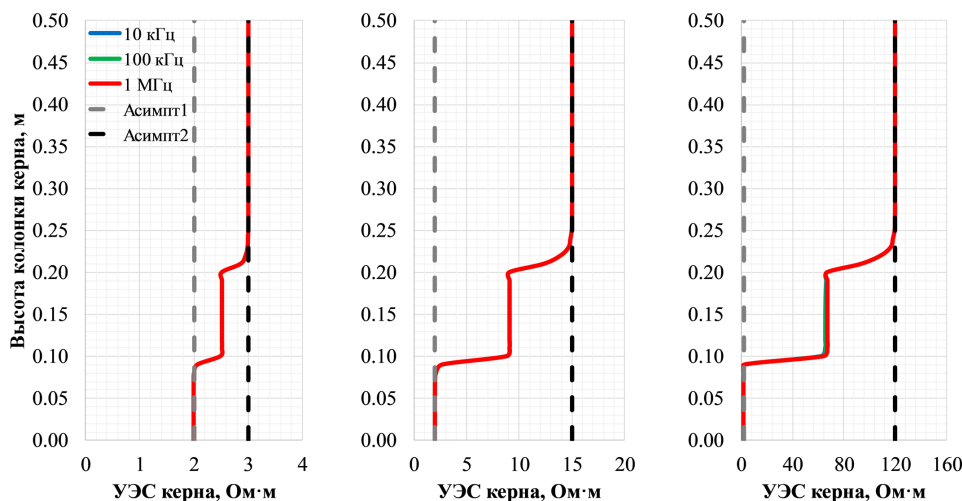


Рис. 10. Кажущиеся УЭС по $\text{Im } H_\varphi$ при профилировании протяжённого однородного керна. Тороидальные катушки в металлической немагнитной трубе. Длина зонда 0,10 м. УЭС керна: 3 Ом·м (слева), 15 Ом·м (по центру), 120 Ом·м (справа).

Коллектор состоит из 24 маломощных прослоев, толщина каждого из которых составляет 0,25 м. УЭС прослоев составного ядра уменьшаются сверху вниз в геометрической прогрессии – от газонасыщения до нефте- и водонасыщения: 200; 164; 134; 110; 90; 73; 60; 49; 40; 33; 27; 22; 18; 15; 12; 9,9; 8,1; 6,6; 5,4; 4,5; 3,6; 3,0; 2,4; 2,0 Ом·м. Над коллектором залегают глины (УЭС 4 Ом·м), под коллектором расположены аргиллиты (10 Ом·м). Высота колонки ядра увеличивается с шагом 0,01 м. Рассматриваются сигналы $Re H_\varphi$ и $Im H_\varphi$, длина зонда $l = 0,10–0,90$ м.

Результаты электрокаротажа в процессе отбора составного ядра приведены в логарифмическом масштабе на рис. 12–13. Первая точка по оси ординат ($z = 0$ м) соответствует положению кровли коллектора на границе ядроприёмника, промежуточная точка ($z = 6,0$ м) – когда весь целевой ядро расположен внутри трубы. Последний интервал ($z = 6,0–10,0$ м) отражает ситуацию, когда дополнительно выбурено 4 м ниже лежащих аргиллитов – для оценки локальности и асимптотического поведения сигналов тороидальной катушки. Для наглядности приводится модельное распределение УЭС в коллекторе (лиловый цвет) и три асимптотических значения: буровой раствор 2 Ом·м (серый пунктир), кровля коллектора 200 Ом·м (чёрный пунктир) и подстилающие коллектор аргиллиты с УЭС 10 Ом·м (точечный пунктир).

Анализ кажущихся УЭС по $Re H_\varphi$ (рис. 12) и $Im H_\varphi$ (рис. 13) показывает, во-первых, что в начальной точке ($z = 0$ м) на сильноконтрастной границе бурового раствора

(2 Ом·м) и кровли коллектора (200 Ом·м) кажущееся УЭС составляет примерно 3 Ом·м – прежде всего, вследствие расположения тороидальных катушек вокруг области, заполненной буровым раствором, а также влияния кровли коллектора за пределами ядроприёмника. Кажущееся УЭС по $Re H_\varphi$ превышает УЭС бурового раствора на 40,2–62,6%; эффект тем значительнее, чем меньше длина зонда и операционная частота. Для $Im H_\varphi$ кажущееся УЭС завышается на 58,3–67,0% с уменьшением длины зонда, независимо от частоты.

При продвижении колонки ядра вверх по ядроприёмнику, вскоре достигаются максимумы кажущегося УЭС по $Re H_\varphi$ и $Im H_\varphi$, соответствующие кровельной части коллектора, для всего набора длин зондов и операционных частот. Для $Re H_\varphi$ (рис. 12) выражена зависимость диаграмм от частоты и длины зонда. Кажущееся УЭС здесь максимальное и наиболее близко к модельному 200 Ом·м при 10 кГц и зонде 0,10 м, а минимальное на частоте 1 МГц для зонда 0,90 м. Более конкретно, максимумы кажущегося УЭС для зонда 0,10 м достигаются на глубине 0,88 м при 10 и 100 кГц (10 кГц – 154 Ом·м, 100 кГц – 89,8 Ом·м) и на глубине 1,12 м при 1 МГц (61,7 Ом·м). Относительные отклонения диаграмм кажущегося УЭС от модельных составляют 22,8%, 55,1% и 69,1% соответственно. С ростом длины зонда максимумы смещаются вверх в сторону меньших УЭС. Так, для зонда 0,50 м они достигаются на глубинах 1,10 м (10 кГц, 116 Ом·м), 1,15 м (100 кГц, 78,2 Ом·м) и 1,28 м (1 МГц, 59,2 Ом·м). Относительные отклонения диаграмм равны 42,0%, 60,9%

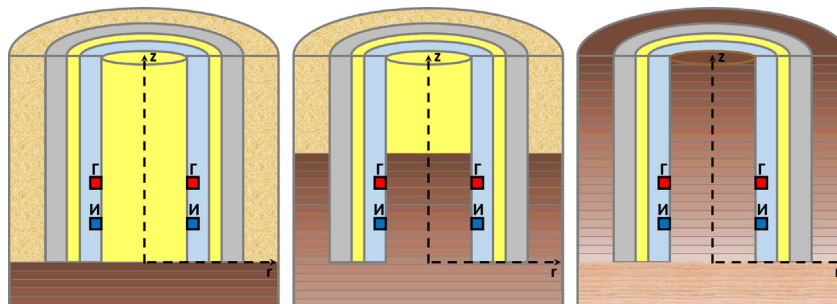


Рис. 11. Этапы электрокаротажа с тороидальными катушками в процессе отбора составного ядра длиной 6,0 м с переменным флюидонасыщением. Слева – перед отбором целевого ядра, в центре – промежуточный этап отбора, справа – конечный этап.

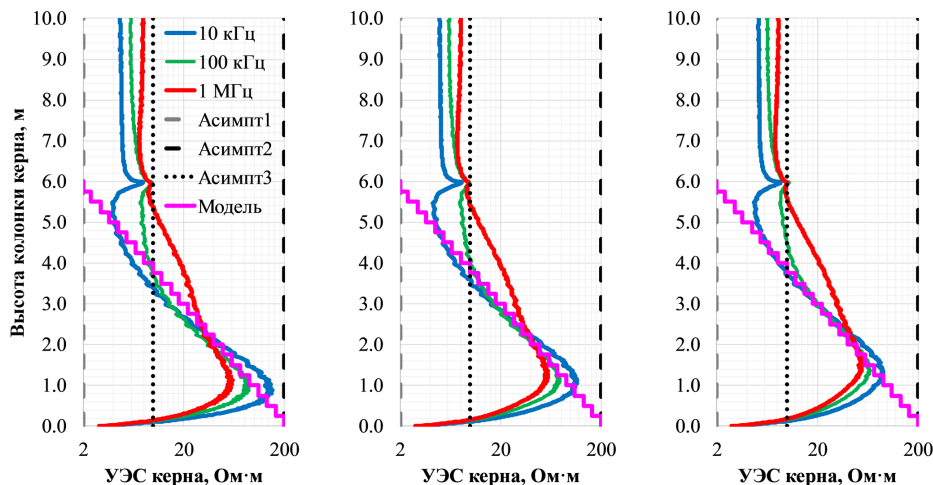


Рис. 12. Кажущиеся УЭС по $Re H_\varphi$ при профилировании составного ядра длиной 6,0 м с переменным флюидонасыщением. Тороидальные катушки в стеклопластиковой трубе. Длина зонда: 0,10 м (слева), 0,50 м (по центру), 0,90 м (справа).

