



ЭВОЛЮЦИЯ ПРИБОРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ (ПО МАТЕРИАЛАМ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ И ЗАРУБЕЖНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ)

К.Н. Даниловский, И.А. Москаев

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,
e-mail: MoskaevIA@ipgg.sbras.ru*

Рассмотрены важные этапы в развитии аппаратуры электромагнитного каротажа по материалам отечественной и зарубежной литературы: адаптация традиционных приборов для измерений в процессе бурения и модификация аппаратуры для измерений в процессе бурения с целью обеспечения возможности проведения более глубоких и азимутальных измерений. Кратко описываются применяемые алгоритмы моделирования и интерпретации данных, приводятся примеры приборов, используемых при бурении нефтяных скважин, в том числе отечественная разработка.

Электромагнитный каротаж в процессе бурения, глубинные измерения, азимутальные измерения, инверсия, геонавигация

EVOLUTION OF ELECTROMAGNETIC LOGGING WHILE DRILLING TOOLS (BASED ON NATIONAL AND FOREIGN LITERATURE)

K.N. Danilovskiy, I.A. Moskaev

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: MoskaevIA@ipgg.sbras.ru*

Important stages in the development of electromagnetic logging tools based on national and foreign literature are considered: adaptation of traditional tools to logging while drilling and modification of tools for logging while drilling in order to provide the possibility of carrying out deeper and azimuthal measurements. Applied algorithms for modeling and interpreting data are briefly described, examples of tools which are used while drilling oil wells, including the national tool, are given.

Electromagnetic logging while drilling, deep measurements, azimuthal measurements, inversion, geosteering

ВВЕДЕНИЕ

В последние 40 лет разрабатывается и все более широко внедряется каротаж в процессе бурения (на английском языке: logging while drilling или LWD) [Patton et al., 1977; Gravley, 1983]. Преимущество каротажа в процессе бурения над каротажом на кабеле состоит в том, что при использовании каротажа в процессе бурения не нужно дополнительно тратить время на спуск и подъем измерительного прибора. Благодаря этому скважина не простаивает и, как следствие, сокращаются денежные расходы на осуществление работ на скважине. По этой причине каротаж в процессе бурения постепенно вытесняет каротаж на кабеле [Аксельрод, 2001].

Одна из первых коммерческих телеметрических систем, позволявших проводить измерения удельного электрического сопротивления (УЭС) пластов в процессе бурения, была предложена в начале

1980-х гг. компанией Schlumberger [Tanguy, Zoeller, 1981; Gravley, 1983]. В качестве прибора для определения УЭС использовался потенциал-зонд, устанавливаемый за буровым долотом. Такой потенциал-зонд применялся для корреляции геологических маркеров, определения характеристик флюидов в пористых пластах и порового давления в глинах [Jan, Campbell, 1984].

Однако потенциал-зонды обладают малой радиальной глубиной и низким вертикальным разрешением. Более того, будучи устройствами постоянного тока, потенциал-зонды не работают в непроводящих буровых растворах на углеводородной основе [Rodney, Wisler, 1986]. Альтернатива методам, основанным на постоянном токе, была найдена в применении электромагнитного каротажа (ЭМК) в процессе бурения, который широко используется в настоящее время.

В данной статье выделены и рассмотрены важные этапы в развитии приборов ЭМК в процессе бурения: 1) адаптация традиционных приборов ЭМК для измерений в процессе бурения, 2) модификация приборов ЭМК в процессе бурения с целью обеспечения возможности проведения более глубоких и азимутальных (направленных) измерений с помощью данных приборов. Приводятся примеры реальных приборов, используемых при бурении нефтяных скважин.

ПРИБОРЫ ТРАДИЦИОННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ С ОСЕСИММЕТРИЧНЫМИ КАТУШКАМИ

Для оперативного получения информации о распределении УЭС горных пород из скважин с растворами на нефтяной основе в 80-е гг. XX века приборы ЭМК начали адаптировать к измерениям в процессе бурения [Clark et al., 1988; Fredericks et al., 1989; Bittar et al., 1993; Oberkircher et al., 1993; Gianzero et al., 1994; Meyer et al., 1994; Wisler et al., 1998].

Преимущества ЭМК по сравнению с методами постоянного тока состоят в том, что приборы ЭМК имеют большую радиальную глубину и работают во всех типах буровых растворов.

Устройства индукционного каротажа широко использовались при проведении каротажа на кабеле благодаря их большей глубинности, чем у приборов высокочастотного ЭМК. Однако устройства индукционного каротажа изначально были достаточно хрупкими, чтобы выдержать жесткие условия бурения. Поэтому приборы высокочастотного ЭМК, как более прочные конструктивно, выступили в качестве альтернативы устройствам индукционного каротажа в процессе бурения [Clark et al., 1988].

Недостаток приборов ЭМК состоит в том, что они не подходят для геонавигации в случаях, если УЭС граничащих пластов слабо отличаются между собой.

Одним из первых коммерческих устройств ЭМК стал прибор под названием Electromagnetic Wave Resistivity (EWR), представленный в 1986 году компанией NL Information Services [Rodney, Wisler, 1986]. В конфигурацию прибора входит один зонд, состоящий из одной генераторной и двух приемных катушек (рис. 1).



Рис. 1. Схема конфигурации прибора EWR, красным цветом обозначена генераторная катушка, зеленым цветом – приемные катушки, стрелками показана ориентация катушек

В конце 1980-х гг. различными геофизическими компаниями разработаны другие варианты приборов ЭМК в процессе бурения, такие как CDR (представлен компанией Schlumberger в 1988 году) [Clark et al., 1988], DPR (представлен компанией Teleco в 1989 году) [Fredericks et al., 1989].

В 1995 году компания Schlumberger представила прибор для ЭМК в процессе бурения под названием Array Resistivity Compensated (ARC5) [Bonner et al., 1995]. Прибор ARC5 состоит из набора трехкатушечных зондов и включает в себя пять генераторных и две приемных катушки (рис. 2). Каждая генераторная катушка работает на частоте 2 МГц. Разность фаз и отношение амплитуд сигнала для каждой из генераторных катушек измеряются между двумя приемными катушками, предоставляя в общей сложности десять исходных сигналов. Наибольшее расстояние между двумя катушками составляет около 1.5 м.

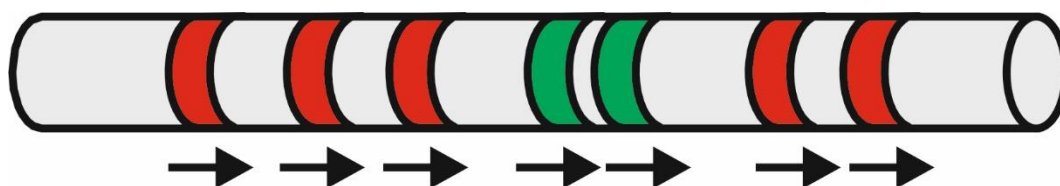


Рис. 2. Схема конфигурации прибора ARC5, красным цветом обозначены генераторные катушки, зеленым цветом – приемные катушки, стрелками показана ориентация катушек

Характеристики и количество производимых измерений прибора ARC5 были преднамеренно выбраны такими же, как для созданных ранее приборов ЭМК на кабеле, с целью сделать возможным применение для прибора ARC5 той же методики интерпретации данных, что и для приборов ЭМК на кабеле.

Первым отечественным вариантом аппаратуры для каротажа в процессе бурения является телеметрическая система, разработанная НПП ГА «Луч» и Институтом нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Весь аппаратно-программный комплекс данной системы включает в себя методы высокочастотного индукционного каротажа (ВИКПБ), гамма-каротажа, бокового, нейтрон-нейтронного и гамма-гамма плотностного каротажа, инклинометрию. В середине 2010-х гг. завершена разработка, проведены успешные испытания и начато внедрение этой аппаратуры. В ВИКПБ используются две генераторные и три приемные катушки, ориентированные вдоль оси прибора (рис. 3).

