

УДК 550.832.7

ПРИМЕНЕНИЕ ТОРОИДАЛЬНЫХ КАТУШЕК В ЗАДАЧАХ КАРОТАЖА НЕФТЕГАЗОВЫХ СКВАЖИН (АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР)

© 2021 г. И.В. Михайлов, В.Н. Глинских, М.Н. Никитенко

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Россия
Автор для переписки: И.В. Михайлов (e-mail: MikhaylovIV@ipgg.sbras.ru)*

По материалам имеющейся в открытом доступе зарубежной и отечественной научной литературы выполнен аналитический обзор применения тороидальных катушек – нетрадиционных для каротажа нефтегазовых скважин источников и приёмников электромагнитных сигналов. Проведённый анализ свидетельствует о многообразии задач, решаемых с их помощью в разрезах вертикальных и наклонно-горизонтальных скважин. Среди этих задач измерение удельного электрического сопротивления (УЭС) во время бурения при высоких электрических контрастах между скважиной и пластом, определение УЭС пласта вблизи долота, оценка фильтрационно-емкостных свойств тонких прослоев в процессе бурения, получение электрических имиджей, количественная характеристика параметров трещин гидроразрыва пласта, определение электрической анизотропии для реалистичной оценки флюидонасыщения.

В отечественной практике идея применения тороидальных катушек реализована в зонде, разработанном в Новосибирске Институтом нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН и Научно-производственным предприятием геофизической аппаратуры “Луч”. Созданный электромагнитный зонд с тороидальными катушками (зонд ЗЭТ) предназначен для каротажа в нефтегазовых скважинах с определением коэффициента электрической анизотропии тонкослоистых песчано-глинистых отложений. Зонд ЗЭТ характеризуется высоким пространственным разрешением и является достойной альтернативой многокомпонентным зондам индукционного каротажа.

Ключевые слова: тороидальные катушки, электрокаротаж, тонкослоистый коллектор, электрическая анизотропия, нефтенасыщение.

Введение

Вовлечение в разработку сложнопостроенных залежей нефти и газа расширяет круг задач нефтепромысловой геофизики и методов их решения. Одна из самых важных и актуальных задач связана с изучением представленных тонким переслаиванием песчаных и глинистых прослоев нефтенасыщенных коллекторов, которые наиболее часто встречаются в Западной Сибири.

Как известно, удельное электрическое сопротивление (УЭС) нефтенасыщенного песчаного коллектора при прочих равных условиях выше УЭС водонасыщенного коллектора. Однако такое соотношение соблюдается не всегда: при наличии глинистых минералов в горных породах УЭС тонкослоистого песчано-глинистого коллектора невысокое [Мельник, 2014]; при этом коллектор может включать значительное число нефтенасыщенных прослоев. Если для определения типа флюидонасыщения в качестве критерия рассматривается величина УЭС (так называемое “критическое значение”), то вероятность отнесения нефтенасыщенного заглинизированного коллектора к водонасыщенным резко возрастает. В таком случае определять УЭС необходимо не только в плоскости напластования, но и в перпендикулярном направлении [Klein, Martin, Allen, 1995].

Если значения УЭС различаются (то есть среда макроанизотропна), значит, коллектор содержит глинистые прослои и для определения типа его флюидонасыщения необходима более сложная методика. Ещё один недостаток использования только горизонтального УЭС – завышение толщины нефтенасыщенной части пласта.

Для определения удельного электрического сопротивления пластов применяются методы электрокаротажа на постоянном и переменном токах. Оценка УЭС и толщины отдельных прослоев тонкослоистого коллектора затруднена как вследствие недостаточной разрешающей способности индукционных и гальванических зондов, так и из-за шага измерений, превосходящего толщину отдельного прослоя. В связи с этим разделение по типу насыщения выполняется по значениям горизонтального и вертикального УЭС или коэффициента электрической анизотропии [Kunz, Moran, 1958; Табаровский, Каганский, Эпов, 1976].

Соотношение электромагнитных сигналов в тонкослоистой и макроанизотропной среде исследовалось в середине прошлого века С.М. Рытовым [1955]. Позже [Альпин, 1978; Альпин, Великин, 1983] было показано, что при субвертикальном пересечении скважиной тонкослоистого пласта измеренные на постоянном токе сигналы зависят только от горизонтального УЭС. Также известно, что горизонтальным УЭС определяются индукционные сигналы в субвертикальной скважине. Поэтому значения УЭС, полученные при стандартной интерпретации данных электрокаротажа в тонкослоистых коллекторах, будут существенно ниже значений в нефтенасыщенных прослоях, соответствуя водонасыщенным песчаникам. Вследствие отмеченного в дальнейшем с увеличением числа неучтённых глинистых прослоев будет возрастать ошибка определения подсчётных запасов углеводородов по данным УЭС, получаемым при использовании стандартных приборов каротажа.

Традиционно параметры макроанизотропного коллектора определяются по измерениям многокомпонентными зондами с ортогональными катушками [Anderson, Barber, Habashy, 2002; Clavaud et al., 2005], которые применяются ведущими зарубежными компаниями Baker Hughes Company, Halliburton, Schlumberger, Weatherford. Так, трёхкомпонентные измерения, выполняемые известными приборами Rt Scanner (Schlumberger) и 3D eXplorer (Baker Hughes Company), широко применяются для выявления и оценки нефтенасыщения электрически макроанизотропных коллекторов, в том числе уже упомянутых выше низкоомных [Rosthal et al., 2003], а также для изучения трещиноватых карбонатов и глинистых покрышек [Wang et al., 2012]. Из практики известно, что стандартные методы приводят к пропуску некоторых нефтенасыщенных толщ, поскольку они, как уже отмечалось, интерпретируются как водонасыщенные [Gomes et al., 2002]. Однако в отечественной нефтепромысловой геофизике такие специальные многокомпонентные системы используются редко.

Изучение электрической макроанизотропии геологической среды может проводиться с помощью тороидальных катушек (замкнутый соленоид), но их применение в каротаже для определения УЭС горных пород и коэффициента электрической анизотропии, в том числе в процессе бурения, развито недостаточно. Среди работ, посвященных применению для каротажа устройств с тороидальными катушками, наиболее ранней является работа [Arps, 1967]. В предлагаемой автором этой работы конфигурации используются две размещённые вровень с металлическим корпусом зонда генераторные тороидальные катушки, между которыми симметрично расположены две приёмные катушки.

В работе Д.С. Даева [1968] для случая однородной изотропной среды источник электромагнитного поля математически описывается круговым магнитным током, соответствующим тороидальной катушке. В том же году в работе [Redwine, Osborn, 1968]

было предложено применение тороидальных катушек для определения УЭС в процессе бурения скважин.

Отметим, что возбуждение проводящего полупространства (у раздела воздух–земля) рассматривается значительно позже в работе [Wait, 1995].

Наддолотный и боковой каротаж в процессе бурения

Первая известная попытка практической реализации скважинного зонда с тороидальными катушками была осуществлена в 1985 г., когда авторы работы [Gianzero *et al.*, 1985] провели теоретические исследования и полевые тесты фокусирующего электрокаротажного зонда с тороидальными катушками, работающего на операционной частоте 1 кГц, для каротажа в процессе бурения вертикальных скважин. Для измерений были предложены два принципиально разных способа. Первый предполагал основное радиальное измерение в режиме бокового каротажа, обладающее хорошей фокусировкой, подобное трёхэлектродному боковому каротажу; второй – осевое измерение на долоте с фокусировкой вниз. Теоретическое описание сигналов выполняется в два этапа. Сначала разрабатывается теория с учётом скин-эффекта для оценки влияния УЭС бурового раствора скважины на сигналы в предположении, что бурильная труба имеет бесконечную длину. Затем – упрощённая теория, пренебрегающая скин-эффектом. Методом конечных элементов детально изучается влияние УЭС бурового раствора скважины и границ пластов на сигналы.

Определение глубины проникновения фильтрата бурового раствора в пласт во время бурения вертикальных скважин – первая научно-практическая задача, вставшая перед реализованным зондом с тороидальными катушками и описанная в работе [Gianzero, Chemali, Su, 1986], в которой рассматриваются как радиальное проникновение вокруг бурильной трубы, так и проникновение впереди долота. Вклады УЭС зоны проникновения и неизменённой части пласта в сигнал описываются в рамках псевдогеометрического фактора, рассчитываемого для обоих измерений.

На следующем этапе исследований разрезы горизонтальных скважин, построенные по данным зонда с тороидальными катушками, были сопоставлены с разрезами, полученными с зондами индукционного каротажа. Результаты такого сопоставления, приведенные в работе [Gianzero, Chemali, Su, 1990], показали, что эти сигналы информационно дополняют друг друга. Так, в горизонтальных скважинах индукционные зонды более чувствительны к высокоомным вмещающим породам, тогда как зонд с тороидальными катушками более чувствителен к проводящему окружению.

Отдельно анализировалось влияние УЭС изолирующего бурового раствора на нефтяной основе на сигнал наддолотного каротажа; первые положительные выводы этого анализа о разрешающей способности в тонкослоистом разрезе представлены в [Gruppig, Harrell, Dickinson, 1988]. В этой работе отмечается, что зонд с тороидальными катушками, применяемый для каротажа в процессе бурения, был в то время единственным прибором в нефтепромысловой геофизике, измеряющим УЭС на долоте с очень высоким вертикальным разрешением. Этот зонд обеспечил новые возможности для оценки фильтрационно-емкостных свойств пласта в процессе бурения, особенно в высокоомных (сотни-тысячи Ом·м) пластах и в скважинах с высокопроводящим (сотые-десятые доли Ом·м) буровым раствором. Авторы работы [Gruppig, Wagstaff, 1990] в развитие этого направления делают вывод о высоком вертикальном разрешении зонда с тороидальными катушками в режиме бокового каротажа в скважинах с раствором на водной основе, а также наддолотного каротажа в случае нефтяной основы. В свою очередь, авторы исследования [Dowell, York, Jackson, 1993] отмечают, что измерение

в режиме бокового каротажа очень результативно в скважинах с сильносолеными буровыми растворами. При этом измерение на долоте особенно ценно при использовании нефтяных растворов, когда требуется раннее и точное обнаружение интервалов отбора керна и установки обсадных труб. Однако надо отметить, что последнее теряет свою эффективность в низкоомных отложениях.