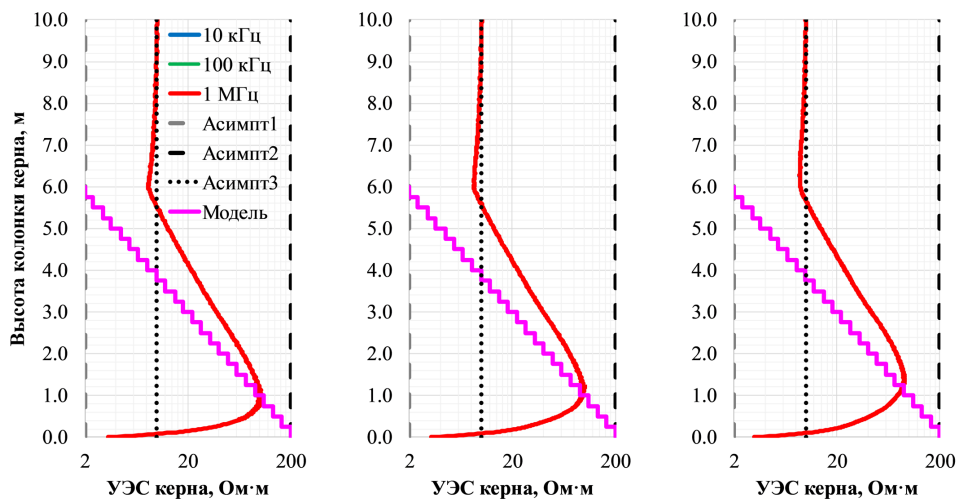


Рис. 13. Кажущиеся УЭС по $\text{Im } H_\varphi$ при профилировании составного керна длиной 6,0 м с переменным флюидонасыщением. Тороидальные катушки в стеклопластиковой трубе. Длина зонда: 0,10 м (слева), 0,50 м (по центру), 0,90 м (справа).

и 70,4%. В свою очередь, для зонда 0,90 м максимумы отмечаются на глубинах 1,36 м (10 кГц – 90,5 Ом·м, 100 кГц – 67,0 Ом·м) и 1,55 м (1 МГц – 55,7 Ом·м). Относительные отклонения диаграмм: 54,8%, 66,5% и 72,2%. Таким образом, с ростом как длины зонда, так и частоты, значения кажущегося УЭС на уровне максимумов для $\text{Re } H_\varphi$ уменьшаются (относительное отклонение кажущегося УЭС от модельного возрастает).

Другой важный момент заключается в том, что кажущееся УЭС по $\text{Re } H_\varphi$ на 10 кГц (синий цвет) наиболее близко к модельному (лиловый) не только на уровне максимума, но и на протяжении составного керна. С увеличением длины зонда до 0,90 м, с одной стороны, кажущееся УЭС на уровне максимума при 10 кГц всё более далёко от модельного. С другой стороны, за счёт большего усреднения отдельных прослоев относительно зондов меньшей длины, обеспечивается наилучшее наложение кривой кажущегося УЭС и модельной в области средней части составного керна. Степень совпадения тем хуже, чем больше операционная частота. Говоря иначе, короткий зонд на частоте 10 кГц обеспечивает наилучшее достижение максимума УЭС составного керна, а длинный зонд на этой же частоте приводит к наилучшему совпадению с УЭС керна в его средней протяжённой части. Частота 1 МГц даёт наихудший результат на интервале всего керна. Результаты на промежуточной частоте – 100 кГц – дают среднее между результатами для 10 кГц и 1 МГц. Аналогичный вывод справедлив и для среднего зонда ($l = 0,50$ м) относительно короткого и длинного.

Что касается $\text{Im } H_\varphi$ (рис. 13), частотная зависимость диаграмм кажущегося УЭС отсутствует. Максимумы диаграмм $\text{Im } H_\varphi$ по короткому зонду ближе всего к модельным. Так, для зонда 0,10 м максимум выражен на глубине 0,95 м (кажущееся УЭС 105 Ом·м), для зонда 0,50 м – на глубине 1,15 м (99,1 Ом·м), а для зонда 0,90 м – на глубине 1,36 м (91,2 Ом·м). Относительные отклонения диаграмм кажущегося УЭС от модельных на уровне максимумов равны 47,8%, 50,4% и 54,4% соответственно, то есть, увеличиваются с ростом длины зонда. Однако на дальнейшем протяжении составного керна кажущееся УЭС по $\text{Im } H_\varphi$ значительно сильнее отличается от модельного

по сравнению с $\text{Re } H_\varphi$: между кажущимся УЭС и модельным нет общих точек.

Далее отметим, что пятикратный электрический контраст на глубине 6,0 м (между подошвой коллектора 2 Ом·м и подстилающими аргиллитами 10 Ом·м) выражен на всех диаграммах трансформаций по $\text{Re } H_\varphi$ и $\text{Im } H_\varphi$ (рис. 12, 13). Интервал глубин 6,0–10,0 м с выбуренными аргиллитами позволяет оценить локальность и асимптотическое поведение сигналов тороидальной катушки. Так, диаграммы кажущегося УЭС по $\text{Re } H_\varphi$ не выходят на асимптоту 10 Ом·м в аргиллитах; значения УЭС равны, в зависимости от длины зонда, 4,6–5,0 Ом·м (10 кГц), 6,0–6,6 Ом·м (100 кГц), 8,0–8,4 Ом·м (1 МГц). То есть, самая высокая частота обеспечила наибольшую локальность. В отличие от $\text{Re } H_\varphi$, кажущееся УЭС по $\text{Im } H_\varphi$ достигает асимптоты 10 Ом·м при всех частотах и длинах зонда на глубине около 8,15 м (на расстоянии 2,15 м от подошвы целевого керна).

Итак, подводя итог по профилированию составного керна с тороидальными катушками в стеклопластиковой трубе, отметим следующее. Оптимальная конфигурация измерительной системы: сигнал $\text{Re } H_\varphi$, частота 10 кГц, длина зонда 0,10–0,90 м (каждая длина имеет преимущества и недостатки, набор длин обеспечивает информационное дополнение сигналов). При этом, с увеличением частоты до 1 МГц, обеспечивается более близкий выход на асимптоту в нижележащих отложениях (аргиллитах). В то же время, основным плюсом сигнала $\text{Im } H_\varphi$ является его наибольшая локальность и достижение асимптотического значения в подстилающих целевой керна отложениях. Кажущееся УЭС в начальный момент керноотбора выше УЭС бурового раствора – в среднем на 51,4% для $\text{Re } H_\varphi$ и на 62,7% для $\text{Im } H_\varphi$ – из-за существенного влияния контраста УЭС в 100 раз между раствором и кровлей коллектора при использовании стеклопластиковой трубы.

Профилирование составного керна в металлической немагнитной трубе

Рассмотрим теперь ситуацию, когда составной керна расположен в металлической немагнитной трубе с тороидальными катушками (рис. 11). Анализируется сигнал

$\text{Im } H_\phi$ при длине зонда 0,10 м. Результаты электрокаротажа при отборе составного керна с шагом 0,01 м изображены в логарифмическом масштабе на рис. 14.

Прежде всего, отметим, что в начальный момент ($z = 0$ м) кажущееся УЭС на всех частотах составляет 2 Ом·м (буровой раствор). То есть, сильноконтрастная кровля коллектора, расположенная на 0,10 м ниже измерительной тороидальной катушки и на 0,20 м ниже генераторной, не оказывает заметного влияния в силу высокой локальности измерительной системы.