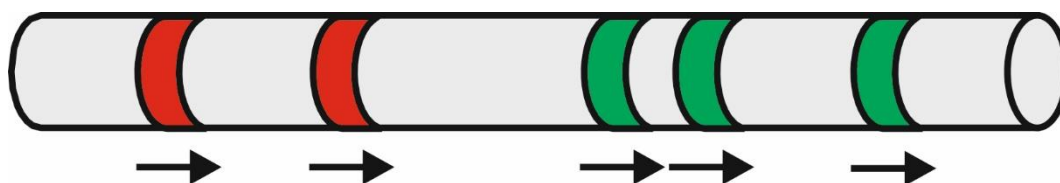


Рис. 3. Схема конфигурации прибора ВИКПБ, красным цветом обозначены генераторные катушки, зеленым цветом – приемные катушки, стрелками показана ориентация катушек

Измерения осуществляются двумя основными и четырьмя дополнительными трехкатушечными зондами с длинами 1.4, 1.05 и 0.7 м, работающими на двух частотах: 880 кГц и 3.5 МГц с регистрацией относительных амплитудно-фазовых характеристик в приемных катушках. Зонды одинаковой длины

различаются базой, то есть расстоянием между дальней и ближней приемными катушками. Глубинность прибора в среднем составляет до 2.0 м.

Основные преимущества многозондовых приборов ЭМК заключаются в более точной оценке электрофизических свойств неизменных пластов, возможностях исследования профиля проникновения бурового раствора, содержащего полезную информацию о фильтрационно-емкостных свойствах изучаемой среды: проницаемости и пористости, а также определения параметров анизотропии [Bonner et al., 1995].

Традиционные приборы ЭМК в процессе бурения в силу своей недостаточной глубинности и отсутствия азимутальных измерений не всегда могли решать задачи удаленного определения границ пластов при бурении наклонно-горизонтальных скважин. В частности, по их измерениям без привлечения дополнительной информации невозможно определить, сверху или снизу происходит приближение геоэлектрической границы пластов. Решение этой проблемы найдено в применении азимутальных и более глубинных приборов ЭМК.

ПРИБОРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА С ПОВЫШЕННОЙ ГЛУБИННОСТЬЮ И АЗИМУТАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГЕОНАВИГАЦИИ И КАРТИРОВАНИЯ ГРАНИЦ

Так как коллекторы становятся все более труднодостижимыми, а скважины – все более сложными, геонавигация требует более современных геофизических методов [Calleja et al., 2010]. Более современные методы, помимо прочих, включают в себя сверхглубинный и азимутальный ЭМК в процессе бурения, отличающиеся от традиционного ЭМК.

Благодаря развитию приборов ЭМК в процессе бурения, включающих в себя катушки, разнесенные на относительно большие расстояния, а также неосесимметричные катушки и, как следствие, предоставляющих возможность проведения более глубинных и азимутальных измерений соответственно [Iversen et al., 2003; Helgesen et al., 2005b; Meyer et al., 2008; Bittar et al., 2009; Beer et al., 2010], осуществляется геонавигация в пределах сложных коллекторов.

С помощью приборов для азимутальных измерений ЭМК возможно определять расстояние до приближающейся границы между пластами и, в отличие от приборов лишь с осесимметричными катушками, направление ее приближения [Bell et al., 2006; Meyer et al., 2008; Tilsley-Baker et al., 2013]. Азимутальные измерения ЭМК в процессе бурения могут быть полезны при размещении скважины в пластах таким образом, чтобы траектория скважины проходила в наиболее продуктивной зоне, а также была настолько плавной, насколько это возможно. Полевые испытания показали, что азимутальные измерения ЭМК в процессе бурения обеспечивают ценную геологическую информацию для опережающей геонавигации [Bell et al., 2006].

Разработка приборов ЭМК с измерениями LWD, характеризующимися высокой глубинностью и наличием азимутальной чувствительности, выделена во второй этап эволюции приборов ЭМК в процессе бурения.

Сверхглубинный прибор ЭМК в процессе бурения DeepTrak разработан компанией Baker Hughes для улучшения качества геонавигации протяженных горизонтальных участков скважин. Данный прибор не обладает азимутальной чувствительностью, а большая глубинность достигается за счет более низких рабочих частот и большего расстояния между генераторной и приемными катушками [Helgesen et al., 2005a].

Измерения прибора DeepTrak дают возможность заблаговременного обнаружения приближения границы в реальном времени. Таким образом, в траекторию скважины могут быть внесены необходимые корректировки.

Прибор DeepTrak включает в себя одну генераторную и две приемные катушки (рис. 4).

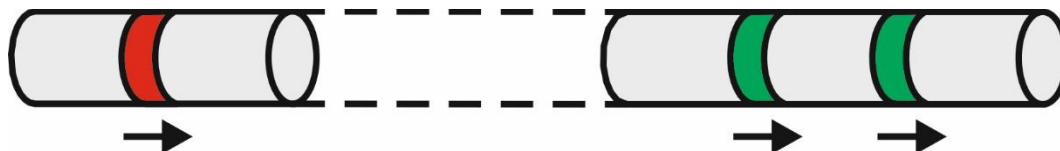


Рис. 4. Схема конфигурации прибора DeepTrak, красным цветом обозначена генераторная катушка, зеленым цветом – приемные катушки, стрелками показана ориентация катушек

Данное устройство позволяет выполнять измерения на двух частотах: 20 и 50 кГц. Полная длина всей компоновки низа бурильной колонны (КНБК), включающей прибор DeepTrak, составляет 23 м. Расстояния от генераторной до приемных катушек равны 12 и 17 м. Чтобы расстояния между генераторными и приемными катушками достигали таких больших значений, катушки располагаются на отдельных подсистемах КНБК. Между катушками находится система OnTrak, включающая в себя, помимо прочих устройств, установку традиционного многозондового ЭМК. Ошибки измерения прибора ниже 0.033° и 0.01 дБ для разностей фаз и отношений амплитуд соответственно. Глубинность прибора DeepTrak примерно в пять раз больше, чем глубинность традиционных приборов, и составляет от 1 до 12 м [Helgesen et al., 2005a].

К 2005 году фирмой Schlumberger разработана и испытана в полевых условиях в различных частях мира технология каротажа в процессе бурения под названием PeriScope, которая дает возможность осуществлять направленные измерения ЭМК в процессе бурения путем использования поперечных и наклонных катушек [Li et al., 2005; Zhang et al., 2008].

PeriScope включает в себя пару приемных катушек, наклоненных к его оси на 45° и размещенных на противоположных концах прибора (рис. 5). Кроме того, в его конструкцию включены шесть генераторных катушек, сгруппированных между наклонными катушками. Одна из генераторных катушек имеет поперечную ориентацию, тогда как магнитные моменты остальных генераторных катушек ориентированы вдоль оси прибора. Также в конфигурацию PeriScope включена дополнительная пара приемных катушек, которая в сочетании с осесимметричными генераторными катушками дает возможность осуществлять ненаправленные измерения ЭМК. Наибольшее расстояние между генераторной и приемной катушками составляет примерно 2.4 м.

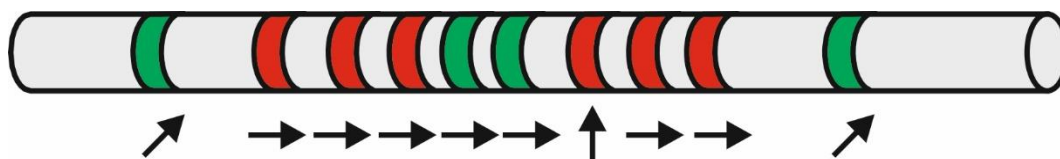


Рис. 5. Схема конфигурации прибора PeriScope, красным цветом обозначены генераторные катушки, зеленым цветом – приемные катушки, стрелками показаны ориентации катушек

В общем и целом, PeriScope обеспечивает направленные измерения разностей фаз и отношений амплитуд при четырех различных расстояниях между генераторными и приемными катушками (244, 213, 86 и 56 см) и на трех частотах: 100 кГц, 400 кГц и 2 МГц. К тому же, сочетание поперечной генераторной и наклонных приемных катушек позволяет производить измерения с особенной чувствительностью к анизотропии пластов. Данное измерение выполняется на двух частотах: 100 и 400 кГц. Прибор PeriScope позволяет обнаруживать и прослеживать границы слоев в режиме реального времени на расстоянии до 4.5 м вокруг скважины [Li et al., 2005].

К 2008 году компанией Baker Hughes разработан и введен в эксплуатацию прибор AziTrak (рис. 6), который дает возможность выполнять измерения азимутального ЭМК, традиционного многозондового ЭМК и другие в режиме реального времени [Bell et al., 2006; Meyer et al., 2008; Abhurimen et al., 2012; Podberezheny et al., 2017]. Глубинность прибора составляет примерно 6 м [Meyer et al., 2008].