Результаты тестирования зонда с тороидальными катушками для наддолотного каротажа, который, в отличие от предыдущих, можно полноценно применять в растворах на нефтяной основе, были получены значительно позднее. В работе [Hartmann et al., 2008] рассматривается решение в реальном времени таких практических задач как выбор интервала керноотбора и места для установки башмака обсадной колонны. Метод конечных элементов применяется для количественной оценки глубины обнаружения электрически контрастного пласта (точки, где сигнал изменяется при приближении к пласту на 10 %) и глубины исследования (точки, где сигнал изменяется при приближении к пласту на 50 %). Авторами названной работы на полевых данных демонстрируется, что разрешающие способности наддолотного каротажа и электромагнитного каротажа с двухмегагерцовым зондом (далее 2-МГц зонд) сопоставимы между собой.

Азимутальные измерения и электрические имиджи

Для количественной оценки петрофизических свойств пластов разработан прибор наддолотного каротажа *RAB (Resistivity At the Bit)* [Bonner et al., 1993], с которым выполняется пять измерений УЭС при операционной частоте тороидальной катушки 1.5 кГц. При этом при одном измерении долото используется как часть измерительного электрода, наиболее быстро отражая изменения кажущегося УЭС. При четырёх других с высоким вертикальным разрешением применяются электроды, расположенные между тороидальными источниками – кольцевой электрод для получения азимутально-осреднённого УЭС и три кнопочных электрода для обеспечения азимутальной чувствительности к УЭС. При измерениях выполняется фокусировка, характеризующаяся повышенной стабильностью при больших контрастах УЭС. Измерения электродами обеспечивают четыре разные глубины исследования с одинаково высоким вертикальным разрешением для выявления начала проникновения и оценки фильтрационно-емкостных свойств тонких пластов.

Зонд с тороидальными катушками позволяет решать ряд задач, которые не удавалось решить, применяя короткий потенциал-зонд и 2-МГц зонд, используемый при электромагнитном каротаже. Среди этих задач определение УЭС пласта вблизи долота, измерение УЭС во время бурения при понижающем проникновении, в случае высоких значений УЭС пласта и высокопроводящих буровых растворов, определение параметров формирующейся зоны проникновения, азимутальные измерения УЭС пласта, с хорошим вертикальным разрешением. Отмечается, что ни азимутальное измерение УЭС, ни измерение кольцевым электродом не могут выполняться в растворе на нефтяной основе, а основное ограничение – измерение УЭС пласта при повышающем проникновении. В отличие от 2-МГц зонда электромагнитного каротажа, при больших углах наклона скважины на сигналах зонда с тороидальными катушками нет выраженного экстремума при пересечении границы. Верхняя граница определения УЭС – тысячи Ом·м, тогда как для 2-МГц зонда ограничение составляет 50 Ом·м при измерении относительной амплитуды и 200 Ом·м при измерении разности фаз. По УЭС на кнопочных электродах за счёт их разных глубин исследования идентифицируются области формирования проникновения, а при благоприятных условиях определяется радиус зоны проникновения. Истинное УЭС пласта определяется в ходе наиболее глубинного

измерения кольцевым электродом, пока размер зоны проникновения достаточно мал. Кнопочными электродами измеряется также азимутальное УЭС для определения направления бурения – направление к границе определяется по отношению сигналов верхнего и нижнего электродов для заданного интервала времени [Bonner et al., 1994].

Азимутальные измерения кнопочными электродами приборов с тороидальными катушками создали основу для более глубокой обработки и интерпретации на основе ориентированных изображений электрических свойств по стенке скважины – имиджей УЭС пласта при трёх разных глубинах исследования [Bonner et al., 1994, 1996; Chardac, El-Sayed, 1995]. Позднее это направление было развито рядом учёных.

К преимуществам измерений во время бурения, отличающим их от измерений на кабеле, относятся полное покрытие скважины и лучшие скважинные условия. Среди множества задач, решаемых с помощью имиджей, отметим определение углов падения пластов, ориентации трещин и их систем, геонавигацию, геолого-структурный анализ, литологическое расчленение, анализ тонких прослоев, идентификацию разрушения стенок скважины [Chardac, El-Sayed, 1995; Lovell et al., 1995; Bonner et al., 1996; Prilliman et al., 1997; Li, Rasmus, Cannon, 1999; Bratton et al., 1999; Bittar, Hu, 2004; Prammer et al., 2009; Allouche et al., 2010; Fulda, Hartmann, Gorek, 2010; Borghi et al., 2011; Sinclair, Ottemen, Wennekamp, 2012].

Развитие каротажа с применением тороидальных катушек

С конца первого десятилетия XXI в. внимание большинства исследователей сосредоточено на вопросе повышения разрешающей способности зондов с тороидальными катушками. Так, авторы работы [Prammer et al., 2009] для использования на вращающейся и невращающейся (“скольжение”) бурильной колонне предложили многочастотный зонд с девятью токовыми электродами, расположенными между двумя генераторными тороидальными катушками в трех рядах по три в каждом. Определение глубинности исследования базируется на теории псевдогеометрических факторов. Поправки вводятся в два этапа: сначала учитывается поправка за скин-эффект, затем – за скважину. Азимутальная фокусировка и компенсация сигнала в таком зонде позволяют эффективно оценивать свойства тонких прослоев в скважинах, имеющих большой наклон.

Рядом зарубежных учёных (см., например, [Allouche et al., 2010; Borghi et al., 2011; Ortenzi et al., 2012]) рассматривается зонд для каротажа в скважинах малого диаметра. В этом случае измерительная система включает два кнопочных электрода, расположенных диаметрально противоположно на корпусе зонда, и пять тороидальных катушек по разные стороны от них для сфокусированных измерений бокового каротажа с азимутальной чувствительностью, обладающих различными глубинами исследования.

Для обеспечения осевой симметрии измеряемого тока применяется цилиндрическая фокусировка и экранирование кнопочных электродов. Предусмотрена возможность определения УЭС бурового раствора, реализуемая с применением только кнопочных электродов (без источников сигнала). Все тороидальные катушки могут поочередно работать как источники и как приёмники, что даёт возможность получать два измерения УЭС без кнопочных электродов. Эти измерения (“тороидальные УЭС”) характеризуются осевой фокусировкой, но не обладают азимутальной чувствительностью и имеют худшее вертикальное разрешение. Используя набор тороидальных катушек, можно получать два неазимутальных измерения с большей глубинностью и проводить каротаж на долоте. Отмечается, что в горизонтальных скважинах данные, получаемые в режиме бокового каротажа, интерпретировать намного легче, чем данные электромагнитного каротажа.

Количественные оценки возможности применения тороидальных катушек для диагностики и количественного определения трещин гидроразрыва пласта (ГРП) в горизонтальной скважине рассматриваются в работе [Pardo, Torres-Verdin, 2012]. Авторами показано, что низкочастотные (не более 1 кГц) измерения, выполненные расположенными на большом (около 18 м) расстоянии друг от друга тороидальными катушками, позволяют характеризовать трещины ГРП в необсаженных скважинах.

Последней по времени зарубежной публикацией, относящейся к применению тороидальных катушек в каротаже, является работа, подготовленная китайскими специалистами [Li et al., 2019], которая, по сути, посвящена совершенствованию технических решений, предложенных ранее другими исследователями для случая каротажа в процессе бурения. В этой работе рассматриваются расширение диапазона измерения УЭС, повышение радиальной и вертикальной разрешающей способности, получение электрических имиджей при вращении буровой колонны с высоким разрешением, а также при скольжении.

Изучение электрической анизотропии

Несмотря на принципиальную возможность изучения электрической анизотропии каротажными зондами с тороидальными катушками в разрезе скважины, нефтегазовая индустрия пришла к этому далеко не сразу – лишь во второй половине 1990-х годов.

Прежде всего, было установлено, что в сильно анизотропных карбонатных пластах, вскрытых горизонтальными скважинами, широко применяемые приборы электрокаротажа дают недостоверные результаты определения значений УЭС. Проанализированы возможности двух зондов с тороидальными катушками – *RAB* и зонда для геонавигации в процессе бурения *GST (Geo-Steering Tool)*. Зонд *GST* характеризуется малой глубиной исследования, а нефокусированное УЭС измеряется на долоте для минимизации эффекта проникновения. В результате применения названных приборов получена реалистичная оценка водонасыщения, составляющая 70–80 %, в то время как по данным стандартных приборов она составляла 20–30 % [Al-Riyami, Boyd, Dajani, 1996].

Изучение влияния анизотропии на сигналы зондов с тороидальными катушками продолжено в ряде теоретических исследований. Так, в работе [Hagiwara, 1996] делается вывод, что зонд с тороидальными катушками реагирует на анизотропию таким же образом, как зонды электрического каротажа. Следовательно, различие сигналов индукционных зондов и зондов с тороидальными катушками указывает на анизотропию. В работе [Gianzero, 1999] констатируется, что преодолеть “парадокс анизотропии” можно путём измерения тороидальной катушкой магнитного поля, возбуждаемого вертикальным электрическим диполем.