Из анализа диаграмм кажущегося УЭС на интервале выбуриваемого составного керна ($z = 0,0–6,0$ м) вытекает, что кривые профилирования для металлического корпуса более дифференцированы, чем в случае стеклопластиковой трубы. Максимальное значение кажущегося УЭС по $\text{Im } H_\phi$, соответствующее модельному 200 Ом·м, отмечается на глубине 0,24 м, что справедливо для любой из рассмотренных операционных частот. При этом асимптотическое значение 198 Ом·м, при котором относительное отклонение от 200 Ом·м в кровле пласта не превышает 3% (равно 1%), соответствует предыдущей глубине 0,23 м. То есть, несмотря на высокий контраст УЭС в 100 раз между буровым раствором (2 Ом·м) и кровлей коллектора (200 Ом·м) в окрестности тороидов, УЭС кровли составного коллектора уверенно определяется на всех трёх частотах.

По графикам на рис. 14 можно сделать вывод, что обеспечивается высокая степень соответствия трансформации сигнала $\text{Im } H_\phi$ и модельного распределения УЭС составного керна. Более конкретно, диаграмма кажущегося УЭС на любой из частот является огибающей сверху к модельному распределению УЭС на всём протяжении маломощных прослоев: от УЭС от 200 Ом·м в кровле до 2 Ом·м в подошве. Следовательно, без какой-либо существенной обработки зарегистрированных данных, обеспечивается возможность оперативного получения распределения УЭС вдоль составного керна с маломощными прослоями и переменным флюидонасыщением.

При высоте колонки около 6 м ($z = 5,97–6,06$ м), кажущееся УЭС, опять же, в силу высокой локальности, равно истинному 2 Ом·м в водонасыщенной части коллектора.

Высота колонки 6 м соответствует контрастному по УЭС моменту, когда составной керна с переменными флюидонасыщением находится целиком внутри керноприёмника, а в точке $z = 0$ м расположена граница кровли нижележащих аргиллитов. Далее, при выбуривании керна из аргиллитов ($z = 6,0–10,0$ м), наблюдаются экстремумы в точках $z = 6,10$ и $6,20$ м (кровля аргиллитов проходит через измерительную и генераторную катушку). После этого, через 0,03 м ($z = 6,23$ м), происходит быстрый выход на асимптоту 10 Ом·м в аргиллитах.

Резюмируя вышесказанное, для электрокаротажа составного керна в металлической немагнитной трубе с тороидальными катушками следует использовать сигнал $\text{Im } H_\phi$, короткий зонд 0,10 м, а также любую операционную частоту в диапазоне от 10 кГц до 1 МГц, обеспечивающие значительную локальность и достоверность получаемых результатов.

Профилирование тонкослоистого и электрически макроанизотропного керна в стеклопластиковой трубе

Рассматривается электрокартаж в процессе отбора тонкослоистых песчано-глинистых кернов длиной 6,0 м, окружённых стеклопластиковой трубой с тороидальными катушками (рис. 15). Численно моделируются два случая соотношения УЭС соседних прослоев: 3–9 Ом·м (контраст 3, чередование глин и нефтеводонасыщенных песчаников), 3–27 Ом·м (контраст 9, чередование глин и нефтенасыщенных песчаников). Толщина прослоев в каждом выбуриваемом керне одинакова и составляет 0,10 м; 0,05 м; 0,04 м; 0,03 м; 0,02 м; 0,01 м. Для установления соотношения сигналов тороидальной катушки вокруг тонкослоистого и электрически макроанизотропного керна, рассматриваются две макроанизотропные модели среды. Первая, для УЭС 3–9 Ом·м, характеризуется горизонтальным УЭС $\rho_h = 4,5$ Ом·м и вертикальным УЭС $\rho_v = 6$ Ом·м. Вторая макроанизотропная среда, для УЭС 3–27 Ом·м: $\rho_h = 5,4$ Ом·м, $\rho_v = 15$ Ом·м. Длина тонкослоистого и эквивалентного макроанизотропного керна внутри керноприёмника увеличивается от 0,0 до 6,0 м, с шагом 0,01 м. Ниже целевого интервала залегает толща

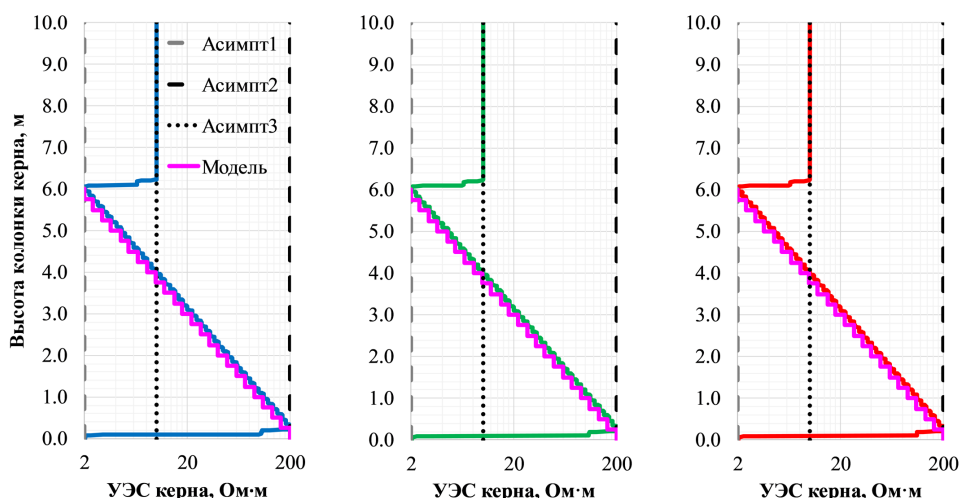


Рис. 14. Кажущиеся УЭС по $\text{Im } H_\phi$ при профилировании составного керна длиной 6,0 м с переменным флюидонасыщением. Тороидальные катушки в металлической немагнитной трубе. Длина зонда 0,10 м. Операционная частота: 10 кГц (слева), 100 кГц (по центру), 1 МГц (справа).

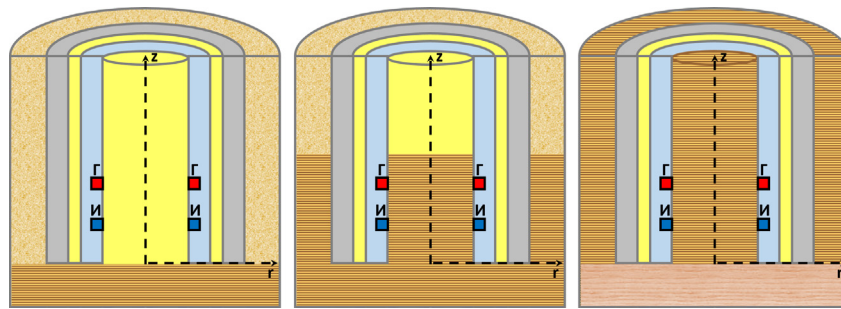


Рис. 15. Этапы электрокаротажа с тороидальными катушками в процессе отбора тонкослоистого песчано-глинистого керна длиной 6,0 м. Слева – перед отбором целевого керна, в центре – промежуточный этап отбора, справа – конечный этап.

аргиллитов с УЭС 10 Ом·м, выше – глины с УЭС 4 Ом·м. Профиль по z для тонкослоистого и макроанизотропного керна идентичен профилю для составного керна: высота колонки керна с целевого интервала – 6,0 м (глубины 0,0–6,0 м), в то время как ещё 4,0 м (глубины 6,0–10,0 м) соответствуют взятым в керноприёмник аргиллитам.

На рис. 16 и 17 представлены результаты численного моделирования сигналов короткого зонда $Re H_\varphi$ (рис. 16) и $Im H_\varphi$ (рис. 17) на частоте 1 МГц, которая, в целом, отражает особенности и на других частотах. Отметим, что для стеклопластиковой трубы в рассматриваемом классе моделей длина зонда слабо влияет на $Re H_\varphi$ и не влияет на $Im H_\varphi$. Обращает на себя внимание изменчивость сигналов $Re H_\varphi$ и $Im H_\varphi$ на всём интервале коллектора 0,0–6,0 м, что обусловлено существенным влиянием участков среды вокруг. Кроме того, электрический контраст между подошвой коллектора и аргиллитами ($z = 6,0$ м) проявлен на всех рассматриваемых диаграммах.