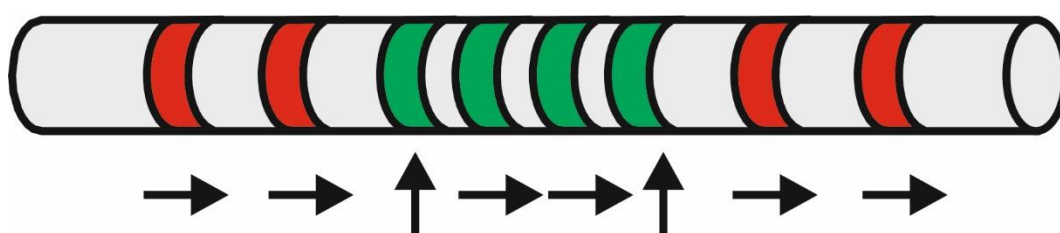


Рис. 6. Схема конфигурации прибора AziTrak, красным цветом обозначены генераторные катушки, зеленым цветом – приемные катушки, стрелками показаны ориентации катушек

Данные УЭС получают при различных положениях отклонителя (углах установки отклонителя) по мере вращения буровой колонны. Прибор AziTrak позволяет получать данные из 16 секторов, расположенных равномерно. Таким образом, центральный угол, соответствующий каждому сектору, равен 22.5° , а сумма центральных углов составляет 360° .

Аппаратура трехкомпонентного азимутального ЭМК в процессе бурения GuideWave компании Weatherford разработана в начале 2010-х гг. В ее конструкцию входят генераторные и приемные катушки, ориентированные как параллельно (в направлении z), так и перпендикулярно (в направлении x) ее оси [Shanjun et al., 2014] (рис. 7). Кроме того, катушки прибора располагаются симметрично относительно его центра. Общая длина прибора составляет около 3.9 м, рабочие частоты – 100, 400 и 2 МГц.

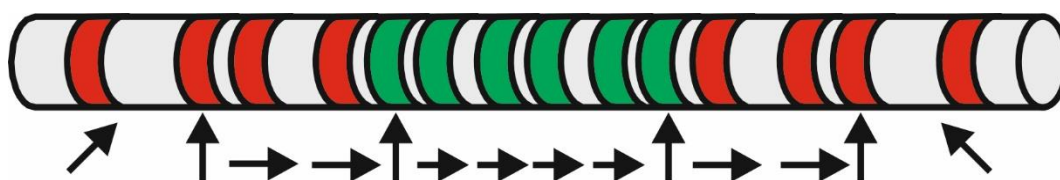


Рис. 7. Схема конфигурации прибора GuideWave, красным цветом обозначены генераторные катушки, зеленым цветом – приемные катушки, стрелками показаны ориентации катушек

Соответственно, с использованием этой аппаратуры могут быть получены три типа сигналов: ZZ – стандартные (ненаправленные) измерения УЭС, ZX – азимутальные измерения, XX – измерения с чувствительностью к анизотропии.

Разности фаз и отношения амплитуд (измерения ZZ) получают с помощью z -направленных генераторных катушек: двух генераторных и двух приемных. Эти сигналы устойчивы к влиянию температуры среды.

Сигналы ZX позволяют определить направление и расстояние до границы пласта. Для получения этих измерений применяются поперечные генераторные и соосные приемные катушки. Данные прибора в каждой точке записываются при его вращении вокруг своей оси с полным оборотом.

Для измерений компоненты XX используются генераторные и приемные катушки, ориентированные в направлении x . Как и для сигналов ZX , при этом также требуется полный оборот прибора вокруг оси z . Утверждается, что сигналы XX чувствительны к электрической анизотропии при любом наклоне пластов относительно каротажного прибора [Chen et al., 2016].

Прибор ЭМК в процессе бурения GeoSphere, представленный компанией Schlumberger в 2010-х гг., позволяет производить многокомпонентные направленные измерения за счет использования наклонных катушек. Конфигурация прибора включает в себя четыре отдельных модуля, из которых один – генераторный и три других – приемные (рис. 8). Каждый модуль содержит наклонные катушки [Duru, Denichou, 2015].

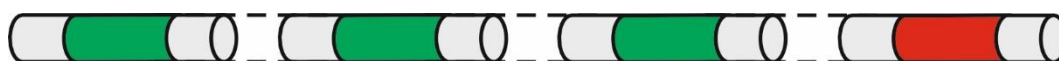


Рис. 8. Схема конфигурации прибора GeoSphere, красным цветом обозначен генераторный модуль, зеленым – приемные модули

Каждый модуль расположен внутри трубы длиной около 4 м и находится в составе КНБК, обеспечивая измерения разности фаз и отношения амплитуд на разных частотах (от нескольких единиц до примерно 100 кГц). Модульность аппаратуры обеспечивает глубинность, составляющую 30 м и более (зависящую от расстояния между источником и приемником, рабочей частоты, которые можно выбирать в соответствии с подходящими ожидаемыми УЭС среды, а также от уровня помех при измерениях, УЭС и геометрии пластов) [Seydoux et al., 2014].

Благодаря вращению аппаратуры в скважине становится доступным измерение девяти компонент электромагнитного поля, которые используются для получения четырех типов измерений разности фаз и отношения амплитуд. Первый тип соответствует симметризованному направленному измерению, которое также было доступно для прибора предыдущего поколения (PeriScope), но характеризовалось меньшей глубинностью. Остальные измерения обеспечивают дополнительную чувствительность к анизотропии пород и кажущемуся углу падения пластов.

Рассчитаны оптимальные диапазоны рабочих частот прибора в зависимости от расстояния между источником и приемником, а также от УЭС модели [Seydoux et al., 2014]. Диапазон низких частот важен при посадке скважины из проводящих глин в целевой пласт с высоким сопротивлением: в этом случае глубинность прибора уменьшается примерно до половины длины зонда из-за относительно низкого соотношения сигнал/шум и уменьшенной толщины скин-слоя. В высокоомной среде рабочие частоты от 50 кГц позволяют прослеживать границы слоев.

Измерения в полевых условиях показали, что аппаратура GeoSphere позволяет:

- осуществлять посадку скважины в целевой интервал, при этом кровля коллектора прослеживалась на расстоянии 15 м ниже прибора, мощность коллектора была оценена по данным аппаратуры до его вскрытия (бурение в Северном море);
- проводить геонавигацию скважины в верхней части коллектора на расстоянии 10–14 м от водонефтяного контакта (ВНК) и одновременно прослеживать положения кровли коллектора и ВНК (нефтегазоносный бассейн Карнарвон в западной Австралии, месторождение Римфакс в Норвегии);
- обнаруживать блоки разломов для корректировки траектории скважины (бурение в Бразилии).

Компанией Baker Hughes разработан сверхглубинный азимутальный прибор VisiTrak, включающий в себя соосные генераторную и две приемных катушки, а также поперечную генераторную катушку [Alyaeu et al., 2021] (рис. 9).

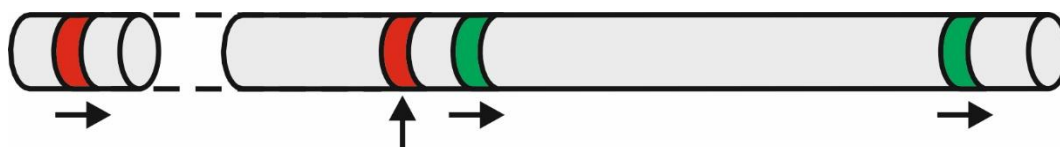


Рис. 9. Схема конфигурации прибора VisiTrak, красным цветом обозначены генераторные катушки, зеленым – приемные катушки, стрелками показаны ориентации катушек

Сигналы (реальная и мнимая часть) зонда, состоящего из поперечной генераторной и соосной приемной катушек, обладают азимутальной чувствительностью, а с помощью зонда лишь с соосными катушками возможно получение ненаправленных измерений ЭМК (разности фаз и отношения амплитуд). Кроме того, измерения проводятся на различных рабочих частотах: 20 и 50 кГц.

Глубинность прибора VisiTrak составляет десятки метров, и его данные обеспечивают возможность направленного прослеживания нескольких пластов выше и ниже траектории скважины без непосредственного вскрытия этих слоев [Hartmann et al., 2014]. Удаленное картирование границ по результатам интерпретации данных позволяет оценивать мощность слоя, в котором проходит траектория скважины, и вмещающих пластов, выдержанность коллектора, обнаружить выклинивание пласта или разломы. Проведены полевые испытания прибора с определением геоэлектрической модели среды по результатам инверсии данных из двух стволов скважины.