Анализ влияния анизотропии УЭС на характеристики электромагнитного поля, возбуждаемого зондом с элементарными тороидальными антеннами или с тороидальными антеннами конечного размера, размещёнными вокруг проводящей буровой колонны (случай каротажа в процессе бурения), выполнен А.Д. Каринским и А.А. Мусатовым, которые показали, что на азимутальных диаграммах зонда с тороидальными антеннами парадокс анизотропии не проявляется. Для одномерных цилиндрических моделей найдены аналитические решения, включая случай каротажа в процессе бурения. Результаты для осесимметричных двумерных моделей получены на основе моделирования методом конечных разностей [Karinski, Mousatov, 2001]. Возможность оценки вертикального УЭС при использовании бурового раствора на нефтяной основе анализируется в работе [Karinski, Mousatov, 2002]. Авторы заключают, что комплексирование данных зонда с тороидальными катушками для каротажа в процессе бурения и данных

электромагнитных зондов позволяет определить как горизонтальную, так и вертикальную компоненту УЭС во вскрытых вертикальной скважиной трансверсально-изотропных пластах.

Анализ поля тороидальной катушки в моделях анизотропных геологических сред разной степени сложности продолжен в работах [Каринский, 2003; Могилатов, Борисов, 2003]. Результаты обобщённого теоретического исследования полей разных источников, включая тороидальную антенну, приведены в работе [Каринский, 2018].

Влияние анизотропии на сигналы теоретического многочастотного многокатушечного зонда с тороидальными катушками для каротажа в процессе бурения исследуется в работе [Bittar, Hu, 2004]. В центре зондовой системы расположены две приёмные тороидальные катушки, а симметрично по обе стороны от них – генераторные. Рассматриваются модели как переменного, так и постоянного тока для изучения сигналов зонда в двумерной и трёхмерной трансверсально-изотропной среде. В модели постоянного тока тороидальные антенны представляются в виде нескольких изоляторов между участками бурильной трубы, а в модели переменного тока тороидальные антенны аппроксимируются магнитными токами. Сигналы тороидального зонда анализируются как в горизонтальных, так и в наклонных пластах. Рассматриваются совместные эффекты влияния электрической анизотропии, УЭС бурового раствора скважины, УЭС зоны проникновения и вмещающих пород. При увеличении угла наклона скважины, большим расстояниям между генераторной и приёмной тороидальными катушками свойственна большая чувствительность к вертикальному УЭС. Отмечается, что роль операционной частоты в диапазоне 1–100 кГц, с точки зрения чувствительности к анизотропии, невелика. Как и незадолго до них, эти авторы говорят о возможности восстановления вертикального УЭС пласта в субвертикальных скважинах путём совместной инверсии сигналов тороидального и электромагнитного зондов, дополняющих друг друга.

Оценка свойств коллекторов, вскрываемых горизонтальными скважинами на пресном или солёном растворе, значительно точнее по комбинированным данным двух типов электрокаротажных зондов – с тороидальными катушками и электромагнитного [Hu, Bittar, Hou, 2006]. Исследованиями показано, что существует область перекрытия, где работают оба типа зондов. При этом, в связи с различными физическими принципами работы, их сигналы в одной и той же среде разные. В частности, в горизонтальной или сильнонаклонной скважине эти различия можно использовать для обеспечения более точной оценки фильтрационно-емкостных свойств коллектора. Исследуются эффекты электрической анизотропии, границ пластов, скважины, а также влияние этих факторов на оценку коллекторских свойств в разрезах сильнонаклонных или горизонтальных скважин. В горизонтальной скважине оба типа рассматриваемых зондов чувствительны к электрической анизотропии; с увеличением угла наклона скважины чувствительность усиливается.

Различающиеся УЭС, полученные по данным этих зондов, могут способствовать более надёжной оценке коэффициента анизотропии. Авторами названной выше работы также подмечено, что совместная инверсия данных зонда с тороидальными катушками и зонда электромагнитного каротажа для получения горизонтального и вертикального УЭС имеет явное преимущество. Во-первых, такая инверсия применима и в вертикальных скважинах, поскольку зонд с тороидальными катушками в этом случае чувствителен к вертикальному УЭС. Во-вторых, динамический диапазон этого зонда очень высок, вплоть до тысяч Ом·м. Единственная трудность такой совместной инверсии – ограничение случаев пресных буровых растворов, поскольку зонд с тороидальными катушками, согласно авторам, малоэффективен в растворах на нефтяной основе из-за его механизма фокусировки.

Таким образом, многочисленные публикации позволяют сделать вывод о повышенном интересе к электромагнитным зондированиям с применением зондов с тороидальными катушками и их высоком потенциале для исследований в нефтегазовых скважинах. При этом возможны два способа применения тороидальных катушек – в первом формируются измерения методами бокового и наддолотного каротажа; во втором катушки выступают в качестве аналогов точечных электродов в микрозондах малых размеров для исследования строения ближней прискважинной зоны. Типичные расстояния между электродами–тороидальными катушками не превышают нескольких сантиметров. Для определения коэффициента электрической анизотропии предлагается совместное использование сигналов двух зондов – зонда с тороидальными катушками и индукционного зонда. Однако в настоящий момент в нефтепромысловой геофизике нет электромагнитного зонда с тороидальными катушками, предназначенного для изучения электрической анизотропии отложений, аналогичного по размерам и частотному диапазону зондам индукционного каротажа, сигналы которого в вертикальных скважинах зависят как от горизонтального, так и от вертикального УЭС.

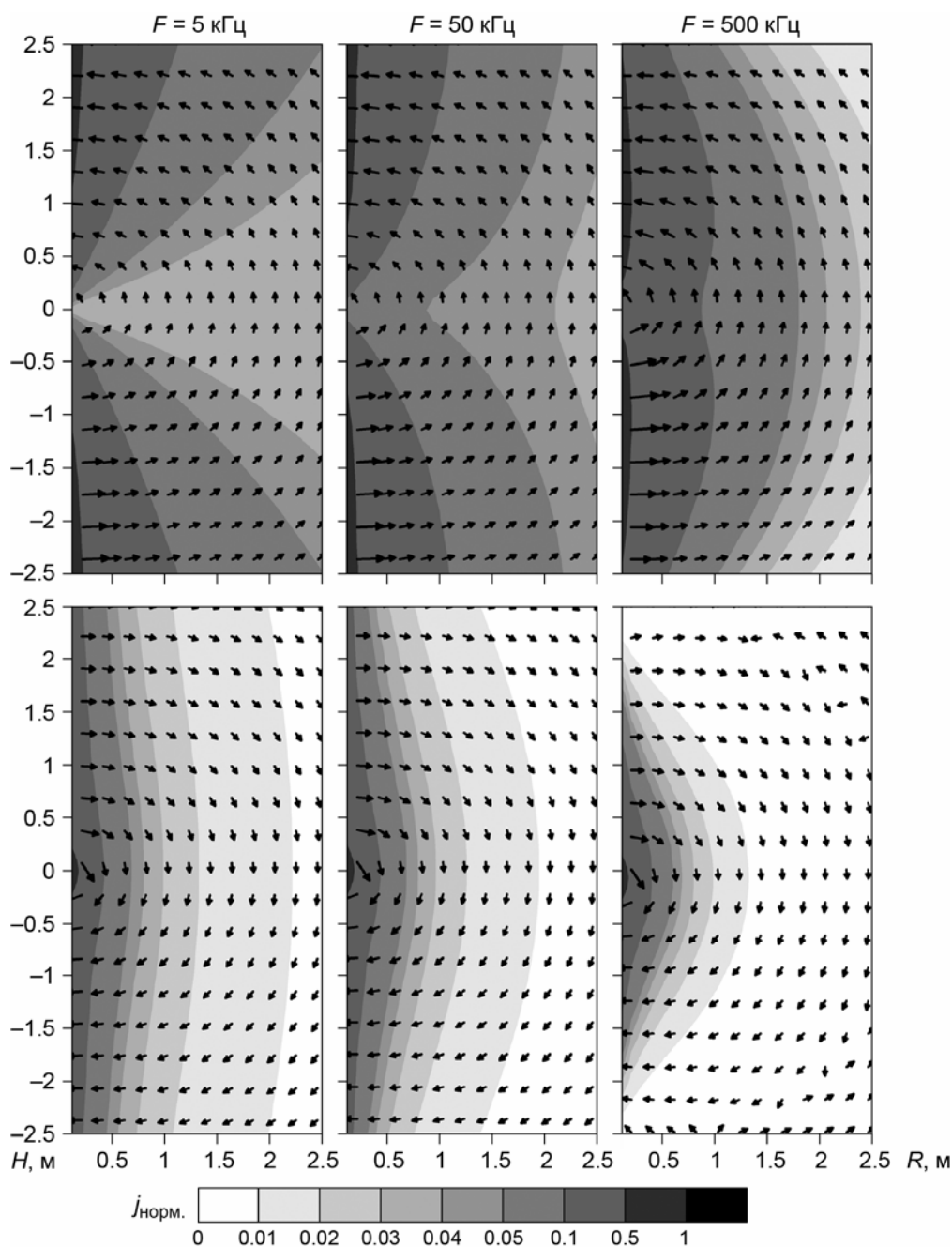
Отечественный электромагнитный зонд ЗЭТ с тороидальными катушками

В отечественной практике каротажа применение тороидальных катушек было предложено М.И. Эповым [Эпов, Глинских, Никитенко, 2014]. На основе ряда новых теоретико-методических разработок и инженерно-технических решений в Новосибирске в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН и Научно-производственном предприятии геофизической аппаратуры “Луч” спроектирован, разработан и апробирован зонд ЗЭТ – электромагнитный зонд с тороидальными катушками, характеризующийся высоким пространственным разрешением [Эпов и др., 2014, 2016а–г]. Этот многокатушечный многочастотный мультирежимный зонд состоит из сильнопроводящего металлического немагнитного цилиндрического корпуса и размещённых на нём пяти тороидальных катушек – двух генераторных и трёх измерительных [Эпов и др., 2017; Эпов et al., 2017]. Генераторные катушки расположены симметрично относительно центра зондовой части на расстоянии 1.0 м друг от друга; удаления до размещённых между ними измерительных катушек составляют 0.25, 0.5 и 0.75 м. Токи в генераторных катушках синхронно изменяются по гармоническому закону; используются три операционные частоты – 50, 100 и 250 кГц. Благодаря очень низкому УЭС металла, из которого изготовлен корпус (бериллиевая бронза), плотность поверхностного тока значительна даже при невысоких значениях моментов генераторных катушек.