Диапазон изменений $Re H_\varphi$ на интервале тонкослоистого коллектора ($z = 0,0–6,0$ м) при электрическом контрасте 3 (рис. 16 слева) составляет от $2,5 \cdot 10^{-6}$ до $1,0 \cdot 10^{-5}$ А/м при прослоях толщиной 0,10 м и от $2,4 \cdot 10^{-6}$ до $1,0 \cdot 10^{-5}$ А/м при прослоях в 0,01 м. При увеличении контраста до 9 (рис. 16 справа) $Re H_\varphi$ варьируется в пределах $5,7 \cdot 10^{-7}–1,0 \cdot 10^{-5}$

А/м (прослой толщиной 0,10 м) и $5,6 \cdot 10^{-7}–1,0 \cdot 10^{-5}$ А/м (прослой 0,01 м). Можно констатировать, что изменение толщины прослоев в 10 раз не вносит ощутимого изменения в сигнал $Re H_\varphi$. При контрасте в 3 раза (рис. 16 слева) визуально прослеживается высокая степень эквивалентности между тонкослоистой и макроанизотропной средой. Для проверки вычислено относительное отклонение диаграммы в тонкослоистой среде и макроанизотропной: оно не превышает 2% для толщин прослоев 0,01–0,10 м, что говорит об имеющейся эквивалентности. При контрасте 9 (рис. 16 справа) диаграммы не имеют общих точек – эквивалентность отсутствует.

Диапазон изменений $Im H_\varphi$ на интервале тонкослоистого коллектора при контрасте УЭС в 3 раза (рис. 17 слева) составляет от $6,8 \cdot 10^{-3}$ до $1,2 \cdot 10^{-2}$ А/м для прослоев любой толщины в диапазоне 0,10–0,01 м. При увеличении контраста до 9 (рис. 17 справа) $Im H_\varphi$ изменяется в пределах $4,1 \cdot 10^{-3}–1,2 \cdot 10^{-2}$ А/м. Как и для сигнала $Re H_\varphi$ при контрасте 3, отмечается совпадение диаграмм в тонкослоистых и макроанизотропной моделях. Относительное отклонение между диаграммами для каждой из рассмотренных толщин прослоев составляет 0,3%, то есть, достигается ещё большая эквивалентность, чем для $Re H_\varphi$. При контрасте 9 эквивалентности не наблюдается.

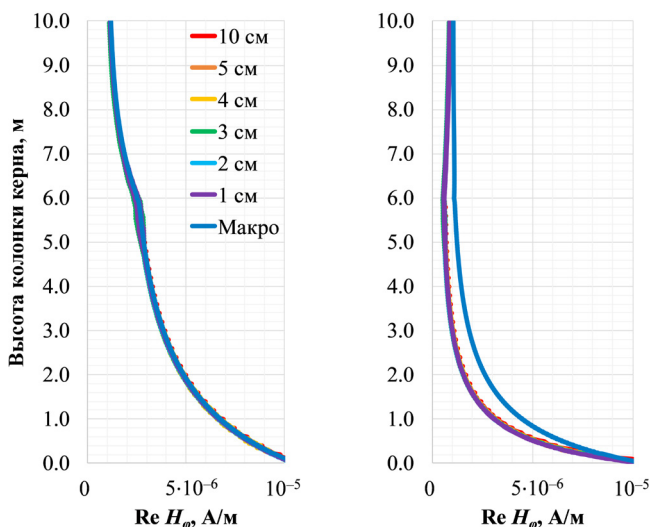


Рис. 16. Диаграммы $Re H_\varphi$ короткого зонда вокруг тонкослоистого и эквивалентного макроанизотропного выбуриваемого керна. Тороидальные катушки в стеклопластиковой трубе. УЭС смежных прослоев 3–9 Ом·м (слева) и 3–27 Ом·м (справа). Частота 1 МГц.

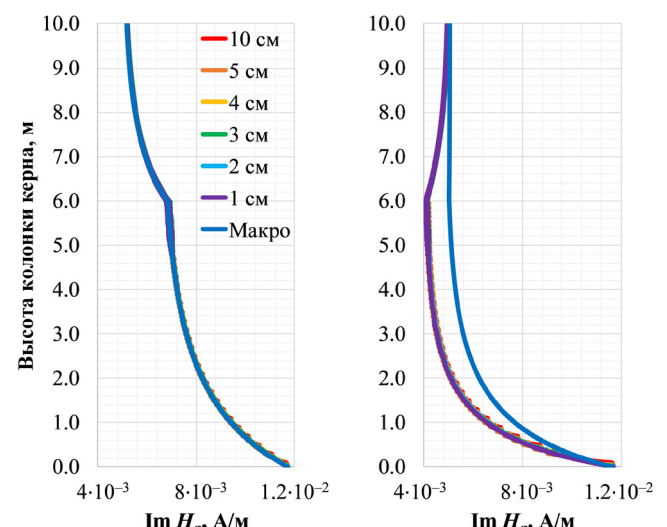


Рис. 17. Диаграммы $Im H_\varphi$ короткого зонда вокруг тонкослоистого и эквивалентного макроанизотропного выбуриваемого керна. Тороидальные катушки в стеклопластиковой трубе. УЭС смежных прослоев 3–9 Ом·м (слева) и 3–27 Ом·м (справа). Частота 1 МГц.

Итак, при использовании стеклопластиковой трубы с тороидальными катушками достигается эквивалентность между сигналами в тонкослоистом и электрически макроанизотропном керне при малых и средних контрастах УЭС прослоев (контрастность 3–6), что справедливо для обеих составляющих тангенциальной компоненты магнитного поля – $\text{Re } H_\varphi$ и $\text{Im } H_\varphi$.

Профилирование тонкослоистого и электрически макроанизотропного керна в металлической немагнитной трубе

Рассматривается аналогичный случай, только для тороидальных катушек в металлической немагнитной трубе (рис. 15). Анализируется сигнал $\text{Im } H_\varphi$, короткий зонд 0,10 м, частота 1 МГц, дающая представление об особенностях диаграмм и на других частотах. Как и с однородным и составным керном, отмечается высокая локальность измерений и быстрые выходы на асимптоты. В связи с этим, для наиболее детального анализа особенностей электрокаротажа в процессе керноотбора, приводятся диаграммы с метрового интервала тонкослоистого (электрически макроанизотропного) коллектора: $z = 2,0\text{--}3,0$ м (рис. 18 и 19).

Анализ диаграмм для соотношения УЭС тонких прослоев 3–9 Ом·м (рис. 18) и 3–27 Ом·м (рис. 19) указывает на следующее. Во-первых, выделяются все отдельные прослои в диапазоне их толщин от 0,10 до 0,01 м. Во-вторых, при электрическом контрасте 9 (3–27 Ом·м, рис. 19) диаграммы в тонкослоистых кернах и в эквивалентном им макроанизотропном керне не имеют общих точек, но стремятся друг к другу при уменьшении толщины прослоев. То есть, даже при очень малых прослоях в 0,01 м керн воспринимается скважинной системой с тороидальными катушками как тонкослоистый, а не как макроанизотропный.

Обратим теперь внимание на рис. 18. При толщине прослоев 0,03 м диаграмма напротив тонкослоистого керна накладывается на диаграмму в эквивалентном макроанизотропном керне, что ещё более проявлено при прослоях 0,02 м. В конечном счёте, при толщине прослоев 0,01 м, «макроанизотропная» диаграмма огибает «тонкослоистую», что может указывать на достигаемую эквивалентность между тонкой слоистостью и макроанизотропией при отношении длины зонда к толщине прослоя большем 10.