В конце 2010-х гг. компанией Halliburton представлен прибор трехкомпонентного сверхглубинного азимутального ЭМК EarthStar. Теоретическое моделирование и результаты полевых испытаний показали, что глубинность прибора может составлять более 60 м [Wu et al., 2018] и, подобно разработкам других компаний (в частности, GeoSphere от Schlumberger), зависит от выбранных расстояния между источником и приемником, рабочей частоты, а также свойств геологической среды (в частности, ее удельного сопротивления). Аппаратура позволяет получать направленные измерения геосигнала и удельного сопротивления.

В конфигурацию прибора входят один генераторный модуль и два приемных модуля, каждый из которых расположен внутри трубы (рис. 10).

Генераторный модуль включает в себя две катушки: одну наклонную и одну соосную прибору, каждый приемный модуль – три наклонные катушки, ориентированные под разными азимутальными углами вокруг оси прибора. Расстояние между модулями обеспечивается установкой между ними на КНБК других приборов каротажа в процессе бурения или специально предназначенных труб. Чтобы достичь

глубинности приблизительно 30 м, расстояние от генераторного до ближнего приемного модуля должно составлять примерно 15 м, а до дальнего приемного модуля – 30 м. Рабочие частоты генераторных катушек составляют 1, 2, 4, 8, 16 и 32 кГц.

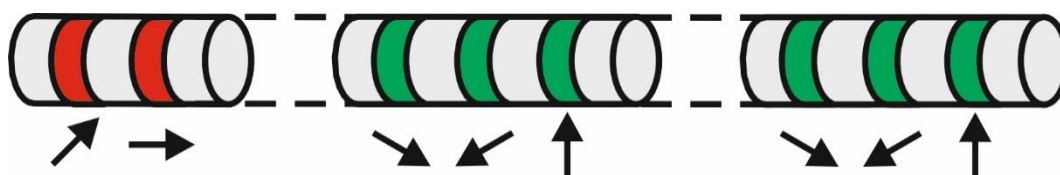


Рис. 10. Схема конфигурации прибора EarthStar, красным цветом обозначены генераторные катушки, зеленым цветом – приемные катушки, стрелками показаны ориентации катушек

В 2019 году компанией Schlumberger представлена аппаратура для опережающей геонавигации IriSphere, позволяющая исследовать породы, находящиеся перед буровым долотом. Направленные электромагнитные измерения, используемые в этой аппаратуре, обеспечивают глубинность до 30 метров впереди долота. Кроме того, прибор предоставляет возможность отличать тонкие пропластки с высоким удельным сопротивлением от целевых коллекторов [Леонтиев, 2020].

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ

Интерпретационная база отечественной аппаратуры ВИКПБ в задачах каротажа и геонавигации состоит из двух частей. Первая – это численное моделирование сигналов с оценкой их чувствительности к модельным параметрам. Вторая – численная инверсия данных с определением геоэлектрических параметров и оценкой их погрешности [Эпов и др., 2015].

При интерпретации данных ВИКПБ используется трансверсально-изотропная горизонтально-слоистая модель среды с учетом наклона прибора относительно горизонтальных границ пластов. Геоэлектрическая модель описывается вертикальным распределением удельной электропроводности [Эпов и др., 2014].

Численное моделирование включает расчет значений разностей фаз и отношений амплитуд, определяемых в трехкатушечных зондах ВИКПБ. Решение прямой задачи об электромагнитном поле произвольного гармонического источника основано на его представлении в виде суперпозиции нормального и аномального полей и преобразовании Фурье по вертикальной координате, ортогональной плоским границам.

Численная инверсия данных представляет собой минимизацию среднеквадратического отклонения измеренных данных от синтетических путем изменения модельных параметров по заданному алгоритму. Алгоритм численной инверсии основан на методе деформируемых многогранников, особенно эффективным, когда число определяемых параметров не превышает шести. Оценка погрешности определения параметров модели среды выполняется с помощью линейного анализа чувствительности.

Азимутальные приборы ЭМК обычно могут производить два типа измерений: УЭС и геосигналов. Данные разбиваются по секторам (направлениям по азимуту) и могут быть представлены в виде имиджей или отдельных графиков для нужных секторов.

Геосигнал – это средство визуализации, которое позволяет упрощать сложное измерение азимутального прибора с переводом его в простую величину для быстрой оценки [Calleja et al., 2010].

Геосигнал может быть использован для любого азимутального измерения и представляет собой нормированную разность значений измерений вокруг прибора, в основном, для противоположных секторов.

Положительное (либо отрицательное) значение геосигнала указывает на наличие границы УЭС в области чувствительности прибора, тогда как положение сектора, соответствующее этому значению, говорит о направлении приближения границы. Например, для верхнего сектора положительное значение геосигнала указывает на то, что более проводящий пласт находится сверху по отношению к прибору, тогда как отрицательная величина для верхнего сектора означает, что более проводящий пласт располагается внизу. Обычно верхний и нижний секторы рассматриваются для большей части геологических коллекторов, но правый и левый секторы очень важны при бурении в окрестности разломов.

Теоретическое моделирование также показывает, что геосигнал достигает максимума (по модулю), когда прибор находится вблизи границы УЭС и нормали к поперечным катушкам параллельны нормали к границе между пластами. Геосигнал равен нулю, когда нормали к поперечным катушкам параллельны границе между слоями.

Величина геосигнала зависит, в первую очередь, от разности электрической проводимости слоев, отделенных границей. Геосигнал является почти линейной функцией от разности проводимостей [Bell et al., 2006]. Напротив, интерпретация уровня геосигнала в смысле отношения УЭС соседних пластов менее проста, так как значение сигнала проявляет сильную нелинейность при изменении контраста УЭС. Уровень геосигнала зависит не только от контраста УЭС соседних слоев, но также и от величины УЭС горных пород.

Перед бурением может осуществляться генерация моделей УЭС, отвечающих наиболее вероятным геологическим обстановкам. Для интерпретации данных аппаратуры DeerpTrak при бурении, как правило, шесть кривых, соответствующих измерениям с различными глубинностями, передаются с забоя скважины на поверхность в реальном времени. В частности, это две кривые из системы «OnTrak»: разности фаз зонда, работающего на частоте 2 МГц, и отношения амплитуд зонда, работающего на частоте 400 кГц, а также четыре кривые, относящиеся к измерениям прибора DeerpTrak: разности фаз и отношения амплитуд зондов с рабочими частотами 20 и 50 кГц [Helgesen et al., 2005a].

Затем определяется наилучшее соответствие практических данных и одной из набора моделей, сгенерированных до бурения. Таким образом, рассчитывается высота прибора над водонефтяным контактом или расстояние до границ коллектора.

При обработке данных прибора PeriScope используется симметризация измерений («measurement symmetrization»), чтобы рассчитать отклик, чувствительный только к расстояниям до границ, контрастам УЭС и не возмущаемый эффектами анизотропии УЭС, наклона пластов. Это позволяет улучшить интерпретируемость направленных измерений [Li et al., 2005].

Симметризация измерений выполняется посредством наложения направленных измерений двух пар генераторных и приемных катушек, расположенных зеркально по отношению друг к другу. В результате получают сигнал, аналогичный по простоте поведения сигналам в изотропных пластах. Данное измерение чувствительно к кажущемуся углу падения слоев только при малых расстояниях до границ. На достаточно больших расстояниях до границ оно нечувствительно к анизотропии УЭС или углу падения пластов.

При инверсии направленных измерений аппаратуры PeriScope не предполагается наличие априорной информации о залегании пластов: утверждается, что процесс инверсии автоматизирован [Li et

al., 2005]. Инверсия может быть использована в сложных геологических обстановках, когда в области чувствительности прибора присутствуют две границы одновременно (например, сверху и снизу).

Направленные измерения прибора PeriScope позволяют определять анизотропию пластов в вертикальных скважинах при умеренных значениях коэффициента анизотропии (до 2–3), тогда как традиционные приборы в вертикальных скважинах чувствительны только к горизонтальному УЭС. В случае более высокого коэффициента анизотропии возможность его определения для прибора сокращается.