Зонд ЗЭТ, ориентированный на выделение тонкослоистых песчано-глинистых нефтенасыщенных интервалов, изучение электрической макроанизотропии горных пород, определение характера насыщения пород-коллекторов, имеет оригинальную систему возбуждения/наблюдения сигналов в двух режимах – суммарном и дифференциальном [Эпов et al., 2018]. В первом режиме токи в генераторных катушках равны между собой и сонаправлены, во втором они также равны, но противоположны по знаку.

Известно, что тороидальный источник возбуждает в среде переменное электрическое поле, имеющее горизонтальную и вертикальную компоненты, вследствие чего в среде возникают вихревые токи (рисунок). Плотность вихревых токов \vec{j} обратно пропорциональна горизонтальному и вертикальному УЭС пласта, пересекаемого скважиной.

Наведённые в среде вихревые токи, в свою очередь, возбуждают переменную во времени вторичную магнитную индукцию, изменение которой во времени порождает ЭДС и дополнительный вихревой ток, протекающий по корпусу прибора, где измеряется его реальная и мнимая части, – первая синфазна току в источнике, вторая сдвинута относительно него на 90° .



Пространственное распределение реальной (*вверху*) и мнимой (*внизу*) частей нормированной плотности вихревого тока $j_{\text{норм.}}$ в пласте с УЭС 5 Ом·м при разных значениях частоты F . Нормированная плотность вихревого тока определяется как $j_{\text{норм.}} = \left| \vec{j} / \vec{j}_0 \right|$, где j_0 – плотность вихревого тока на стенке скважины. На вертикальных осях – глубина по скважине H , м; на горизонтальных – радиальная глубина R , м. Стрелками показаны направления тока \vec{j}

Spatial distributions of the real (*above*) and imaginary (*below*) parts of the normalized eddy current density $j_{\text{норм.}}$ in the formation with a resistivity of 5 Ohm·m at different values of frequency F . Normalized eddy current density is defined as $j_{\text{норм.}} = \left| \vec{j} / \vec{j}_0 \right|$, where j_0 is the eddy current density on the well wall. On vertical axes – the well depth H , m; on horizontal – the radial depth R , m. The arrows show the directions of the current \vec{j}

В последние годы в ходе разработки, совершенствования и практического применения зонда ЗЭТ были выполнены разносторонние исследования, наиболее значимыми из которых, с нашей точки зрения, являются следующие:

математическое обоснование оптимальной конфигурации зонда ЗЭТ для радиально-неоднородных изотропных и анизотропных сред [Эпов, Никитенко, Глинских, 2018];

широкомасштабное двумерное конечно-разностное моделирование электромагнитных сигналов ЗЭТ для нефтегазовых коллекторов как изотропных [Суродина, 2018], так и анизотропных [Суродина, Михайлов, 2019];

создание алгоритмов и программного обеспечения для выделения границ пластов и восстановления электрического сопротивления и анизотропии разреза в ходе инверсии [Эпов и др., 2019б];

реализация автоматизированной системы обработки и интерпретации данных ЗЭТ, основанной на разработанных программно-алгоритмических средствах [Потапов и др., 2018].

Важно отметить, что физические эксперименты с зондом ЗЭТ проводились как в искусственных, так и в природных водоёмах [Епов et al., 2019].

Была разработана также методика петрофизической интерпретации для определения нефтенасыщения по данным ЗЭТ [Эпов и др., 2018]. Учёт глинистых прослоев при количественной интерпретации данных ЗЭТ влечет за собой увеличение определяемого коэффициента нефтенасыщения по сравнению со случаем использования данных стандартных методов электрокаротажа.

Успешные опытно-промышленные испытания зонда ЗЭТ в нефтяных скважинах, вскрывших сложные геологические разрезы Волго-Уральской нефтегазоносной провинции, привели к уточнению их нефтенасыщения [Эпов и др., 2019а].

С использованием практических диаграмм скважинной электростримерии показана возможность изучения по сигналам ЗЭТ тонкослоистых электрически анизотропных отложений Приобского нефтяного месторождения Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции [Михайлов, Велесов, Глинских, 2020].

Результаты проведенных исследований позволяют рассматривать зонд ЗЭТ в качестве достойной альтернативы многокомпонентным зондам индукционного каротажа.

Заключение

Аналитический обзор, выполненный авторами статьи по материалам зарубежной и отечественной литературы, свидетельствует о широком спектре задач, решение которых при каротаже нефтегазовых скважин возможно с применением тороидальных катушек. Среди этих задач:

- изучение разрезов как вертикальных, так и наклонно-горизонтальных скважин;
- эффективные измерения во время бурения при высоких значениях УЭС пластов и сильнопроводящих буровых растворах (понижающее проникновение);
- определение УЭС пласта вблизи долота для раннего и точного обнаружения интервалов отбора керна и выбора места установки башмака обсадной колонны;
- выявление начала проникновения фильтрата бурового раствора во время бурения с определением радиуса и УЭС зоны проникновения;
- оценка УЭС неизменённого пласта;
- азимутальные измерения УЭС пласта с хорошим вертикальным разрешением для получения электрических имиджей с последующим определением направления к границе, углов падения пластов, ориентации трещин и их систем, геонавигации, геолого-

структурного анализа, литологического расчленения, анализа тонких прослоев, идентификации разрушения стенок скважины;

– количественное изучение фильтрационно-емкостных свойств тонких прослоев в процессе бурения;

– измерение УЭС бурового раствора;

– диагностика и количественная характеристика параметров трещин гидроразрыва пласта в горизонтальной скважине;

– определение электрической анизотропии для реалистичной оценки флюидонасыщения.

Электромагнитный зонд с тороидальными катушками (зонд ЗЭТ), разработанный в Новосибирске специалистами Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН и Научно-производственного предприятия геофизической аппаратуры “Луч”, обладает высоким потенциалом для исследований в сложных геологических разрезах, особенно в тонкослоистых с электрической макроанизотропией. Зонд ЗЭТ представляется разумной альтернативой многокомпонентным зондам индукционного каротажа, применение которых требует сложных алгоритмов обработки получаемых данных и инверсии.

В ближайшем будущем для уточнения методик петрофизической интерпретации предполагается проведение дополнительных полевых испытаний зонда ЗЭТ в коллекторах с разными типами глинистости, пиритизацией и трещиноватостью.

Внедрение зонда ЗЭТ в промысловую геофизику, вероятно, потребует его модификации для каротажа в процессе бурения. В связи с этим необходимо будет создание специального программного обеспечения для трёхмерного моделирования и инверсии, а также разработка подходов к интерпретации для случая сильнонаклонных и горизонтальных скважин, включая решение задач геонавигации.

Финансирование

Аналитический обзор подготовлен при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 19-05-00595.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

Альпин Л.М. Определение поперечного удельного сопротивления пластов по измерениям в скважинах // Известия вузов. Геология и разведка. 1978. № 4. С.81–95.

Альпин Л.М., Великин С.А. Определение анизотропии по измерениям в скважинах // Известия вузов. Геология и разведка. 1983. № 12. С.97–99.

Даев Д.С. Об источнике электромагнитного поля при высокочастотных измерениях в скважине // Известия АН СССР. Серия Физика Земли. 1968. № 11. С.94–95.

Каринский А.Д. Решения прямых задач о поле тороидальной антенны в анизотропной среде // Физика Земли. 2003. № 1. С.9–20.

Каринский А.Д. Электромагнитное поле в моделях электрически анизотропной среды. М.: ГЕОС, 2018. 184 с.

Мельник И.А. Причины понижения электрического сопротивления в низкоомных коллекторах // Геофизические исследования. 2014. Т. 15, № 4. С.44–53.