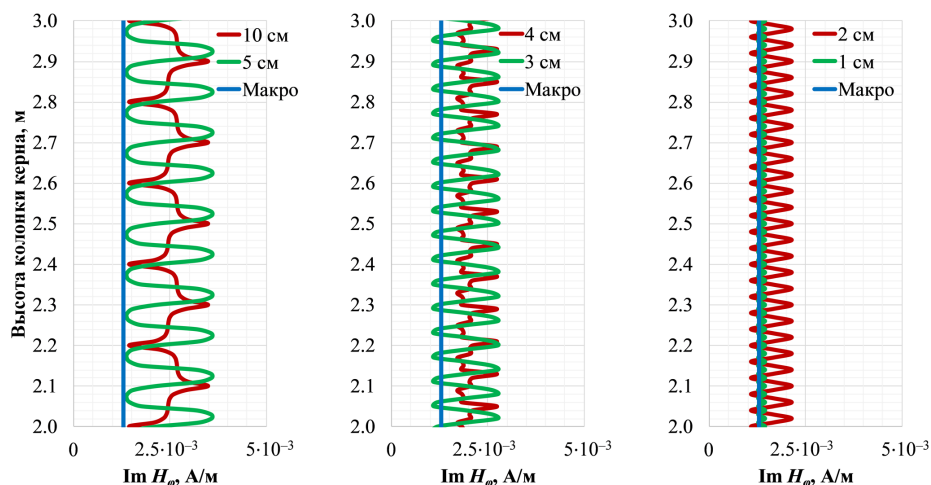


Рис. 18. Диаграммы $\text{Im } H_\varphi$ короткого зонда вокруг тонкослоистого и эквивалентного макроанизотропного выбуриваемого керна. Тороидальные катушки в металлической немагнитной трубе. УЭС смежных прослоев 3–9 Ом·м. Частота 1 МГц.

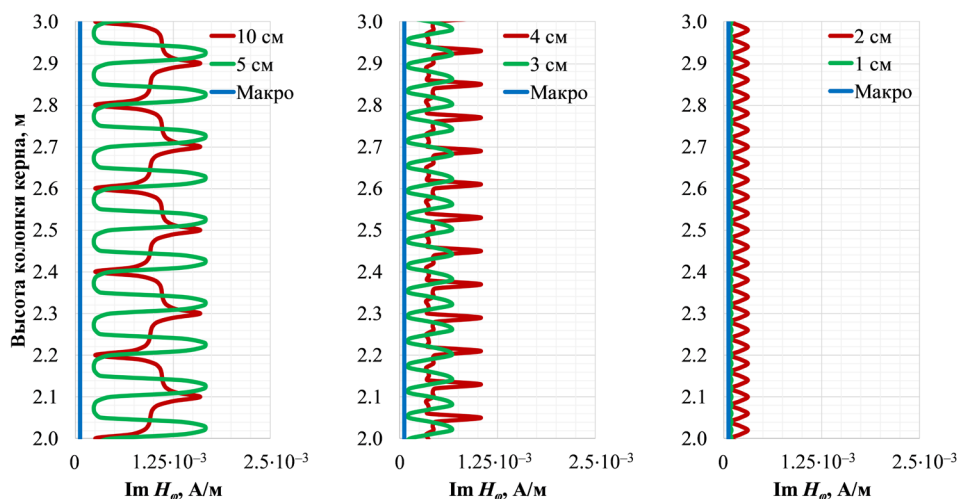


Рис. 19. Диаграммы $\text{Im } H_\varphi$ короткого зонда вокруг тонкослоистого и эквивалентного макроанизотропного выбуриваемого керна. Тороидальные катушки в металлической немагнитной трубе. УЭС смежных прослоев 3–27 Ом·м. Частота 1 МГц.

С целью проверки возможной эквивалентности, для диаграммы, соответствующей прослоям толщиной 0,01 м и соотношению УЭС 3–9 Ом·м, рассчитано её относительное отклонение от среднего. Оно составляет 6%, то есть полная эквивалентность ещё не достигнута. Для соотношения УЭС 3–27 Ом·м относительное отклонение в 1,5 раза больше – 9%. Таким образом, эквивалентности следует ожидать, когда толщина каждого прослоя будет равна нескольким миллиметрам.

Подводя итог, при использовании металлической немагнитной трубы с тороидальными катушками, эквивалентность между сигналами в тонкослоистом и электрически макроанизотропном керне не достигается для рассмотренных толщин прослоев вплоть до 0,01 м и контрастов УЭС прослоев от 3 до 9.

Заключение

Впервые в мировой практике предложены скважинные системы с генераторной и измерительной тороидальными катушками для электрокаротажа в процессе отбора цилиндрического керна при колонковом бурении. При математическом описании тороидальной катушки сторонним круговым магнитным током, разработаны программно-алгоритмические средства двумерного конечно-разностного моделирования. Учитываются конечные размеры керна с заданным распределением УЭС, большой контраст УЭС на границе между образцом и внешними цилиндрическими областями, а также контрасты по магнитной проницаемости. Выполнена верификация компьютерной программы на основе сравнения с численно-аналитическим решением в рамках одномерных цилиндрически-слоистых моделей.

Рассмотрено два основных случая, в первом из которых тороидальные катушки расположены в изолирующей стеклопластиковой трубе вокруг керна, а во втором – в металлической сильнопроводящей немагнитной трубе. Керна и зонды находятся внутри ферромагнитного стального корпуса керноприёмника. Численным моделированием показано, что электрокаротаж в процессе керноотбора 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).

Для однородных кернов построены взаимно однозначные трансформации сигналов в кажущиеся УЭС на основе одномерной интерполяции кубическими сплайнами. С использованием трансформаций получены достоверные распределения УЭС при профилировании однородных и вертикально-неоднородных кернов внутри керноприёмника. Тороидальные катушки на металлической немагнитной трубе обеспечивают повышенную локальность измерений и достоверность кажущихся УЭС вдоль керна.

Проведено двумерное численное моделирование сигналов в тонкослоистых песчано-глинистых кернах, с толщиной прослоев от 0,01 до 0,10 м, и эквивалентных им электрически макроанизотропных средах при разных контрастах УЭС. Сделан вывод, что при металлической немагнитной трубе, даже при прослоях в 0,01 м, керн проявляется в сигналах тороидальной системы

как тонкослоистый; эквивалентность тонкослоистого и электрически макроанизотропного керна следует ожидать при меньшей толщине прослоев. В то же время, при стеклопластиковой трубе эквивалентность достигается при малых и средних контрастах УЭС прослоев.

Таким образом, численными экспериментами обоснована возможность электрокаротажа цилиндрического керна в процессе бурения с размещёнными вокруг керна тороидальными катушками – как в стеклопластиковой, так и в металлической немагнитной трубе внутри ферромагнитного стального корпуса керноприёмника. Для каждого из этих случаев предложены оптимальные длины зондов, операционные частоты и набор сигналов.