Для оценки потенциальных ограничений направленных измерений важно учитывать влияние внешних факторов. Предварительное моделирование влияния ожидаемых внешних факторов, таких как наличие переходной зоны между пластами, наклон границы в области чувствительности прибора или присутствие трещин в горных породах, помогает оценить, насколько велики такие эффекты в конкретном случае.

Для расчетов расстояния до границы ближайшего пласта и кажущегося угла падения слоев в реальном времени данные измерения УЭС азимутальной направленности могут использоваться совместно с данными гамма-имиджеров (аппаратура AziTrak) [Bell et al., 2006].

При решении прямой задачи для сигналов прибора ЭМК в процессе бурения GuideWave (в том числе в рамках инверсии данных) могут использоваться: одномерная параллельно-слоистая геоэлектрическая модель, трехмерная модель (с применением метода конечных элементов) или комплексный метод изображений (зеркальных отображений). Однако использование при расчетах одномерной параллельно-слоистой модели может быть неоправданно для некоторых случаев, например, когда траектория скважины проходит в среде с двумя непараллельными границами или пересекает плоскость разлома. Метод конечных элементов может применяться для решения прямой задачи в указанных моделях, но обычно это занимает относительно много времени. Поэтому в работе [Chen et al., 2016] предлагается использование комплексного метода изображений, который практически не уступает по точности расчету методу конечных элементов в таких моделях. В рамках комплексного метода изображений граница между пластами с различными удельными сопротивлениями заменяется фиктивным источником, аналогичным реальной генераторной катушке, но зеркально симметричным ей относительно этой границы. При этом полное поле в среде равно суперпозиции полей от реального и фиктивного источников в предположении, что геоэлектрическая граница между пластами отсутствует. Кроме того, расстояние между источником и границей при расчетах изменяется на некоторую комплексную величину, зависящую от УЭС пластов, разделенных этой границей. Недостаток комплексного метода изображений состоит в том, что дальнейшее увеличение количества границ в модели (более двух границ) усложняет использование метода.

Для данных прибора GeoSphere в целом затруднительна предварительная интерпретация по резким скачкам сигналов, свойственным для аппаратуры предыдущего поколения при пересечении прибором границы. Это объясняется чувствительностью сигналов GeoSphere одновременно к нескольким геоэлектрическим границам в силу большой глубинности, что обуславливает необходимость проведения одномерной инверсии, позволяющей определять число пластов слоистой модели, их мощности и УЭС, оценить относительный угол падения слоев и параметры анизотропии, а также направление приближения границы при геонавигации.

При оценке параметров среды применяется вероятностный подход: в результате инверсии рассчитывается набор моделей, соответствующих данным прибора. Такой набор может включать в себя

десятки тысяч различных вариантов моделей [Seydoux et al., 2014]. Кроме того, производится количественная оценка погрешностей параметров моделей и поиск наиболее подходящей модели среды.

Также по данным аппаратуры GeoSphere возможно обнаружение таких структурных форм, как разломы или несогласные залегания, с использованием двумерной инверсии [Dupuis et al., 2013].

Инверсия сигналов прибора VisiTrak основана на решении прямой задачи в рамках одномерной трансверсально-изотропной горизонтально-слоистой модели среды с учетом зенитного угла наклона прибора и угла его поворота вокруг своей оси, а также на последующей минимизации сложной целевой функции, зависящей от параметров нескольких пластов с учетом модели шумов [Hartmann et al., 2014].

Начальные модели для инверсии сигналов аппаратуры многокомпонентного ЭМК в процессе бурения EarthStar создаются на основе каротажных данных, полученных из опорных скважин, расположенных в районе, где планируется бурение эксплуатационной наклонно-горизонтальной скважины. С помощью результатов инверсии данных EarthStar, проводимой в реальном времени, начальная модель уточняется, в том числе положения границ между пластами, что особенно важно для геонавигации. Инверсия может производиться поточно в одномерной слоистой модели с определением горизонтального, вертикального УЭС трансверсально-изотропной среды, зенитного угла наклона пластов и расстояний от прибора до границ слоев [Wu et al., 2018].

Ввиду большой глубинности аппаратуры традиционный подход к инверсии путем лишь минимизации функции невязки методом Гаусса–Ньютона недостаточен из-за существования локальных минимумов и неединственности решения обратной задачи. Поэтому при инверсии используется множество случайных начальных моделей с целью исследования максимального количества локальных и глобальных минимумов. Это позволяет рассматривать модели с различным числом слоев и обеспечивает более высокую вероятность достижения глобальных, а не локальных минимумов. Каждая из указанных случайных моделей является начальной для традиционного алгоритма инверсии. С применением метода Гаусса–Ньютона итеративным образом определяется модель с наименьшей невязкой для каждой случайной модели. Предполагается, что если найдено глобальное решение, то полученная в результате инверсии модель будет независима от выбранной случайной начальной модели, то есть полученные в результате инверсии модели должны быть идентичны между собой, несмотря на то, какими были начальные модели. Такой подход дает возможность рассмотреть широкий набор постинверсионных моделей. Затем менее точные модели удаляются на основании значений невязок между фактическими и расчетными данными, а в качестве итоговых выбираются наилучшие модели с минимальными невязками, которые сшиваются между собой для различных точек измерения по скважине, формируя псевдо-2D-модели.

Однако в более сложных случаях, например, когда траектория скважины под наклоном пересекает плоскости разломов, либо присутствуют латеральные литологические, структурные неоднородности или изменения флюидонасыщения, модели, полученные в результате одномерной инверсии, могут описывать коллектор некорректно с точки зрения дальнейшей геонавигации скважины. Азимутальные измерения УЭС прибора EarthStar, вдобавок к измерениям, используемым при одномерной инверсии, дают возможность выполнения геонавигации в трехмерной среде. Имиджи, построенные по направленным измерениям, позволяют идентифицировать и проследить латеральные изменения удельного сопротивления при приближении к ним траектории скважины.

Для трехмерной инверсии направленных измерений аппаратуры EarthStar требуется разбиение модели на ячейки (дискретизация), в каждой из которых электропроводность считается постоянной.

Ячейки вокруг скважины имеют малый размер и увеличиваются с удалением от нее, что позволяет имитировать чувствительность каротажного прибора. Подобно одномерной инверсии, модель электропроводности рассчитывается посредством минимизации целевой функции. Кроме того, используется функция регуляризации, которая накладывает штраф за резкие изменения параметров в модели. Время, затрачиваемое на процесс трехмерной инверсии, составляет порядка нескольких минут [Clegg et al., 2019]. По ее результатам возможно получение распределения удельного сопротивления вокруг скважины в трехмерной модели, учитывающей латеральные изменения среды.

ВЫВОДЫ

С использованием материалов отечественной и зарубежной литературы рассмотрены важные этапы в эволюции аппаратуры электромагнитного каротажа в процессе бурения. Традиционные приборы, включающие в себя соосные генераторные и приемные катушки, активно разрабатывались примерно с 1980-х до 2000-х гг. В связи с постепенным усложнением строения коллекторов требовалось усовершенствование существовавших методов: увеличение их глубинности и обеспечение возможности проведения направленных измерений для геонавигации скважин. Поэтому начиная с 2000-х гг. ведется разработка аппаратуры электромагнитного каротажа в процессе бурения, позволяющей определять расстояние до приближающейся границы между пластами и, в отличие от приборов лишь с осесимметричными катушками, направление ее приближения.

Приведены примеры приборов, используемых ранее и в настоящее время иностранными нефтесервисными компаниями при бурении нефтяных скважин, а также одной из применяемых в России отечественных разработок. Кратко описаны алгоритмы моделирования и интерпретации данных рассмотренной аппаратуры.

Научно-исследовательские работы выполнены в рамках проекта FWZZ-2022-0026 «Инновационные аспекты электродинамики в задачах разведочной и промысловой геофизики».