- Михайлов И.В., Велесов Д.В., Глинских В.Н. Изучение тонкослоистых коллекторов с применением тороидальных источников и приемников (на примере Приобского нефтяного месторождения) // Геофизические технологии. 2020. № 1. С.16–27.
- Могилатов В.С., Борисов Г.А. Возбуждение слоистых геоэлектрических сред гармоническим магнитным током // Сибирский журнал индустриальной математики. 2003. Т. 6, № 1. С.77–87.
- Потапов В.В., Эпов М.И., Суродина И.В., Никитенко М.Н., Глинских В.Н., Михайлов И.В. Автоматизированная система обработки и интерпретации данных электромагнитного зонда с тороидальными катушками (ZET): Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. 2018. № 2018616171.
- Рытов С.М. Электромагнитные свойства мелкослоистой среды // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1955. Т. 29, № 5. С.605–616.
- Суродина И.В. Математическое моделирование сигналов электромагнитного зонда с тороидальными катушками в двумерных изотропных моделях геологических сред // XIV международный научный конгресс “Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2018”: материалы. Новосибирск, 23–27 апреля 2018. Т. 4. С.162–170.
- Суродина И.В., Михайлов И.В. Математическое моделирование электромагнитных полей тороидального источника в двумерных анизотропных моделях геологических сред // Девятнадцатая всероссийская конференция “Геодинамика, геомеханика и геофизика”: Материалы, Алтайский край, стационар “Денисова пещера”, 22–28 июля 2019 г. Уфа: Изд-во ООО “Новтек Бизнес”, 2019. С.137–139.
- Табаровский Л.А., Каганский А.М., Эпов М.И. Электромагнитное поле гармонического источника в анизотропной цилиндрически-слоистой среде // Геология и геофизика. 1976. № 3. С.94–99.
- Эпов М.И., Глинских В.Н., Никитенко М.Н. Способ измерения удельной электропроводности и электрической макроанизотропии горных пород: Патент РФ. 2014. № 2525149.
- Эпов М.И., Никитенко М.Н., Глинских В.Н. Математическое обоснование нового электромагнитного зонда с тороидальными катушками для высокоразрешающего каротажа нефтегазовых скважин // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2018. Т. 16, № 1. С.113–129.
- Эпов М.И., Глинских В.Н., Еремин В.Н., Никитенко М.Н., Петров А.Н., Суродина И.В., Михайлов И.В. Математическое и физическое моделирование сигналов электромагнитного зонда для изучения макроанизотропии осадочных отложений // 19-я конференция EAGE по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа “Геомодель 2017”: расширенные тезисы. Геленджик, 11–14 сентября 2017 г. Статья 43809. Геленджик: Изд-во EAGE, 2017. 6 с.
- Эпов М.И., Глинских В.Н., Еремин В.Н., Михайлов И.В., Никитенко М.Н., Осипов С.В., Петров А.Н., Суродина И.В., Яценко В.М. Новый электромагнитный зонд для высокоразрешающего каротажа: от теоретического обоснования до скважинных испытаний // Нефтяное хозяйство. 2018. № 11. С.23–27.
- Эпов М.И., Еремин В.Н., Петров А.Н., Глинских В.Н. Электромагнитный зонд для каротажа в нефтегазовых скважинах: Патент РФ. 2016а. № 2583867.
- Эпов М.И., Еремин В.Н., Петров А.Н., Глинских В.Н. Электромагнитный зонд для каротажа в нефтегазовых скважинах: Патент РФ. 2016б. № 97539.
- Эпов М.И., Еремин В.Н., Петров А.Н., Глинских В.Н., Суродина И.В., Киселев В.В. Устройство для генерации электромагнитного поля тороидальной катушкой в геологической среде: Патент РФ. 2016в. № 2579177.
- Эпов М.И., Еремин В.Н., Петров А.Н., Глинских В.Н., Суродина И.В., Киселев В.В., Никитенко М.Н. Устройство для регистрации характеристик электромагнитного поля с использованием тороидальных катушек: Патент РФ. 2016г. № 2578774.
- Эпов М.И., Еремин В.Н., Глинских В.Н., Михайлов И.В., Никитенко М.Н., Суродина И.В. Электромагнитный зонд с тороидальными катушками для определения электрической макроанизотропии нефтяных коллекторов // XI международный симпозиум стран ЭПШП

- и ЕАЭС “Новая техника и технологии ГИС для нефтегазовой промышленности”: Доклады. Новосибирск, 16–20 сентября 2019 г. Ч. 1. Новосибирск: Изд-во ИНГГ СО РАН, 2019а. С.129–138.
- Эпов М.И., Еремин В.Н., Маништейн А.К., Петров А.Н., Глинских В.Н. Устройство для измерения удельной электропроводности и электрической макроанизотропии горных пород: Патент РФ. 2014. № 2528276.
- Эпов М.И., Михайлов И.В., Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Суродина И.В. Алгоритмы обработки и инверсии данных электромагнитного зонда с тороидальными катушками при изучении макроанизотропных свойств пластов-коллекторов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019б. Т. 330, № 6. С.187–197.
- Al-Riyami A., Boyd D., Dajani N. Resistivity Measurement in Anisotropic Horizontal Carbonate Wells // 7th Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference: proceedings. Abu Dhabi, United Arab Emirates, October 13–16, 1996. Paper SPE-36240-MS. 15 p.
- Allouche M., Chow S., Dubourg I., Ortenzi L., van Os R. High-resolution Images and Formation Evaluation in Slim Holes from a New Logging-While-Drilling Azimuthal Laterolog Device // SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition: proceedings. Barcelona, Spain, June 14–17, 2010. Paper SPE-131513-MS. 10 p.
- Anderson B.I., Barber T.D., Habashy T.M. The Interpretation and Inversion of Fully Triaxial Induction Data; A Sensitivity Study // SPWLA 43rd Annual Logging Symposium: transactions. Oiso, Japan, June 2–5, 2002. Paper SPWLA-2002-O. 14 p.
- Arps J.J. Inductive Resistivity Guard Logging Apparatus Including Toroidal Coils Mounted on a Conductive Stem: US Patent. 1967. N 3305771.
- Bittar M.S., Hu G. The Effects of Rock Anisotropy on LWD Toroidal Resistivity Sensors // SPWLA 45th Annual Logging Symposium: transactions. Noordwijk, the Netherlands, June 6–9, 2004. Paper SPWLA-2004-WW. 14 p.
- Bonner S., Bagersh A., Clark B., Dajee G., Dennison M., Hall J.S., Jundt J., Lovell J., Rosthal R., Allen D. A New Generation of Electrode Resistivity Measurements for Formation Evaluation While Drilling // SPWLA 35th Annual Logging Symposium: transactions. Tulsa, Oklahoma, USA, June 19–22, 1994. Paper SPWLA-1994-OO. 25 p.
- Bonner S., Burgess T., Clark B., Decker D., Orban J., Prevedel B., Lüling M., White J. Measurements at the Bit: A New Generation of MWD Tools // Oilfield Review. 1993. N 4–7. P.44–54.
- Bonner S., Fredette M., Lovell J., Montaron B., Rosthal R., Tabanou J., Wu P., Clark B., Mills R., Williams R. Resistivity While Drilling – Images from the String // Oilfield Review. 1996. V. 8, is. 1. P.4–19.
- Borghi M., Piani E., Barbieri E., Dubourg I., Ortenzi L., van Os R. New Logging-While-Drilling Azimuthal Resistivity and High Resolution Imaging in Slim Holes // 10th Offshore Mediterranean Conference and Exhibition: proceedings. Ravenna, Italy, March 23–25, 2011. Paper OMC-2011-167. 9 p.
- Bratton T., Bornemann T., Li Q., Plumb D., Rasmus J., Krabbe H. Logging-While-Drilling Images for Geomechanical, Geological and Petrophysical Interpretations // SPWLA 40th Annual Logging Symposium: transactions. Oslo, Norway, May 30–June 3, 1999. Paper SPWLA-1999-JJJ. 14 p.
- Chardac J.-L., El-Sayed H. Applications of a New Multi-Resistivity & Imaging Tool in the Middle East // SPE Middle East Oil Show: proceedings. Bahrain, March 11–14, 1995. Paper SPE-29838-MS. 8 p.
- Clavaud J.-B., Nelson R., Guru U.K., Wang H. Field Example of Enhanced Hydrocarbon Estimation in Thinly Laminated Formation with a Triaxial Array Induction Tool: A Laminated Sand-Shale Analysis with Anisotropic Shale // SPWLA 46th Annual Logging Symposium: transactions. New Orleans, Louisiana, USA, June 26–29, 2005. Paper SPWLA-2005-WW. 15 p.
- Dowell I., York P., Jackson C.E. Evolution of an LWD Toolstring with Applications for Petrophysical Logging and Drilling Control // Offshore Technology Conference: proceedings. Houston, Texas, USA, May 3–6, 1993. Paper OTC-7356-MS. 12 p.
- Эпов М.И., Глинских В.Н., Еремин В.Н., Никитенко М.Н., Петров А.Н., Михайлов И.В. Electromagnetic Tool for High-Resolution Logging: Theoretical and Experimental Studies // SPE Russian Petroleum

- Technology Conference: proceedings. Moscow, Russia, October 16–18, 2017. Paper SPE-187904-MS. 19 p.
- Epov M., Mikhaylov I., Glinskikh V., Nikitenko M., Surodina I.* Electromagnetic Logging Tool with Toroidal Coils for the Study of Vertically Inhomogeneous Macroanisotropic Formations // 81st EAGE Conference and Exhibition: extended abstracts. London, United Kingdom, June 3–6, 2019. Paper Th_R16_05. 5 p.
- Epov M.I., Nikitenko M.N., Glinskikh V.N., Surodina I.V., Mikhaylov I.V., Eremin V.N., Petrov A.N.* Theoretical Basis of Data Interpretation of Electromagnetic Logging Tool with Toroidal Coils // 8th EAGE Saint Petersburg International Conference and Exhibition: extended abstracts. Saint Petersburg, Russia, April 9–12, 2018. Paper 44489. 6 p.
- Fulda C., Hartmann A., Gorek M.* High Resolution Electrical Imaging While Drilling // SPWLA 51st Annual Logging Symposium: transactions. Perth, Australia, June 19–24, 2010. Paper SPWLA-2010-46830. 16 p.
- Gianzero S.* The Paradox of Anisotropy Revisited // *The Log Analyst*. 1999. V. 40, N 6. P.485–491.
- Gianzero S., Chemali R., Su S.M.* Determining the Invasion Near the Bit with the M.W.D. Toroid Sonde // SPWLA 27th Annual Logging Symposium: transactions. Houston, Texas, USA, June 9–13, 1986. Paper SPWLA-1986-W. 17 p.
- Gianzero S., Chemali R., Su S.M.* Induction, Resistivity, and MWD Tools in Horizontal Wells // *The Log Analyst*. 1990. N 5–6. P.158–171.
- Gianzero S., Chemali R., Lin Y., Su S.M., Foster M.* A New Resistivity Tool for Measurement-While-Drilling // SPWLA 26th Annual Logging Symposium: transactions. Dallas, Texas, USA, June 17–20, 1985. Paper SPWLA-1985-A. 22 p.
- Gomes R.M., Denicol P.S., da Cunha A.M.V., de Souza M.S., Kriegshäuser B.E., Payne J.C., Santos A.* Using Multicomponent Induction Log Data to Enhance Formation Evaluation in Deepwater Reservoirs from Campos Basin, Offshore Brazil // SPWLA 43rd Annual Logging Symposium: transactions. Oiso, Japan, June 2–5, 2002. Paper SPWLA-2002-N. 14 p.
- Gruppung T.I.F., Harrell J.W., Dickinson R.T.* Performance Update of a Dual-Resistivity MWD Tool with Some Promising Results in Oil-Based Mud Applications // SPE 63rd Annual Technical Conference and Exhibition: proceedings. Houston, Texas, USA, October 2–5, 1988. Paper SPE-18115-MS. 13 p.
- Gruppung T.I.F., Wagstaff J.D.* Recent Performance of the Dual-Resistivity MWD Tool // SPE Formation Evaluation. 1990. V. 5, is. 2. P.171–176.
- Hagiwara T.* EM Log Response to Anisotropic Resistivity in Thinly Laminated Formations with Emphasis on 2-MHz Resistivity Devices // SPE Formation Evaluation. 1996. V. 11, is. 4. P.211–217.
- Hartmann A., Gorek M., Fulda C., Kraft K.* Early Bed Boundary Detection While Drilling – Testing and Application of a Bit Resistivity Device // International Petroleum Technology Conference: proceedings. Kuala Lumpur, Malaysia, December 3–5, 2008. Paper IPTC-12063-MS. 11 p.
- Hu G., Bittar M., Hou J.* Evaluation of Horizontal Wells Using LWD Propagation Resistivity and Laterolog-Type Resistivity Logs // SPE Annual Technical Conference and Exhibition: proceedings. San Antonio, Texas, USA, September 24–27, 2006. Paper SPE-103150-MS. 9 p.
- Karinski A., Mousatov A.* Vertical Resistivity Estimation with Toroidal Antennas in Transversely Isotropic Media // SPWLA 42nd Annual Logging Symposium: transactions. Houston, Texas, USA, June 17–20, 2001. Paper SPWLA-2001-BB. 14 p.
- Karinski A., Mousatov A.* Feasibility of Vertical-Resistivity Determination by the LWD Sonde with Toroidal Antennas for Oil-Base Drilling Fluid // SPWLA 43rd Annual Logging Symposium: transactions. Oiso, Japan, June 2–5, 2002. Paper SPWLA-2002-Q. 14 p.
- Klein J.D., Martin P.R., Allen D.F.* The Petrophysics of Electrically Anisotropic Reservoirs // SPWLA 36th Annual Logging Symposium: transactions. Paris, France, June 26–29, 1995. Paper SPWLA-1995-HH. 12 p.
- Kunz K.S., Moran J.H.* Some Effects of Formation Anisotropy on Resistivity Measurements in Boreholes // *Geophysics*. 1958. V. 23. P.770–794.
- Li Q., Lau T., Gee K., Kong J., Gong J., Aron J., Mather J., Li A., Chen S.* Field Test of a HTHP Laterolog-Type Array Resistivity and Imaging While Drilling Tool // SPWLA 60th Annual Log-