Литература

- Галкин С.В., Колычев И.Ю., Савицкий Я.В. (2019). Возможности исследования гидрофобизации коллекторов комплексированием методами рентгеновской томографии керна и электрического каротажа. *Геология и геофизика*, 60(10), с. 1496–1507. <http://dx.doi.org/10.15372/GIG2019094>
- Исакова Т.Г., Дьяконова Т.Ф., Носикова А.Д., Калмыков Г.А., Акиншин А.В., Яценко В.М. (2021). Прогнозная оценка фильтрационной способности тонкослоистых коллекторов викуловской свиты по результатам исследования керна и ГИС. *Георесурсы*, 23(2), с. 170–178. <https://doi.org/10.18599/grs.2021.2.17>
- Латыпова М.Р., Перепонов Д.И., Казаку В.В., Щербакова А., Маряшев И.Г., Мухин Р.А., Шилов Е.Д., Черемисин А.Н., Косоруков В.Л., Чуркина В.В., Тархов М.А., Штинов В.А., Нигматуллин Т.Э., Батыршин Э.С., Самсонов И.В. (2025). Воспроизведение структуры пустотного пространства Ачимовских песчаников Восточно-Уренгойского месторождения в искусственно созданной геометрии кремниевого микрофлюидного чипа. *Георесурсы*, 27(1), с. 63–80. <https://doi.org/10.18599/grs.2025.1.2>
- Мелкишев О.А., Савицкий Я.В., Галкин С.В. (2024). Применение искусственных цифровых моделей в методе рентгеновской томографии керна при решении задачи бинаризации пустотного пространства горных пород. *Георесурсы*, 26(4), с. 218–228. <https://doi.org/10.18599/grs.2024.4.11>
- Новиков А.В., Губинский Д.Н., Зарай Е.А. (2021). Каротаж в процессе бурения – эффективный тайм-менеджмент и надежная база для оценки подсчетных параметров пласта. *Актуальные проблемы нефти и газа*, 3(34), с. 49–60. <https://doi.org/10.29222/ипнг.2078-5712.2021-34.art4>
- Пономарев А.А., Заватский М.Д., Нуруллина Т.С., Кадыров М.А., Галинский К.А., Тугушев О.А. (2021). Применение рентгеновской микрофотографии керна в нефтепромысловой геологии. *Георесурсы*, 23(4), с. 34–43. <https://doi.org/10.18599/grs.2021.4.4>
- Родивилов Д.Б., Кокарев П.Н., Мамяшев В.Г. (2018). Оценка газонасыщенности нетрадиционных коллекторов сенонских отложений севера Западной Сибири. *Каротажник*, 9, с. 18–25.
- Самарский А.А., Николаев Е.С. (1978). Методы решения сеточных уравнений. М.: Наука, 592 с.
- Светов Б.С. (1984). Электродинамические основы квазистационарной геоэлектрики. М.: ИЗМИРАН, 183 с.
- Хайруллин Б.Ю., Курбанов Я.М., Мамяшев В.Г., Федорцов В.В., Секисов А.В., Гольх А.Н. (2022). Совершенствование технологий отбора и анализа изолированного керна повышенной информативности. *Геология и недропользование*, 1, с. 102–113.
- Эпов М.И., Никитенко М.Н., Глинских В.Н. (2018). Математическое обоснование нового электромагнитного зонда с тороидальными катушками для высокоразрешающего каротажа нефтегазовых скважин. *Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии*, 16(1), с. 113–129. <https://doi.org/10.25205/1818-7900-2018-16-1-113-129>
- Эпов М.И., Мамяшев В.Г., Михайлов И.В., Суродина И.В., Никитенко М.Н. (2024). Определение удельного электрического сопротивления керна с помощью тороидальных катушек: математическое моделирование. *Георесурсы*, 26(3), с. 151–161. <https://doi.org/10.18599/grs.2024.3.16>
- Ashena R., Thonhauser G. (2018). *Coring Methods and Systems*. Switzerland: Springer International Publishing AG, 243 p.
- Ashena R., Vortisch W., Prohaska M., Thonhauser G. (2016). Innovative Concepts in Wireline Continuous Coring. Proc. SPE Bergen One Day Seminar. Bergen, Norway, SPE-180017-MS. <https://doi.org/10.2118/180017-MS>
- Berger P.E. (2018). Intelligent Coring System. US Patent, US9879493B2. Pub. Date: Jan. 30, 2018.

Bittar M., Aki A. (2015). Advancement and economic benefit of geosteering and well-placement technology. *The Leading Edge*, 34(5), pp. 524–528. <https://doi.org/10.1190/tle34050524.1>

Carpenter C. (2016). Innovative Concepts in Wireline Continuous Coring. *Journal of Petroleum Technology*, 68(8), pp. 60–62. <https://doi.org/10.2118/0816-0060-JPT>

David C., Robion P., Louis L. (2017) A single laboratory setup for investigating the anisotropy of both seismic and electrical properties in core samples. *Geophysical Journal International*, 210(3), pp. 1595–1608. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx248>

de Boor C. (2001). A Practical Guide to Splines (Revised Edition). Applied Mathematical Sciences, 27. New York: Springer–Verlag, 349 p.

Goldberg D., Myers G. (2007). Logging-while-coring method and apparatus. US Patent, US US7293613B2. Pub. Date: Nov. 13, 2007.

Goldberg D., Myers G., Grigar K., Pettigrew T., Mrozewski S., Arceneaux C., Collins T. (2003). Logging-while-coring – New Technology Advances Scientific Drilling. Trans. SPWLA 44th Annual Logging Symposium. Galveston, Texas, USA, SPWLA-2003-CC.

Goldberg D., Myers G., Iturrino G., Grigar K., Pettigrew T., Mrozewski S. (2004). Logging-while-coring – First tests of a new technology for scientific drilling. *Petrophysics*, 45(4), pp. 328–334.

Goldberg D., Myers G., Iturrino G., Grigar K., Pettigrew T., Mrozewski S. (2006). Logging-while-coring – new technology for the simultaneous recovery of downhole cores and geophysical measurements. *Geological Society of London Special Publications, New Techniques in Sediment Core Analysis*, 267(1), pp. 219–228. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2006.267.01.16>

Manuaba I.B.G.H., Aljishi M., Van Steene M., Dolan J. (2024). Logging-While-Drilling Laterolog vs. Electromagnetic Propagation Measurements: Which Is Telling the True Resistivity? *SPE Journal*, 29(8), pp. 4000–4013. <https://doi.org/10.2118/219772-PA>

Hou Z., Cao D., Liu Q., Su Y., Ma Y., Zhou Z. (2023) An intelligent method for reconstructing large-size digital rocks by joining multi-dimension information. *Geoenergy Science and Engineering*, 228, 212049, pp. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.212049>

Kadhim F.S., Imran A.M., Rasool Y.F. (2020). Using NMR, Core Analysis, and Well Logging Data to Predict Permeability of Carbonate Reservoirs: a Case Study. IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*, 671, 012071, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/671/1/012071>

Mirza D., Birkeland K., Øy L., Chemali R., Barrouillet B. (2024). Core Scanner for Electrical Profiling of Full-Bore Cores at the Well Site with Advanced Pulse Electromagnetic Technology. Trans. *SPWLA 65th Annual Logging Symposium*. Rio de Janeiro, Brazil, SPWLA-2024-0098. <https://doi.org/10.30632/SPWLA-2024-0098>

Muraoka M., Yoneda J., Jin Y., Hattori T., Imai T., Suzuki K. (2023). Thermal properties of pressure core samples recovered from Nankai Trough wells before and after methane hydrate dissociation. *Earth and Space Science*, 10, e2022EA002446, pp. 1–32. <https://doi.org/10.1029/2022EA002446>

Myers G., Schroeder D., Keogh W., Grigar K., Masterson W. (2006). Coring Dynamics: Data Acquisition While Coring. Proc. Offshore Technology Conference. Houston, Texas, USA, OTC-17920-MS. <https://doi.org/10.4043/17920-MS>

Nunez Y., Al Nuaimi M.A., Adene O., Al Hammadi A., Ruiz F., Al Hamlawi I., Escorcía A., Baptista L., Labbassen, N., Radovanovic A., Berger P.E., Mätzel A. (2023). First Field Worldwide Trial: Advanced Coring System, A Disruptive Technology Applied in Abu Dhabi, UAE. To Provide Real-Time Logging while Coring, Saving Rig Time and Opening a New Era in this Operation. Proc. *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition*. Abu Dhabi, UAE, SPE/IADC-214594-MS. <https://dx.doi.org/10.2118/214594-MS>

Nunez Y., Al Nuaimi M.A., Al Hammadi A., Radovanovic A., Berger P.E., Mätzel A. (2024). Advanced Coring System: A Disruptive Technology for Real-Time Logging While Coring, Saving Rig Time and Revolutionizing Operations in Abu Dhabi, UAE. Proc. *Offshore Technology Conference Asia*. Kuala Lumpur, Malaysia, OTC-34713-MS. <https://doi.org/10.4043/34713-MS>

Pavlov M., Peshkov G., Katterbauer K., Alshehri A. (2024). Geosteering based on resistivity data and evolutionary optimization algorithm. *Applied Computing and Geosciences*, 22, 100162, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.acags.2024.100162>

Saputera D.H., Jakobsen M., van Dongen K.W.A., Jahani N., Eikrem K.S., Alyaev S. (2024). 3-D induction log modelling with integral equation method and domain decomposition pre-conditioning. *Geophysical Journal International*, 236(2), pp. 834–848. <https://doi.org/10.1093/gji/ggad454>

Sinha S., Walmsley A., Clegg N., Vicuña B., McGill A., dos Reis T.P., Nygård M.T., Ulfesnes G.Å., Constable M.V., Antonsen F., Danielsen B.E. (2022). Past, present and future applications of ultra-deep directional resistivity measurements: a case history from the Norwegian continental shelf. *Petrophysics*, 63(6), pp. 604–633. <https://doi.org/10.30632/PJV63N6-2022a3>