ЛИТЕРАТУРА

- Аксельрод С.М.** Каротаж в процессе бурения (по материалам американских публикаций) // Каротажник. – 2001. – № 85. – С. 103–121.
- Леонтиев Д.С.** «Смотреть» впереди долота // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2020. – № 3,5 (99.5). – С. 71–73.
- Эпов М.И., Никитенко М.Н., Глинских В.Н., Сухорукова К.В.** Численное моделирование и анализ сигналов электромагнитного каротажа в процессе бурения // Каротажник. – 2014. – № 11 (245). – С. 29–42.
- Эпов М.И., Глинских В.Н., Сухорукова К.В., Никитенко М.Н., Еремин В.Н.** Численное моделирование и инверсия данных электромагнитного каротажа в процессе бурения и шаблонирования нефтегазовых скважин // Геология и геофизика. – 2015. – № 56 (8). – С. 1520–1529, doi: 10.15372/GiG20150809.
- Abhurimen T., Homburg H., Foekema N., Ibrahim C., Ogwumike J., Olare J.** 3D Extended reach drilling in soft sediments with precise wellbore // Nigeria Annual International Conference and Exhibition (August 6–8, 2012). – Lagos, Nigeria. – 2012. – Paper SPE-162942-MS, doi: 10.2118/162942-MS.
- Alyaeв S., Shahriari M., Pardo D., Omella Á.J., Larsen D.S., Jahani N., Suter E.** Modeling extra-deep electromagnetic logs using a deep neural network // Geophysics. – 2021. – Vol. 86 (3). – P. 269–281, doi: 10.1190/geo2020-0389.1.

- Beer R., Dias L.C.T., Cunha A.M.V., Coutinho M.R., Schmitt G. H., Seydoux J., Morriss C., Legendre E., Yang J., Li Q., Silva A.C., Ferraris P., Barbosa E., Guedes A.B.F.** Geosteering and/or reservoir characterization the prowess of new-generation LWD tools // SPWLA 51st Annual Logging Symposium (June 19–23, 2010). – Perth, Australia. – 2010. – Paper SPWLA-2010-93320. – 14 p.
- Bell C., Hampson J., Eadsforth P., Chemali R., Helgesen T., Meyer H., Peveto C., Poppitt A., Randall R., Signorelli J., Wang T.** Navigating and imaging in complex geology with azimuthal propagation resistivity while drilling // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (September 24–27, 2006). – San Antonio, Texas, USA. – 2006. – Paper SPE-102637-MS, doi: 10.2118/102637-MS.
- Bittar M.S., Rodney P.F., Mack S.G., Bartel R.P.** A multiple depth of investigation electromagnetic wave resistivity sensor: theory, experiment and prototype field test results // SPE Formation Evaluation. – 1993. – Vol. 8 (3). – P. 171–176, doi: 10.2118/22705-PA.
- Bittar M.S., Klein J.D., Beste R., Hu G., Wu M., Pitcher J.L., Golla C., Althoff G.D., Sitka M., Minosyan V., Paulk M.D.** A new azimuthal deep-reading resistivity tool for geosteering and advanced formation evaluation // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (October 4–7, 2009). – New Orleans, Louisiana, USA. – 2009. – Paper SPE-109971-PA, doi: 10.2118/109971-PA.
- Bonner S.D., Tabanou J.R., Wu P.T., Seydoux J.P., Moriarty K.A., Seal B.K., Kwok E.Y., Kuchenbecker M.W.** New 2-MHz multiarray borehole-compensated resistivity tool developed for MWD in slim holes // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (October 22–25, 1995). – Dallas, Texas, USA. – 1995. – Paper SPE-30547-MS, doi: 10.2118/30547-MS.
- Calleja B., Market J., Pitcher J., Bilby C.** Multi-Sensor Geosteering // SPWLA 51st Annual Logging Symposium (June 19–23, 2010). – Perth, Australia. – 2010. – Paper SPWLA-2010-82670. – 16 p.
- Chen J., Wang J., Yu Y.** An improved complex image theory for fast resistivity modeling and its application to geosteering // SPE Journal. – 2016. – Vol. 21 (04). – P. 1450–1457.
- Clark B., Lüling M. G., Jundt J., Ross M., Best D.** A dual depth resistivity measurement for formation evaluation while drilling // SPWLA 29th Annual Logging Symposium. San Antonio (June 5–8, 1988). – San Antonio, Texas, USA. – 1988. – Paper SPWLA-1988-A. – 25 p.
- Clegg N., Parker T., Djefel B., Monteilhet L., Marchant D.** The final piece of the puzzle: 3-D Inversion of Ultra-Deep Azimuthal Resistivity LWD data // SPWLA 60th Annual Logging Symposium (June 15–19, 2019). – The Woodlands, Texas, USA. – 2019. – Paper SPWLA-2019-HHH. – 10 p.
- Dupuis C., Denichou J.-M.** Automatic inversion of deep-directional-resistivity measurements for well placement and reservoir description // The Leading Edge. – 2015. – Vol. 34 (5). – P. 504–512, doi: 10.1190/tle34050504.1.
- Dupuis C., Omeragic D., Chen Y.-H., Habashy T.** Workflow to image unconformities with deep electromagnetic LWD measurements enables well placement in complex scenarios // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (September 30–October 2, 2013). – New Orleans, Louisiana, USA. – 2013. – Paper SPE-166117-MS, doi: 10.2118/166117-MS.
- Fredericks P.D., Hearn F.P., Wisler M.M.** Formation evaluation while drilling with a dual propagation resistivity tool // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (October 8–11, 1989). – San Antonio, Texas, USA. – 1989. – Paper SPE-19622-MS, doi: 10.2118/SPE-19622-MS.
- Gianzero S., Merchant G.A., Haugland M., Strickland R.W.** New developments in 2 MHz electromagnetic wave resistivity measurements // SPWLA 35th Annual Logging Symposium (June 19–22, 1994). – Tulsa, Oklahoma, USA. – 1994. – Paper SPWLA-1994-MM. – 25 p.

- Gravley W.** Review of downhole measurement-while-drilling systems // *Journal of Petroleum Technology*. – 1983. – Vol. 35 (8). – P. 1439–1445, doi: 10.2118/10036-PA.
- Hartmann A., Vianna A., Maurer H.M., Sviridov M., Martakov S., Lautenschläger U., Antonsen F., Olsen P.A.; Constable M.V.** Verification testing of a new extra-deep azimuthal resistivity measurement // *SPWLA 55th Annual Logging Symposium* (May 18–22, 2014). – Abu Dhabi, United Arab Emirates. – 2014. – Paper SPWLA-2014-MM. – 12 p.
- Helgesen T.B., Fulda C., Meyer W.H., Thorsen A.K., Baule A., Iversen M., Rønning K.J.** Reservoir navigation with an extra deep resistivity LWD service // *SPWLA 46th Annual Logging Symposium* (June 26–29, 2005). – New Orleans, Louisiana, USA. – 2005a. – Paper SPWLA-2005-I. – 13 p.
- Helgesen T.B., Meyer W.H., Thorsen A.K., Baule A., Fulda C., Ronning K.J., Iversen M.** Accurate wellbore placement using a novel extra deep resistivity service // *SPE Europec/EAGE Annual Conference* (June 13–16, 2005). – Madrid, Spain. – 2005b. – Paper SPE-94378-MS, doi: 10.2118/94378-MS.
- Iversen M., Fejerskov M., Skjerdingsstad A.-L., Clark A.J., Denichou J.M., Ortenzi L., Seydoux J., Tabanou J.R.** Geosteering using ultradeep resistivity on the Grane field, Norwegian North Sea // *SPWLA 44th Annual Logging Symposium* (June 22–25, 2003). – Galveston, Texas, USA. – 2003. – Paper SPWLA-2004-v45n3a1. – 13 p.
- Jan Y.-M., Campbell, Jr. R.L.** Borehole correction of MWD gamma ray and resistivity logs // *SPWLA 25th Annual Logging Symposium* (June 10–13, 1984). – New Orleans, Louisiana, USA. – 1984. – Paper SPWLA-1984-PP. – 20 p.
- Li Q., Omeragic D., Chou L., Yang L., Duong K., Smits J., Yang J., Lau T., Liu C., Dworak R., Dreuillault V., Ye H.** New directional electromagnetic tool for proactive geosteering and accurate formation evaluation while drilling // *SPWLA 46th Annual Logging Symposium* (June 26–29, 2005). – New Orleans, Louisiana, USA. – 2005. – Paper SPWLA-2005-UU. – 16 p.
- Meyer W.H., Thompson L.W., Wisler M.M., Wu J.-Q.** A New slimhole multiple propagation resistivity tool // *SPWLA 35th Annual Logging Symposium* (June 19–22, 1994). – Tulsa, Oklahoma, USA. – 1994. – Paper SPWLA-1994-NN. – 22 p.
- Meyer W.H., Hart E., Jensen K.** Geosteering with a combination of extra deep and azimuthal resistivity tools // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition* (September 21–24, 2008). – Denver, Colorado, USA. – 2008. – Paper SPE-115675-MS, doi: 10.2118/115675-MS.
- Oberkircher J., Steinberger G., Robbins B.** Applications for a multiple depth of investigation MWD resistivity measurement device // *SPWLA 34th Annual Logging Symposium* (June 13–16, 1993). – Calgary, Alberta, Canada. – 1993. – Paper SPWLA-1993-OO. – 18 p.
- Patton B.J., Gravley W., Godbey J.K., Sexton J.H., Hawk D.E., Slover V.R., Harrell J.W.** Development and successful testing of a continuous-wave, logging-while-drilling telemetry system // *Journal of Petroleum Technology*. – 1977. – Vol. 29 (10). – P. 1215–1221, doi: 10.2118/6157-PA.
- Podbereznyy M., Polushkin S., Makarov A.** Novel approach for evaluation of petrophysical parameters from time-lapse induction logging-while-drilling measurements in deviated and horizontal wells // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition* (October 16–18, 2017). – Moscow, Russia. – 2017. – Paper SPE-187911-MS, doi: 10.2118/187911-MS.
- Rodney P.F., Wisler M.M.** Electromagnetic wave resistivity MWD tool // *SPE Drilling Engineering*. – 1986. – Vol. 1 (5). – P. 337–346, doi: 10.2118/12167-PA.