- ging Symposium: transactions. Woodlands, Texas, USA, June 15–19, 2019. Paper SPWLA-2019-WWW. 21 p.
- Li Q., Rasmus J., Cannon D.* A Novel Inversion Method for Interpretation of a Focused Multisensor LWD Laterolog Resistivity Tool // SPWLA 40th Annual Logging Symposium: transactions. Oslo, Norway, May 30–June 3, 1999. Paper SPWLA-1999-AAA. 14 p.
- Lovell J.R., Young R.A., Rosthal R.A., Buffington L.* Structural Interpretation of Resistivity-At-the-Bit Images // SPWLA 36th Annual Logging Symposium: transactions. Paris, France, June 26–29, 1995. Paper SPWLA-1995-TT. 12 p.
- Ortenzi L., Dubourg I., van Os R., Han S.Y., Koepsell R., Ha S.C.Y.* New Azimuthal Resistivity and High-Resolution Imager Facilitates Formation Evaluation and Well Placement of Horizontal Slim Boreholes // *Petrophysics*. 2012. V. 53, N 3. P.197–207.
- Pardo D., Torres-Verdin C.* Hydrofracture Diagnosis in Open-Hole and Steel-Cased Wells Using Borehole Resistivity Measurements // 2012 SEG Annual Meeting: proceedings. Las Vegas, Nevada, November 4–9, 2012. Paper SEG-2012-0180. 6 p.
- Prammer M.G., Morys M., Knizhnik S., Conrad C.J., Hendricks W.E., Bittar M.S., Hu G., Hveding F., Kenny K., Shokeir R.M., Seifert D.J., Neumann P.M., Al-Dossari S.* A High-Resolution LWD Resistivity Imaging Tool – Field Testing in Vertical and Highly Deviated Boreholes // *Petrophysics*. 2009. V. 50, N 1. P.49–66.
- Prilliman J., Bean C.L., Hashem M., Bratton T., Fredette M., Lovell J.R.* A Comparison of Wireline and LWD Resistivity Images in the Gulf of Mexico // SPWLA 38th Annual Logging Symposium: transactions. Houston, Texas, USA, June 15–18, 1997. Paper SPWLA-1997-DDD. 11 p.
- Redwine F.H., Osborn W.F.* Formation Resistivity Measurement While Drilling Utilizing Physical Conditions Representative of the Signals from a Toroidal Coil Located Adjacent the Drilling Bit // US Patent. 1968. N 3408561.
- Rosthal R., Barber T., Bonner S., Chen K., Davydycheva S., Hazen G., Homan D., Kibbe C., Schlein R., Villegas L., Wang H., Zhou F.* Field Test of an Experimental Fully-Triaxial Induction Tool // SPWLA 44th Annual Logging Symposium: transactions. Galveston, Texas, USA, June 22–25, 2003. Paper SPWLA-2003-QQ. 14 p.
- Sinclair P., Li A., Ottemen A., Wennekamp A.* LWD Azimuthal Laterolog Resistivity Logging in Unconventional Reservoirs // IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition: proceedings. Tianjin, China, July 9–11, 2012. Paper SPE-155937-MS. 21 p.
- Wait J.R.* Excitation of a Conducting Half-Space by a Toroidal Coil // *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 1995. V. 37, N 4. P.72–74.
- Wang G.L., Wu P., Barber T., Johnson C., Allen D., Kumar A., Xu W., Hayden R.* Triaxial Induction Applications in Difficult and Unconventional Formations // SPWLA 53rd Annual Logging Symposium: transactions. Cartagena, Colombia, June 16–20, 2012. Paper SPWLA-2012-G. 14 p.

Сведения об авторах

МИХАЙЛОВ Игорь Владиславович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук. 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, д. 3. Тел.: +7(913) 381-87-78. E-mail: MikhaylovIV@ipgg.sbras.ru

ГЛИНСКИХ Вячеслав Николаевич – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук. 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, д. 3. Тел.: +7(383) 330-45-05. E-mail: GlinskikhVN@ipgg.sbras.ru

НИКИТЕНКО Марина Николаевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук. 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, д. 3. Тел.: +7(383) 330-96-02. E-mail: NikitenkoMN@ipgg.sbras.ru

APPLICATION OF TOROIDAL COILS IN OIL AND GAS WELL LOGGING PROBLEMS (ANALYTICAL REVIEW)

I.V. Mikhaylov, V.N. Glinskikh, M.N. Nikitenko

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

Corresponding author: I.V. Mikhaylov (e-mail: MikhaylovIV@ipgg.sbras.ru)

Abstract. Following the materials of publicly available foreign and Russian scientific literature, we have carried out an analytical review of applying toroidal coils – unconventional for oil and gas well logging transmitters and receivers of electromagnetic signals. The performed analysis indicates a variety of problems to be solved with toroidal coils in sections of vertical and highly deviated wells. Among these issues are resistivity measurement during drilling at high electrical contrasts between the well and formation, resistivity-at-the-bit determination, while-drilling appraisal of the filtration-volumetric properties of thin interlayers, electrical imaging, quantitative characterization of hydraulic fracturing parameters, and resistivity anisotropy evaluation for realistic fluid saturation estimation.

The idea of applying toroidal coils is embodied in the Russian practice in a new electromagnetic tool with toroidal coils of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS and the ‘Looch’ Scientific Production Enterprise of Geophysical Equipment, aimed at logging in oil and gas wells with assessing the resistivity anisotropy coefficient of thin-layered sand-shale deposits. The electromagnetic tool with toroidal coils, devised in Novosibirsk, is characterized by a high spatial resolution and is a worthy alternative to multi-component induction logging tools.

Keywords: toroidal coils, resistivity logging, thinly bedded reservoir, resistivity anisotropy, oil saturation.

Funding

The reported study was carried out with financial support by Russian Foundation for Basic Research according to the research, project № 19-05-00595.

Conflict of interest

The authors declare they have no conflict of interest.

References

- Al'pin L.M., Determination of transverse resistivity of reservoirs from measurements in wells, *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka* (News of higher educational institutions. Geology and exploration), 1978, no. 4, pp. 81-95. [in Russian].
- Al'pin L.M., Velikin S.A., Determination of anisotropy from measurements in wells, *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka* (News of higher educational institutions. Geology and exploration), 1983, no. 12, pp. 97-99. [in Russian].
- Al-Riyami A., Boyd D., Dajani N., Resistivity Measurement in Anisotropic Horizontal Carbonate Wells, *proceedings of the 7th Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*, Abu Dhabi, United Arab Emirates, October 13-16, 1996, paper SPE-36240-MS, 15 p.
- Allouche M., Chow S., Dubourg I., Ortenzi L., van Os R., High-resolution Images and Formation Evaluation in Slim Holes from a New Logging-While-Drilling Azimuthal Laterolog Device, *proceedings of the SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition*, Barcelona, Spain, June 14-17, 2010, paper SPE-131513-MS, 10 p.
- Anderson B.I., Barber T.D., Habashy T.M., The Interpretation and Inversion of Fully Triaxial Induction Data; A Sensitivity Study, *transactions of the SPWLA 43rd Annual Logging Symposium*, Oiso, Japan, June 2-5, 2002, paper SPWLA-2002-O, 14 p.