Volonté G., Bersani A., Berto R., Cerri R., Pinelli F. (2023). Integrated workflow for rotary sidewall cores orientation: best practices and examples from planning to execution. *E3S Web of Conferences*, 366, 01012, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202336601012>

Zauner M., Weller A., Halisch M. (2020). Laboratory core investigations of sandstone-hosted uranium for *in situ* recovery. *Applied Earth Science*, 129(1), pp. 27–40. <https://doi.org/10.1080/25726838.2019.1708665>

Zhang Z., Tang J., Fan B., Zhao X., Jin F., Chen C., Chen Z., Chen S., Song Y., Yang J. (2024). An intelligent lithology recognition system for continental shale by using digital coring images and convolutional neural networks. *Geoenergy Science and Engineering*, 239, 212909, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.212909>

Сведения об авторах

Михаил Иванович Эпов – доктор тех. наук, профессор, академик РАН, научный руководитель, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН Россия, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, д. 3 e-mail: epovmi@ipgg.sbras.ru

Игорь Владиславович Михайлов – кандидат тех. наук, старший научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; доцент, Новосибирский государственный университет Россия, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, д. 3 e-mail: mikhayloviv@ipgg.sbras.ru

Ирина Владимировна Суродина – кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН Россия, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, д. 3 e-mail: sur@ommfao1.sccc.ru

Марина Николаевна Никитенко – доктор тех. наук, ведущий научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН Россия, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, д. 3 e-mail: nikitenkomn@ipgg.sbras.ru

Венер Галиуллинович Мамяшев – кандидат геол.-минерал. наук, доцент кафедры прикладной геофизики, Тюменский индустриальный университет Россия, 625000, Тюмень, ул. Володарского, д. 38 e-mail: tmngeofiz@mail.ru

Статья поступила в редакцию 05.06.2025;
Принята к публикации 03.11.2025;
Опубликована 30.06.2026

Resistivity Logging-While-Coring with Toroidal Coils: Mathematical Modeling

M.I. Epov¹, I.V. Mikhaylov^{1, 2*}, I.V. Surodina¹, M.N. Nikitenko¹, V.G. Mamyashev³

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

³Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

*Corresponding author: Igor V. Mikhaylov, e-mail: mikhayloviv@ipgg.sbras.ru

Abstract. For the first time in the world practice, we have proposed transmitter-receiver systems with toroidal coils for evaluating the electrical resistivity of a cylindrical sample during core drilling. Two locations of the toroidal coils are considered: either in an insulating fiberglass pipe or in a highly conductive non-magnetic metal pipe, both inside a ferromagnetic steel outer core barrel. We have elaborated an algorithm for two-dimensional finite-difference modeling of electrical and magnetic signals from an external circular magnetic harmonic current equivalent to a toroidal coil, with regard to the magnetic permeability of the outer core barrel. Two-dimensional numerical modeling of the real (in-phase) and imaginary (quadrature) parts of the electric field vertical component and the magnetic field tangential component is conducted for typical terrigenous core resistivities. Subsequent to the numerical modeling results, the optimal lengths of the logging-while-coring systems, as well as the operating frequencies and measured signal types have been chosen when the coils are located either in the fiberglass or in non-magnetic metal pipe. Further, we come up with transforms of the measured signals into apparent resistivity values for vertically-variable core samples. Finally, we have worked out criteria for the consistency between the signals measured in thin-layered and equivalent electrically macroanisotropic cores while varying the resistivity contrast and interlayer thickness.

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

Recommended citation: Epov M.I., Mikhaylov I.V., Surodina I.V., Nikitenko M.N., Mamyashev V.G. (2026). Resistivity Logging-While-Coring with Toroidal Coils: Mathematical Modeling. *Georesursy = Georesources*, 28(2), pp. 133–151. <https://doi.org/10.18599/grs.2026.2.13>

References

- Ashena R., Thonhauser G. (2018). *Coring Methods and Systems*. Switzerland: Springer International Publishing AG, 243 p.
- Ashena R., Vortisch W., Prohaska M., Thonhauser G. (2016). Innovative Concepts in Wireline Continuous Coring. *Proc. SPE Bergen One Day Seminar*. Bergen, Norway, SPE-180017-MS. <https://doi.org/10.2118/180017-MS>
- Berger P.E. (2018). Intelligent Coring System. US Patent, US9879493B2. Pub. Date: Jan. 30, 2018.
- Bittar M., Aki A. (2015). Advancement and economic benefit of geosteering and well-placement technology. *The Leading Edge*, 34(5), pp. 524–528. <https://doi.org/10.1190/1.11900524.1>
- Carpenter C. (2016). Innovative Concepts in Wireline Continuous Coring. *Journal of Petroleum Technology*, 68(8), pp. 60–62. <https://doi.org/10.2118/0816-0060-JPT>
- David C., Robion P., Louis L. (2017). A single laboratory setup for investigating the anisotropy of both seismic and electrical properties in core samples. *Geophysical Journal International*, 210(3), pp. 1595–1608. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx248>
- de Boor C. (2001). *A Practical Guide to Splines* (Revised Edition). Applied Mathematical Sciences, 27. New York: Springer-Verlag, 349 p.
- Epov M.I., Nikitenko M.N., Glinskikh V.N. (2018). Mathematical substantiation of a new electromagnetic tool with toroidal coils for high-resolution logging of oil and gas wells. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 16(1), pp. 113–129. (In Russ.) <https://doi.org/10.25205/1818-7900-2018-16-1-113-129>
- Epov M.I., Mamyashev V.G., Mikhaylov I.V., Surodina I.V., Nikitenko M.N. (2024). Application of Toroidal Coils to Obtain Electrical Resistivity of Core Samples: Mathematical Modeling. *Georesursy = Georesources*, 26(3), pp. 151–161. (In Russ.) <https://doi.org/10.18599/grs.2024.3.16>
- Galkin S.V., Kolychev I.Yu., Savitskii Ya.V. (2019). Potentialities of Investigation of Reservoir Hydrophobization by Compilation of X-Ray Core Tomography and Lateral Logging. *Russian Geology and Geophysics*, 60(10), pp. 1195–1204. <https://doi.org/10.15372/RGG2019094>
- Goldberg D., Myers G. (2007). Logging-while-coring method and apparatus. US Patent, US7293613B2. Pub. Date: Nov. 13, 2007.
- Goldberg D., Myers G., Grigar K., Pettigrew T., Mrozewski S., Arceneaux C., Collins T. (2003). Logging-while-coring – New Technology Advances Scientific Drilling. *Trans. SPWLA 44th Annual Logging Symposium*. Galveston, Texas, USA, SPWLA-2003-CC.
- Goldberg D., Myers G., Iturrino G., Grigar K., Pettigrew T., Mrozewski S. (2004). Logging-while-coring – First tests of a new technology for scientific drilling. *Petrophysics*, 45(4), pp. 328–334.
- Goldberg D., Myers G., Iturrino G., Grigar K., Pettigrew T., Mrozewski S. (2006). Logging-while-coring – new technology for the simultaneous recovery of downhole cores and geophysical measurements. *Geological Society of London Special Publications, New Techniques in Sediment Core Analysis*, 267(1), pp. 219–228. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2006.267.01.16>
- Manuaba I.B.G.H., Aljishi M., Van Steene M., Dolan J. (2024) Logging-While-Drilling Laterolog vs. Electromagnetic Propagation Measurements: Which Is Telling the True Resistivity? *SPE Journal*, 29(8), pp. 4000–4013. <https://doi.org/10.2118/219772-PA>
- Hou Z., Cao D., Liu Q., Su Y., Ma Y., Zhou Z. (2023) An intelligent method for reconstructing large-size digital rocks by joining multi-dimension information. *Geoenergy Science and Engineering*, 228, 212049, pp. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.212049>
- Isakova T.G., Diakonova T.F., Nosikova A.D., Kalmykov G.A., Akinshin A.V., Yatsenko V.M. (2021). Predictive assessment of the fluid loss properties of thin-layer reservoirs of Vikulovskaya series based on the results of core and well logs. *Georesursy = Georesources*, 23(2), pp. 170–178. (In Russ.) <https://doi.org/10.18599/grs.2021.2.17>
- Kadhim F.S., Imran A.M., Rasool Y.F. (2020). Using NMR, Core Analysis, and Well Logging Data to Predict Permeability of Carbonate Reservoirs: a Case Study. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 671, 012071, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/671/1/012071>
- Khairullin B.Yu., Kurbanov Ya.M., Mamyashev V.G., Fedortsov V.V., Sekisov A.V., Golykh A.N. (2022). Advanced Solutions in Coring and Analysis of High Informativity Core Rocks. *Geologija i nedropol'zovanie*, 1, pp. 102–113. (In Russ.)
- Latypova M.R., Pereponov D.I., Kazaku V.V., Scerbacova A., Maryasev I.G., Mukhin R.A., Shilov E.D., Cheremisin A.N., Kosorukov V.L., Churkina V.V., Tarkhov M.A., Shtinov V.A., Nigmatullin T.E., Batyrshin E.S., Samsonov I.V. (2025). Repetition of the Void Space Structure of Achimov Sandstones of the East Urengoysoyko Field in Artificially Created Geometry