- Seydoux J., Legendre E., Mirto E., Dupuis C., Denichou J.M., Bennett N., Kutiev G., Kuchenbecker M., Morriss C., Yang L.** Full 3D deep directional resistivity measurements optimize well placement and provide reservoir-scale imaging while drilling // SPWLA 55th Annual Logging Symposium (May 18–22, 2014). – Abu Dhabi, United Arab Emirates. – 2014. – Paper SPWLA-2014-LLLL. – 14 p.
- Shanjun L., Jiefu C., Binford T.L.** Using new LWD measurements to evaluate formation resistivity anisotropy at any dip angle // SPWLA 55th Annual Logging Symposium (May 18–22, 2014). – Abu Dhabi, United Arab Emirates. – 2014. – Paper SPWLA-2014-EEEE. – 16 p.
- Tanguy D.R., Zoeller W.A.** Applications Of Measurements While Drilling // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (October 4–7, 1981). – San Antonio, Texas, USA. – 1981. – Paper SPE-10324-MS, doi: 10.2118/10324-MS.
- Tilsley-Baker R., Antonov Y., Martakov S., Maurer H.-M., Mosin A., Sviridov M., Klein K.S., Iversen M., Barbosa J.E., Carneiro G.** Extra-deep resistivity experience in Brazil geosteering operations // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (September 30–October 2, 2013). – New Orleans, Louisiana, USA. – 2013. – Paper SPE-166309-MS, doi: 10.2118/166309-MS.
- Wisler M.M., Thompson L.W., Larscheid A., Signorelli J.A., Pope M., Wright S.M.** New 3 1/8 inch diameter propagation resistivity tool for MWD; small size but no accuracy compromise // SPWLA 39th Annual Logging Symposium (May 26–28, 1998). – Keystone, Colorado, USA. – 1998. – Paper SPWLA-1998-T. – 13 p.
- Wu H.-H., Golla C., Parker T., Clegg N., Monteilhet L.** A new ultra-deep azimuthal electromagnetic LWD sensor for reservoir insight // SPWLA 59th Annual Logging Symposium (June 2–6, 2018). – London, UK. – 2018. – Paper SPWLA-2018-X. – 14 p.
- Zhang Z., Gonguet C., Rajani V., Roeterdink R.** Directional LWD resistivity tools and their business impacts // SPWLA 49th Annual Logging Symposium (May 25–28, 2008). – Austin, Texas, USA. – 2008. – Paper SPWLA-2008-FFFF. – 16 p.

REFERENCES

- Abhurimen T., Homburg H., Foekema N., Ibrahim C., Ogwumike J., Olare J.** 3D extended reach drilling in soft sediments with precise wellbore // Nigeria Annual International Conference and Exhibition (August 6–8, 2012). – Lagos, Nigeria. – 2012. – Paper SPE-162942-MS, doi: 10.2118/162942-MS.
- Akselrod S.M.** Logging while drilling (synopsis of published evidence from the USA) // *Karotazhnik*. – 2001. – Vol. 85. – P. 103–121.
- Alyae S., Shahriari M., Pardo D., Omella Á.J., Larsen D.S., Jahani N., Suter E.** Modeling extra-deep electromagnetic logs using a deep neural network // *Geophysics*. – 2021. – Vol. 86 (3). – P. 269–281, doi: 10.1190/geo2020-0389.1.
- Beer R., Dias L.C.T., Cunha A.M.V., Coutinho M.R., Schmitt G. H., Seydoux J., Morriss C., Legendre E., Yang J., Li Q., Silva A.C., Ferraris P., Barbosa E., Guedes A.B.F.** Geosteering and/or reservoir characterization the prowess of new-generation LWD tools // SPWLA 51st Annual Logging Symposium (June 19–23, 2010). – Perth, Australia. – 2010. – Paper SPWLA-2010-93320. – 14 p.
- Bell C., Hampson J., Eadsforth P., Chemali R., Helgesen T., Meyer H., Peveto C., Poppitt A., Randall R., Signorelli J., Wang T.** Navigating and imaging in complex geology with azimuthal propagation resistivity while drilling // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (September 24–27, 2006). – San Antonio, Texas, USA. – 2006. – Paper SPE-102637-MS, doi: 10.2118/102637-MS.

- Bittar M.S., Rodney P.F., Mack S.G., Bartel R.P.** A multiple depth of investigation electromagnetic wave resistivity sensor: theory, experiment and prototype field test results // SPE Formation Evaluation. – 1993. – Vol. 8 (3). – P. 171–176, doi: 10.2118/22705-PA.
- Bittar M.S., Klein J.D., Beste R., Hu G., Wu M., Pitcher J.L., Golla C., Althoff G.D., Sitka M., Minosyan V., Paulk M.D.** A new azimuthal deep-reading resistivity tool for geosteering and advanced formation evaluation // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (October 4–7, 2009). – New Orleans, Louisiana, USA. – 2009. – Paper SPE-109971-PA, doi: 10.2118/109971-PA.
- Bonner S.D., Tabanou J.R., Wu P.T., Seydoux J.P., Moriarty K.A., Seal B.K., Kwok E.Y., Kuchenbecker M.W.** New 2-MHz multiarray borehole-compensated resistivity tool developed for MWD in slim holes // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (October 22–25, 1995). – Dallas, Texas, USA. – 1995. – Paper SPE-30547-MS, doi: 10.2118/30547-MS.
- Calleja B., Market J., Pitcher J., Bilby C.** Multi-Sensor Geosteering // SPWLA 51st Annual Logging Symposium (June 19–23, 2010). – Perth, Australia. – 2010. – Paper SPWLA-2010-82670. – 16 p.
- Chen J., Wang J., Yu Y.** An improved complex image theory for fast resistivity modeling and its application to geosteering // SPE Journal. – 2016. – Vol. 21 (04). – P. 1450–1457.
- Clark B., Lüling M. G., Jundt J., Ross M., Best D.** A dual depth resistivity measurement for formation evaluation while drilling // SPWLA 29th Annual Logging Symposium. San Antonio (June 5–8, 1988). – San Antonio, Texas, USA. – 1988. – Paper SPWLA-1988-A. – 25 p.
- Clegg N., Parker T., Djefel B., Monteilhet L., Marchant D.** The final piece of the puzzle: 3-D Inversion of Ultra-Deep Azimuthal Resistivity LWD data // SPWLA 60th Annual Logging Symposium (June 15–19, 2019). – The Woodlands, Texas, USA. – 2019. – Paper SPWLA-2019-HHH. – 10 p.
- Dupuis C., Denichou J.-M.** Automatic inversion of deep-directional-resistivity measurements for well placement and reservoir description // The Leading Edge. – 2015. – Vol. 34 (5). – P. 504–512, doi: 10.1190/tle34050504.1.
- Dupuis C., Omeragic D., Chen Y.-H., Habashy T.** Workflow to image unconformities with deep electromagnetic LWD measurements enables well placement in complex scenarios // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (September 30–October 2, 2013). – New Orleans, Louisiana, USA. – 2013. – Paper SPE-166117-MS, doi: 10.2118/166117-MS.
- Epov M.I., Glinskikh V.N., Sukhorukova K.V., Nikitenko M.N., Eremin V.N.** Forward modeling and inversion of LWD induction data // Russian Geology and Geophysics. – 2015. – Vol. 56 (8). – P. 1194–1200, doi: 10.1016/j.rgg.2015.07.009.
- Epov M.I., Nikitenko M.N., Glinskikh V.N., Sukhorukova K.V.** Numerical simulation and analysis of electromagnetic log responses while drilling // Karotazhnik. – 2014. – Vol. 11 (245). – P. 29–42.
- Fredericks P.D., Hearn F.P., Wisler M.M.** Formation evaluation while drilling with a dual propagation resistivity tool // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (October 8–11, 1989). – San Antonio, Texas, USA. – 1989. – Paper SPE-19622-MS, doi: 10.2118/SPE-19622-MS.
- Gianzero S., Merchant G.A., Haugland M., Strickland R.W.** New developments in 2 MHz electromagnetic wave resistivity measurements // SPWLA 35th Annual Logging Symposium (June 19–22, 1994). – Tulsa, Oklahoma, USA. – 1994. – Paper SPWLA-1994-MM. – 25 p.
- Gravley W.** Review of downhole measurement-while-drilling systems // Journal of Petroleum Technology. – 1983. – Vol. 35 (8). – P. 1439–1445, doi: 10.2118/10036-PA.
- Hartmann A., Vianna A., Maurer H.M., Sviridov M., Martakov S., Lautenschläger U., Antonsen F., Olsen P.A.; Constable M.V.** Verification testing of a new extra-deep azimuthal resistivity measurement // SPWLA 55th