- Arps J.J., Inductive Resistivity Guard Logging Apparatus Including Toroidal Coils Mounted on a Conductive Stem, *US Patent*, 1967, no. 3305771.
- Bittar M.S., Hu G., The Effects of Rock Anisotropy on LWD Toroidal Resistivity Sensors, *transactions of the SPWLA 45th Annual Logging Symposium*, Noordwijk, the Netherlands, June 6-9, 2004, paper SPWLA-2004-WW, 14 p.
- Bonner S., Bagersh A., Clark B., Dajee G., Dennison M., Hall J.S., Jundt J., Lovell J., Rosthal R., Allen D., A New Generation of Electrode Resistivity Measurements for Formation Evaluation While Drilling, *transactions of the SPWLA 35th Annual Logging Symposium*, Tulsa, Oklahoma, USA, June 19-22, 1994, paper SPWLA-1994-OO, 25 p.
- Bonner S., Burgess T., Clark B., Decker D., Orban J., Prevedel B., Lüling M., White J., Measurements at the Bit: A New Generation of MWD Tools, *Oilfield Review*, 1993, no. 4-7, pp. 44-54.
- Bonner S., Fredette M., Lovell J., Montaron B., Rosthal R., Tabanou J., Wu P., Clark B., Mills R., Williams R., Resistivity While Drilling – Images from the String, *Oilfield Review*, 1996, vol. 8, is. 1, pp. 4-19.
- Borghini M., Piani E., Barbieri E., Dubourg I., Ortenzi L., van Os R., New Logging-While-Drilling Azimuthal Resistivity and High Resolution Imaging in Slim Holes, *Proceedings of the 10th Offshore Mediterranean Conference and Exhibition*, Ravenna, Italy, March 23-25, 2011, paper OMC-2011-167, 9 p.
- Bratton T., Bornemann T., Li Q., Plumb D., Rasmus J., Krabbe H., Logging-While-Drilling Images for Geomechanical, Geological and Petrophysical Interpretations, *transactions of the SPWLA 40th Annual Logging Symposium*, Oslo, Norway, May 30-June 3, 1999, paper SPWLA-1999-JJJ, 14 p.
- Chardac J.-L., El-Sayed H., Applications of a New Multi-Resistivity & Imaging Tool in the Middle East, *proceedings of the SPE Middle East Oil Show*, Bahrain, March 11-14, 1995, paper SPE-29838-MS, 8 p.
- Clavaud J.-B., Nelson R., Guru U.K., Wang H., Field Example of Enhanced Hydrocarbon Estimation in Thinly Laminated Formation with a Triaxial Array Induction Tool: A Laminated Sand-Shale Analysis with Anisotropic Shale, *transactions of the SPWLA 46th Annual Logging Symposium*, New Orleans, Louisiana, USA, June 26-29, 2005, paper SPWLA-2005-WW, 15 p.
- Daev D.S., On the source of the electromagnetic field in high-frequency measurements in a well, *Izvestiya AN SSSR. Seriya Fizika Zemli* (Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Earth physics series), 1968, no. 11, pp. 94-95. [in Russian].
- Dowell I., York P., Jackson C.E., Evolution of an LWD Toolstring with Applications for Petrophysical Logging and Drilling Control, *proceedings of the Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, USA, May 3-6, 1993, paper OTC-7356-MS, 12 p.
- Epov M.I., Eremin V.N., Glinskikh V.N., Mikhaylov I.V., Nikitenko M.N., Surodina I.V., Electromagnetic tool with toroidal coils for determining resistivity macroanisotropy of oil reservoirs, *reports of the XI international symposium of the Silk Road Economic Belt (SREB) and the Eurasian Economic Union (EAEU) countries*, Novosibirsk, Russia, September 16-20, 2019a, pt. 1, pp. 129-138.
- Epov M.I., Eremin V.N., Manshtein A.K., Petrov A.N., Glinskikh V.N., *Ustroistvo dlya izmereniya udel'noi elektroprovodnosti i elektricheskoi makroanizotropii gornykh porod* (Device for measuring the specific electrical conductivity and electrical macroanisotropy of rocks), Russian Patent, 2014, no. 2528276.
- Epov M.I., Eremin V.N., Petrov A.N., Glinskikh V.N., Surodina I.V., Kiselev V.V., *Ustroistvo dlya generatsii elektromagnitnogo polya toroidal'noi katushkoj v geologicheskoi srede* (Device for generating an electromagnetic field by a toroidal coil in a geological environment), Russian Patent, 2016a, no. 2579177.
- Epov M.I., Eremin V.N., Petrov A.N., Glinskikh V.N., Surodina I.V., Kiselev V.V., Nikitenko M.N., *Ustroistvo dlya registratsii kharakteristik elektromagnitnogo polya s ispol'zovaniem toroidal'nykh katushek* (Device for recording characteristics of an electromagnetic field using toroidal coils), Russian Patent, 2016b, no. 2578774.
- Epov M.I., Eremin V.N., Petrov A.N., Glinskikh V.N., *Elektromagnitnyi zond dlya karotazha v neftegazovykh skvazhinakh* (Electromagnetic tool for logging in oil and gas wells), Russian Patent, 2016c, no. 97539.
- Epov M.I., Eremin V.N., Petrov A.N., Glinskikh V.N., *Elektromagnitnyi zond dlya karotazha v neftegazovykh skvazhinakh* (Electromagnetic tool for logging in oil and gas wells), Russian Patent, 2016d, no. 2583867.
- Epov M.I., Glinskikh V.N., Eremin V.N., Mikhaylov I.V., Nikitenko M.N., Osipov S.V., Petrov A.N., Surodina I.V., Yatsenko V.M., New electromagnetic tool for high-resolution logging: from theoretical substantiation to downhole testing, *Neftyanoe khozyaistvo* (Oil industry), 2018, no. 11, pp. 23-27. [in Russian].
- Epov M.I., Glinskikh V.N., Eremin V.N., Nikitenko M.N., Petrov A.N., Mikhaylov I.V., Electromagnetic Tool for High-Resolution Logging: Theoretical and Experimental Studies, *proceedings of the SPE Russian Petroleum Technology Conference*, Moscow, Russia, October 16-18, 2017, paper SPE-187904-MS, 19 p.

- Epov M.I., Glinskikh V.N., Eremin V.N., Nikitenko M.N., Petrov A.N., Surodina I.V., Mikhaylov I.V., Mathematical and physical simulation of responses of an electromagnetic logging tool for studying macroanisotropy of sedimentary deposits, *rasshirennye tezisy 19-i konferentsii EAGE po voprosam geologorazvedki i razrabotki mestorozhdenii nefi i gaza "Geomodel' 2017"* (extended abstracts of the 19th conference on oil and gas geological exploration and development "Geomodel 2017"), Gelendzhik, Russia, September 11-14, 2017, paper 43809, 6 p.
- Epov M.I., Glinskikh V.N., Nikitenko M.N., *Sposob izmereniya udel'noi elektroprovodnosti i elektricheskoi makroanizotropii gornykh porod* (Method for measuring the specific electric conductivity and electrical macroanisotropy of rocks), Russian Patent, 2014, no. 2525149.
- Epov M., Mikhaylov I., Glinskikh V., Nikitenko M., Surodina I., Electromagnetic Logging Tool with Toroidal Coils for the Study of Vertically Inhomogeneous Macroanisotropic Formations, *extended abstracts of the 81st EAGE Conference and Exhibition*, London, United Kingdom, June 3-6, 2019, paper Th_R16_05, 5 p.
- Epov M.I., Mikhaylov I.V., Glinskikh V.N., Nikitenko M.N., Surodina I.V., Algorithms of data processing and inversion for an electromagnetic tool with toroidal coils when studying macroanisotropic properties of reservoirs, *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* (Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering), 2019b, vol. 330, no. 6, pp. 187-197. [in Russian].
- Epov M.I., Nikitenko M.N., Glinskikh V.N., Surodina I.V., Mikhaylov I.V., Eremin V.N., Petrov A.N., Theoretical Basis of Data Interpretation of Electromagnetic Logging Tool with Toroidal Coils, *extended abstracts of the 8th EAGE Saint Petersburg International Conference and Exhibition*, Saint Petersburg, Russia, April 9-12, 2018, paper 44489, 6 p.
- Epov M.I., Nikitenko M.N., Glinskikh V.N., Mathematical substantiation of a new electromagnetic tool with toroidal coils for high-resolution logging of oil and gas wells, *Vestnik NGU. Seriya: Informatsionnye tekhnologii* (Vestnik NSU. Series: Information technologies), 2018, vol. 16, no. 1, pp. 113-129. [in Russian].
- Fulda C., Hartmann A., Gorek M., High Resolution Electrical Imaging While Drilling, *transactions of the SPWLA 51st Annual Logging Symposium*, Perth, Australia, June 19-24, 2010, paper SPWLA-2010-46830, 16 p.
- Gianzero S., The Paradox of Anisotropy Revisited, *The Log Analyst*, 1999, vol. 40, no. 6, pp. 485-491.
- Gianzero S., Chemali R., Su S.M., Determining the Invasion Near the Bit with the M.W.D. Toroid Sonde, *transactions of the SPWLA 27th Annual Logging Symposium*, Houston, Texas, USA, June 9-13, 1986, paper SPWLA-1986-W, 17 p.
- Gianzero S., Chemali R., Su S.M., Induction, Resistivity, and MWD Tools in Horizontal Wells, *The Log Analyst*, 1990, no. 5-6, pp. 158-171.
- Gianzero S., Chemali R., Lin Y., Su S.M., Foster M., A New Resistivity Tool for Measurement-While-Drilling, *transactions of the SPWLA 26th Annual Logging Symposium*, Dallas, Texas, USA, June 17-20, 1985, paper SPWLA-1985-A, 22 p.
- Gomes R.M., Denicol P.S., da Cunha A.M.V., de Souza M.S., Kriegshäuser B.E., Payne J.C., Santos A., Using Multicomponent Induction Log Data to Enhance Formation Evaluation in Deepwater Reservoirs from Campos Basin, Offshore Brazil, *transactions of the SPWLA 43rd Annual Logging Symposium*, Oiso, Japan, June 2-5, 2002, paper SPWLA-2002-N, 14 p.
- Gruppung T.I.F., Harrell J.W., Dickinson R.T., Performance Update of a Dual-Resistivity MWD Tool with Some Promising Results in Oil-Based Mud Applications, *proceedings of the SPE 63rd Annual Technical Conference and Exhibition*, Houston, Texas, USA, October 2-5, 1988, paper SPE-18115-MS, 13 p.
- Gruppung T.I.F., Wagstaff J.D., Recent Performance of the Dual-Resistivity MWD Tool, *SPE Formation Evaluation*, 1990, vol. 5, is. 2, pp. 171-176.
- Hagiwara T., EM Log Response to Anisotropic Resistivity in Thinly Laminated Formations with Emphasis on 2-MHz Resistivity Devices, *SPE Formation Evaluation*, 1996, vol. 11, is. 4, pp. 211-217.
- Hartmann A., Gorek M., Fulda C., Kraft K., Early Bed Boundary Detection While Drilling – Testing and Application of a Bit Resistivity Device, *proceedings of the International Petroleum Technology Conference*, Kuala Lumpur, Malaysia, December 3-5, 2008, paper IPTC-12063-MS, 11 p.
- Hu G., Bittar M., Hou J., Evaluation of Horizontal Wells Using LWD Propagation Resistivity and Laterolog-Type Resistivity Logs, *proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, San Antonio, Texas, USA, September 24-27, 2006, paper SPE-103150-MS, 9 p.
- Karinski A., Mousatov A., Vertical Resistivity Estimation with Toroidal Antennas in Transversely Isotropic Media, *transactions of the SPWLA 42nd Annual Logging Symposium*, Houston, Texas, USA, June 17-20, 2001, paper SPWLA-2001-BB, 14 p.