of a Silicon Microfluidic Chip. *Georesursy = Georesources*, 27(1), pp. 63–80. (In Russ.) <https://doi.org/10.18599/grs.2025.1.2>

Melkisev O.A., Savitsky Y.V., Galkin S.V. (2024). The Application of Artificial Digital Models in X-Ray Computed Tomography (CT) of the Core in Solving the Problem of Binarization of the Void Space of Reservoir Rocks. *Georesursy = Georesources*, 26(4), pp. 218–228. (In Russ.) <https://doi.org/10.18599/grs.2024.4.11>

Mirza D., Birkeland K., Øy L., Chemali R., Barrouillet B. (2024). Core Scanner for Electrical Profiling of Full-Bore Cores at the Well Site with Advanced Pulse Electromagnetic Technology. *Trans. SPWLA 65th Annual Logging Symposium*. Rio de Janeiro, Brazil, SPWLA-2024-0098. <https://doi.org/10.30632/SPWLA-2024-0098>

Muraoka M., Yoneda J., Jin Y., Hattori T., Imai T., Suzuki K. (2023). Thermal properties of pressure core samples recovered from Nankai Trough wells before and after methane hydrate dissociation. *Earth and Space Science*, 10, e2022EA002446, pp. 1–32. <https://doi.org/10.1029/2022EA002446>

Myers G., Schroeder D., Keogh W., Grigar K., Masterson W. (2006). Coring Dynamics: Data Acquisition While Coring. *Proc. Offshore Technology Conference*. Houston, Texas, USA, OTC-17920-MS. <https://doi.org/10.4043/17920-MS>

Novikov A.V., Gubinsky D.N., Zaray E.F. (2021). Logging while drilling – efficient time management and reliable base for estimating volumetric parameters of a reservoir. *Aktual'nye problemy nefii i gaza*, 3(34), pp. 49–60. (In Russ.) <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2021-34.art4>

Nunez Y., Al Nuaimi M.A., Adene O., Al Hammadi A., Ruiz F., Al Hamlawi I., Escorcia A., Baptista L., Labbassen, N., Radovanovic A., Berger P.E., Mätzl A. (2023). First Field Worldwide Trial: Advanced Coring System, A Disruptive Technology Applied in Abu Dhabi, UAE. To Provide Real-Time Logging while Coring, Saving Rig Time and Opening a New Era in this Operation. *Proc. SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition*. Abu Dhabi, UAE, SPE/IADC-214594-MS. <https://dx.doi.org/10.2118/214594-MS>

Nunez Y., Al Nuaimi M.A., Al Hammadi A., Radovanovic A., Berger P.E., Mätzl A. (2024). Advanced Coring System: A Disruptive Technology for Real-Time Logging While Coring, Saving Rig Time and Revolutionizing Operations in Abu Dhabi, UAE. *Proc. Offshore Technology Conference Asia*. Kuala Lumpur, Malaysia, OTC-34713-MS. <https://doi.org/10.4043/34713-MS>

Pavlov M., Peshkov G., Katterbauer K., Alshehri A. (2024). Geosteering based on resistivity data and evolutionary optimization algorithm. *Applied Computing and Geosciences*, 22, 100162, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.acags.2024.100162>

Ponomarev A.A., Zavatsky M.D., Nurullina T.S., Kadyrov M.A., Galinsky K.A., Tugushev O.A. Application of core X-ray microtomography in oilfield geology (2021). *Georesursy = Georesources*, 23(4), pp. 34–43. (In Russ.) <https://doi.org/10.18599/grs.2021.4.4>

Rodivilov D.B., Kokarev P.N., Mamyashev V.G. (2018). Gas saturation evaluation of unconventional reservoirs in northern West Siberia Senonian sediments. *Karotazhnik*, 9, pp. 18–25. (In Russ.)

Samarskii A.A., Nikolaev E.S. (1978). *Methods for Solving Grid Equations*. Moscow: Nauka, 592 p. (In Russ.)

Saputera D.H., Jakobsen M., van Dongen K.W.A., Jahani N., Eikrem K.S., Alyaev S. (2024). 3-D induction log modelling with integral equation method and domain decomposition pre-conditioning. *Geophysical Journal International*, 236(2), pp. 834–848. <https://doi.org/10.1093/gji/ggad454>

Sinha S., Walmsley A., Clegg N., Vicuña B., McGill A., dos Reis T.P., Nygård M.T., Ulfnes G.Å., Constable M.V., Antonsen F., Danielsen B.E. (2022). Past, present and future applications of ultra-deep directional resistivity measurements: a case history from the Norwegian continental shelf. *Petrophysics*, 63(6), pp. 604–633. <https://doi.org/10.30632/PJV63N6-2022a3>

Svetov B.S. (1984). *Electrodynamic foundations of quasi-stationary geoelectrics*. Moscow: IZMIRAN, 183 p. (In Russ.)

Volonté G., Bersani A., Berto R., Cerri R., Pinelli F. (2023). Integrated workflow for rotary sidewall cores orientation: best practices and examples from planning to execution. *E3S Web of Conferences*, 366, 01012, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202336601012>

Zauner M., Weller A., Halisch M. (2020). Laboratory core investigations of sandstone-hosted uranium for *in situ* recovery. *Applied Earth Science*, 129(1), pp. 27–40. <https://doi.org/10.1080/25726838.2019.1708665>

Zhang Z., Tang J., Fan B., Zhao X., Jin F., Chen C., Chen Z., Chen S., Song Y., Yang J. (2024). An intelligent lithology recognition system for continental shale by using digital coring images and convolutional neural networks. *Geoenergy Science and Engineering*, 239, 212909, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.212909>

About the Authors

Mikhail I. Epov – DSc (Engineering), Professor, RAS Academician, Scientific Director, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

3 Ac. Koptuyug av., Novosibirsk, 630090, Russian Federation
e-mail: epovmi@ipgg.sbras.ru

Igor V. Mikhaylov – PhD (Engineering), Senior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; Associate Professor, Novosibirsk State University

3 Ac. Koptuyug av., Novosibirsk, 630090, Russian Federation
1 Pirogova St., Novosibirsk, 630090, Russian Federation
e-mail: mikhayloviv@ipgg.sbras.ru

Irina V. Surodina – PhD (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

3 Ac. Koptuyug av., Novosibirsk, 630090, Russian Federation
e-mail: sur@ommfao1.sccc.ru

Marina N. Nikitenko – DSc (Engineering), Lead Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

3 Ac. Koptuyug av., Novosibirsk, 630090, Russian Federation
e-mail: nikitenkomn@ipgg.sbras.ru

Vener G. Mamyashev – PhD (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Industrial University of Tyumen

38 Volodarskogo St., Tyumen, 625000, Russian Federation
e-mail: tmngeofiz@mail.ru

Manuscript received 5 June 2025;

Accepted 3 November 2025; Published 30 June 2026

© 2026 The Authors. This article is published in open access under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)