Annual Logging Symposium (May 18–22, 2014). – Abu Dhabi, United Arab Emirates. – 2014. – Paper SPWLA-2014-MM. – 12 p.

Helgesen T.B., Fulda C., Meyer W.H., Thorsen A.K., Baule A., Iversen M., Rønning K.J. Reservoir navigation with an extra deep resistivity LWD service // SPWLA 46th Annual Logging Symposium (June 26–29, 2005). – New Orleans, Louisiana, USA. – 2005a. – Paper SPWLA-2005-I. – 13 p.

Helgesen T.B., Meyer W.H., Thorsen A.K., Baule A., Fulda C., Ronning K.J., Iversen M. Accurate wellbore placement using a novel extra deep resistivity service // SPE Europec/EAGE Annual Conference (June 13–16, 2005). – Madrid, Spain. – 2005b. – Paper SPE-94378-MS, doi: 10.2118/94378-MS.

Iversen M., Fejerskov M., Skjerdingsstad A.-L., Clark A.J., Denichou J.M., Ortenzi L., Seydoux J., Tabanou J.R. Geosteering using ultradeep resistivity on the Grane field, Norwegian North Sea // SPWLA 44th Annual Logging Symposium (June 22–25, 2003). – Galveston, Texas, USA. – 2003. – Paper SPWLA-2004-v45n3a1. – 13 p.

Jan Y.-M., Campbell, Jr. R.L. Borehole correction of MWD gamma ray and resistivity logs // SPWLA 25th Annual Logging Symposium (June 10–13, 1984). – New Orleans, Louisiana, USA. – 1984. – Paper SPWLA-1984-PP. – 20 p.

Leontiev D.S. “Look” ahead of the bit // *Neftegaz. RU.* – 2020. – No. 3,5 (99.5). – P. 71–73.

Li Q., Omeragic D., Chou L., Yang L., Duong K., Smits J., Yang J., Lau T., Liu C., Dworak R., Dreuillault V., Ye H. New directional electromagnetic tool for proactive geosteering and accurate formation evaluation while drilling // SPWLA 46th Annual Logging Symposium (June 26–29, 2005). – New Orleans, Louisiana, USA. – 2005. – Paper SPWLA-2005-UU. – 16 p.

Meyer W.H., Thompson L.W., Wisler M.M., Wu J.-Q. A New slimhole multiple propagation resistivity tool // SPWLA 35th Annual Logging Symposium (June 19–22, 1994). – Tulsa, Oklahoma, USA. – 1994. – Paper SPWLA-1994-NN. – 22 p.

Meyer W.H., Hart E., Jensen K. Geosteering with a combination of extra deep and azimuthal resistivity tools // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (September 21–24, 2008). – Denver, Colorado, USA. – 2008. – Paper SPE-115675-MS, doi: 10.2118/115675-MS.

Oberkircher J., Steinberger G., Robbins B. Applications for a multiple depth of investigation MWD resistivity measurement device // SPWLA 34th Annual Logging Symposium (June 13–16, 1993). – Calgary, Alberta, Canada. – 1993. – Paper SPWLA-1993-OO. – 18 p.

Patton B.J., Gravley W., Godbey J.K., Sexton J.H., Hawk D.E., Slover V.R., Harrell J.W. Development and successful testing of a continuous-wave, logging-while-drilling telemetry system // *Journal of Petroleum Technology.* – 1977. – Vol. 29 (10). – P. 1215–1221, doi: 10.2118/6157-PA.

Podbereznyy M., Polushkin S., Makarov A. Novel approach for evaluation of petrophysical parameters from time-lapse induction logging-while-drilling measurements in deviated and horizontal wells // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (October 16–18, 2017). – Moscow, Russia. – 2017. – Paper SPE-187911-MS, doi: 10.2118/187911-MS.

Rodney P.F., Wisler M.M. Electromagnetic wave resistivity MWD tool // *SPE Drilling Engineering.* – 1986. – Vol. 1 (5). – P. 337–346, doi: 10.2118/12167-PA.

Seydoux J., Legendre E., Mirto E., Dupuis C., Denichou J.M., Bennett N., Kutiev G., Kuchenbecker M., Morriss C., Yang L. Full 3D deep directional resistivity measurements optimize well placement and provide reservoir-scale imaging while drilling // SPWLA 55th Annual Logging Symposium (May 18–22, 2014). – Abu Dhabi, United Arab Emirates. – 2014. – Paper SPWLA-2014-LLLL. – 14 p.

Shanjun L., Jiefu C., Binford T.L. Using new LWD measurements to evaluate formation resistivity anisotropy at any dip angle // SPWLA 55th Annual Logging Symposium (May 18–22, 2014). – Abu Dhabi, United Arab Emirates. – 2014. – Paper SPWLA-2014-EEEE. – 16 p.

Tanguy D.R., Zoeller W.A. Applications Of Measurements While Drilling // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (October 4–7, 1981). – San Antonio, Texas, USA. – 1981. – Paper SPE-10324-MS, doi: 10.2118/10324-MS.

Tilsley-Baker R., Antonov Y., Martakov S., Maurer H.-M., Mosin A., Sviridov M., Klein K.S., Iversen M., Barbosa J.E., Carneiro G. Extra-deep resistivity experience in Brazil geosteering operations // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (September 30–October 2, 2013). – New Orleans, Louisiana, USA. – 2013. – Paper SPE-166309-MS, doi: 10.2118/166309-MS.

Wisler M.M., Thompson L.W., Larscheid A., Signorelli J.A., Pope M., Wright S.M. New 3 1/8 inch diameter propagation resistivity tool for MWD; small size but no accuracy compromise // SPWLA 39th Annual Logging Symposium (May 26–28, 1998). – Keystone, Colorado, USA. – 1998. – Paper SPWLA-1998-T. – 13 p.

Wu H.-H., Golla C., Parker T., Clegg N., Monteilhet L. A new ultra-deep azimuthal electromagnetic LWD sensor for reservoir insight // SPWLA 59th Annual Logging Symposium (June 2–6, 2018). – London, UK. – 2018. – Paper SPWLA-2018-X. – 14 p.

Zhang Z., Gonguet C., Rajani V., Roeterdink R. Directional LWD resistivity tools and their business impacts // SPWLA 49th Annual Logging Symposium (May 25–28, 2008). – Austin, Texas, USA. – 2008. – Paper SPWLA-2008-FFFF. – 16 p.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ДАНИЛОВСКИЙ Кирилл Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: геофизические методы исследований в скважинах, каротаж в процессе бурения, обработка и интерпретация данных ГИС, моделирование и инверсия данных электрокаротажа, машинное обучение, искусственные нейронные сети.

МОСКАЕВ Илья Алексеевич – младший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Область научных интересов: численное моделирование сигналов электромагнитного и электрического каротажа.