- Karinski A., Mousatov A., Feasibility of Vertical-Resistivity Determination by the LWD Sonde with Toroidal Antennas for Oil-Base Drilling Fluid, *transactions of the SPWLA 43rd Annual Logging Symposium*, Oiso, Japan, June 2-5, 2002, paper SPWLA-2002-Q, 14 p.
- Karinskii A.D., Solutions of direct problems on the field of a toroidal antenna in an anisotropic medium, *Fizika Zemli* (Earth physics), 2003, no. 1, pp. 9-20. [in Russian].
- Karinskii A.D., *Elektromagnitnoe pole v modelyakh elektricheskoi anizotropnoi sredy* (Electromagnetic field in electrically anisotropic medium models), Moscow: GEOS, 2018, 184 p. [in Russian].
- Klein J.D., Martin P.R., Allen D.F., The Petrophysics of Electrically Anisotropic Reservoirs, *transactions of the SPWLA 36th Annual Logging Symposium*, Paris, France, June 26-29, 1995, paper SPWLA-1995-HH, 12 p.
- Kunz K.S., Moran J.H., Some Effects of Formation Anisotropy on Resistivity Measurements in Boreholes, *Geophysics*, 1958, vol. 23, pp. 770-794.
- Li Q., Lau T., Gee K., Kong J., Gong J., Aron J., Mather J., Li A., Chen S., Field Test of a HTHP Laterolog-Type Array Resistivity and Imaging While Drilling Tool, *transactions of the SPWLA 60th Annual Logging Symposium*, Woodlands, Texas, USA, June 15-19, 2019, paper SPWLA-2019-WWW, 21 p.
- Li Q., Rasmus J., Cannon D., A Novel Inversion Method for Interpretation of a Focused Multisensor LWD Laterolog Resistivity Tool, *transactions of the SPWLA 40th Annual Logging Symposium*, Oslo, Norway, May 30-June 3, 1999, paper SPWLA-1999-AAA, 14 p.
- Lovell J.R., Young R.A., Rosthal R.A., Buffington L., Structural Interpretation of Resistivity-At-the-Bit Images, *transactions of the SPWLA 36th Annual Logging Symposium*, Paris, France, June 26-29, 1995, paper SPWLA-1995-TT, 12 p.
- Melnik I.A., Cause of low electrical resistance in the low-resistance reservoirs, *Geophysical Research*, 2014, vol. 15, no. 4, pp. 44-53.
- Mikhaylov I.V., Velesov D.V., Glinskikh V.N., Study of thin-layered reservoirs with toroidal sources and receivers (on the example of the Priobskoye oil field), *Geofizicheskie tekhnologii* (Russian Journal of geophysical technologies), 2020, no. 1, pp. 16-27. [in Russian].
- Mogilatov V.S., Borisov G.A., Excitation of layered geo-electrical media by a harmonic magnetic current, *Sibirskii zhurnal industrial'noi matematiki* (Journal of applied and industrial mathematics), 2003, vol. 6, no. 1, pp. 77-87. [in Russian].
- Ortenzi L., Dubourg I., van Os R., Han S.Y., Koepsell R., Ha S.C.Y., New Azimuthal Resistivity and High-Resolution Imager Facilitates Formation Evaluation and Well Placement of Horizontal Slim Boreholes, *Petrophysics*, 2012, vol. 53, no. 3, pp. 197-207.
- Pardo D., Torres-Verdin C., Hydrofracture Diagnosis in Open-Hole and Steel-Cased Wells Using Borehole Resistivity Measurements, *proceedings of the 2012 SEG Annual Meeting*, Las Vegas, Nevada, November 4-9, 2012, paper SEG-2012-0180, 6 p.
- Potapov V.V., Epov M.I., Surodina I.V., Nikitenko M.N., Glinskikh V.N., Mikhaylov I.V., *Avtomatizirovannaya sistema obrabotki i interpretatsii dannykh elektromagnitnogo zonda s toroidal'nymi katushkami (ZET)* (Automated system for processing and interpreting data of the electromagnetic tool with toroidal coils (ZET)), Certificate of state registration of a computer program, 2018, no. 2018616171. [in Russian].
- Prammer M.G., Morys M., Knizhnik S., Conrad C.J., Hendricks W.E., Bittar M.S., Hu G., Hveding F., Kenny K., Shokeir R.M., Seifert D.J., Neumann P.M., Al-Dossari S., A High-Resolution LWD Resistivity Imaging Tool – Field Testing in Vertical and Highly Deviated Boreholes, *Petrophysics*, 2009, vol. 50, no. 1, pp. 49-66.
- Prilliman J., Bean C.L., Hashem M., Bratton T., Fredette M., Lovell J.R., A Comparison of Wireline and LWD Resistivity Images in the Gulf of Mexico, *transactions of the SPWLA 38th Annual Logging Symposium*, Houston, Texas, USA, June 15-18, 1997, paper SPWLA-1997-DDD, 11 p.
- Redwine F.H., Osborn W.F., Formation Resistivity Measurement While Drilling Utilizing Physical Conditions Representative of the Signals from a Toroidal Coil Located Adjacent the Drilling Bit, *US Patent*, 1968, no. 3408561.
- Rosthal R., Barber T., Bonner S., Chen K., Davydycheva S., Hazen G., Homan D., Kibbe C., Schlein R., Villegas L., Wang H., Zhou F., Field Test of an Experimental Fully-Triaxial Induction Tool, *transactions of the SPWLA 44th Annual Logging Symposium*, Galveston, Texas, USA, June 22-25, 2003, paper SPWLA-2003-QQ, 14 p.
- Rytov S.M., Electromagnetic properties of a finely stratified medium, *Soviet Physics JETP*, 1956, vol. 2, no. 3, pp. 466-475.
- Sinclair P., Li A., Ottemen A., Wennekamp A., LWD Azimuthal Laterolog Resistivity Logging in Unconventional Reservoirs, *proceedings of the IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition*, Tianjin, China, July 9-11, 2012, paper SPE-155937-MS, 21 p.

- Surodina I.V., Numerical simulation of electromagnetic tool signals with toroidal coils in two-dimensional isotropic geological media models, *Materialy XIV mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa "Interexpo GEO-Sibir 2018"* (proceedings of the XIV international scientific congress "Interexpo GEO-Sibir 2018"), Novosibirsk, Russia, April 23-27, 2018, vol. 4, pp. 162-170. [in Russian].
- Surodina I.V., Mikhaylov I.V., Mathematical simulation of electromagnetic fields from a toroidal source in two-dimensional anisotropic earth models, *Materialy devyatnadsatoi vserossiiskoi konferentsii "Geodinamika, geomekhanika i geofizika"* (proceedings of the nineteenth all-Russian conference "Geodynamics, geomechanics and geophysics"), "Denisova Cave" facility, Altai Krai, Russia, July 22-28, 2019, pp. 137-139. [in Russian].
- Tabarovskii L.A., Kaganskii A.M., Epov M.I., Electromagnetic field of a harmonic source in an anisotropic cylindrically layered medium, *Geologiya i geofizika* (Geology and geophysics), 1976, no. 3, pp. 94-99. [in Russian].
- Wait J.R., Excitation of a Conducting Half-Space by a Toroidal Coil, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 1995, vol. 37, no. 4, pp. 72-74.
- Wang G.L., Wu P., Barber T., Johnson C., Allen D., Kumar A., Xu W., Hayden R., Triaxial Induction Applications in Difficult and Unconventional Formations, *transactions of the SPWLA 53rd Annual Logging Symposium*, Cartagena, Colombia, June 16-20, 2012, paper SPWLA-2012-G, 14 p.

About the authors

MIKHAILOV Igor' Vladislavovich – Cand. Sci. (Eng.), Senior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Koptug ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia. Ph.: +7(913) 381-87-78. E-mail: MikhaylovIV@ipgg.sbras.ru

GLINSKIKH Vyacheslav Nikolaevich – Corresponding member of RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), head of the laboratory, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Koptug ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia. Ph.: +7(383) 330-45-05. E-mail: GlinskikhVN@ipgg.sbras.ru

NIKITENKO Marina Nikolaevna – Cand. Sci. (Eng.), Senior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Koptug ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia. Ph.: +7(383) 330-96-02. E-mail: NikitenkoMN@ipgg.sbras.ru