Геофизические технологии, № 3, 2023, с. 17–35 **www.rjgt.ru**
doi: 10.18303/2619-1563-2023-3-17 УДК 550.832

ВЛИЯНИЕ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА НА СИГНАЛЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИБОРАМИ LWD И ВЭМКЗ (РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПО НЕКОТОРЫМ ПУБЛИКАЦИЯМ)

К.В. Сухорукова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,
e-mail: suhorukkv@gmail.com

При бурении пластовые флюиды оттесняются вглубь пласта. Вследствие этого изменяются электрические свойства вблизи скважины. Для определения УЭС неизмененной при бурении удаленной от скважины части применяются методы зондирования. Среди этих методов электромагнитный каротаж характеризуется наилучшим пространственным разрешением. Однако при анализе практических данных часто наблюдаются "неправильные" соотношения сигналов зондов разной длины, в том числе показывающие проникновение в заведомо непроницаемых отложениях. Одной из причин может быть влияние смещения прибора с оси симметрии среды. В работе рассматриваются результаты численного моделирования сигналов смещенных зондов приборов LWD и ВЭМКЗ в некоторых моделях.

Электромагнитный каротаж, зондирование, влияние эксцентриситета прибора, результаты численного моделирования, прибор LWD, прибор ВЭМКЗ

EFFECT OF ECCENTRICITY ON ELECTROMAGNETIC LOGGING SIGNALS WITH LWD AND VEMKZ INSTRUMENTS (NUMERICAL SIMULATION RESULTS FROM SOME PUBLICATIONS)

K.V. Sukhorukova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: suhorukkv@gmail.com

During drilling, formation fluids are pushed aside by mud filtrate. As a result, the electrophysical properties of rocks near the borehole wall change. Sounding methods are used to determine the resistivity of the part of the reservoir that is remote from the well and unchanged during drilling. Among these methods, electromagnetic logging has the best spatial resolution. However, when analyzing the practical data of electromagnetic sounding, "wrong" ratios of signals from probes of different lengths are often observed, including those showing penetration in impermeable rocks. One of the reasons may be the influence of the shift of the device from the axis of symmetry of the medium. The paper considers the results of numerical simulation of signals from decentralized probes of LWD and VEMKZ instruments in some models.

Electromagnetic logging, sounding, influence of probe eccentricity, results of numerical simulation, LWD equipment, VEMKZ equipment

ВВЕДЕНИЕ

В методиках количественной интерпретации данных скважинной электрометрии, основанной на решении прямых и обратных задач, как правило, предполагается, что зонд соосен скважине, которая

© К.В. Сухорукова, 2023

представляет собой цилиндр с ровными стенками, заполненный буровым раствором. Однако, за исключением некоторых современных и сильно чувствительных к смещению с оси скважины приборов, условие соосности чаще всего не выполняется вследствие произвольного положения электрокаротажных зондов в скважине из-за отсутствия центраторов.

Чаще всего при конструировании приборов электрокаротажа стараются избегать непосредственного контакта электродов со стенкой скважины, например, за счет утолщений по сторонам электродов градиент-зондов в приборе бокового каротажного зондирования. Для приборов индукционного каротажа расстояние до стенки определяется диаметром корпуса. Также логично предположить, что довольно длинный прибор не прилегает по всей своей длине к стенке скважины, а занимает некое промежуточное между осевым и максимально сдвинутым положение, а с учетом наклона даже вертикальной скважины оказывается немного наклонным к ее оси. В последнем случае прибор касается стенки скважины своим концом, а его средняя часть с наиболее короткими зондами располагается ближе к оси. Тем не менее, вопрос влияния нецентрального положения зондов имеет практическое значение, поскольку полное исключение сдвига прибора с оси скважины не является обоснованным.

При введении эксцентриситета зонда увеличивается сложность численного моделирования сигнала. Поскольку трехмерные прямые задачи весьма ресурсоемки, практически применимым для количественной интерпретации сейчас может быть только подход в классе двумерных осесимметричных моделей. В этом случае необходимо хорошо представлять, к каким последствиям может приводить неучет влияния эксцентриситета на практические сигналы, или корректировать сигналы одних зондов и обоснованно пренебрегать этим влиянием для других. По этой причине задача влияния эксцентриситета зондов электрокаротажа рассматривается в статьях разных авторов для разных приборов.

При средних значениях УЭС раствора в скважине и окружающих пород (1–2 и 4–30 Ом·м) и типичных диаметров скважин для большинства методов выполняется с практической точностью предположение об отсутствии влияния эксцентриситета, например, для нормальных зондов и градиент-зондов постоянного тока [Gianzero, Rau, 1977; Чаадаев, 1991]. В случае большого электрического контраста отмечается также необходимость учета вытеснения части раствора корпусом прибора, например, при измерениях в гранитах с большими значениями УЭС [Thunehed, Olsson, 2004].

Влияние на сигналы смещения приборов с оси скважины и неровности ее стенки становится значительным, во-первых, при использовании фокусирующих схем, во-вторых, при повышении частоты электромагнитного поля, в-третьих, при малом отношении диаметра прибора к диаметру скважины и высоком контрасте УЭС раствора в скважине и окружающей породы. В таких случаях эксцентриситет обычно учитывается при моделировании сигналов, а алгоритмы коррекции его влияния совместно с влиянием скважины с раствором встраиваются в системы обработки сигналов. Такие подходы приводятся в статьях, посвященных анализу и интерпретации сигналов фокусированных зондов постоянного тока сферически сфокусированного зонда БК (SFL-зонд [Gianzero, Rau, 1977] или индукционных зондов с коаксиальными генераторными и приемными катушками в приборах AIT [Gianzero, 1978; Minerbo, Miles, 1991; Barber et al., 1999].

Много сложнее оказывается случай многокомпонентного индукционного прибора с набором генераторных и приемных катушек, моменты которых ориентированы как коллинеарно, так и перпендикулярно оси прибора [Sun et al., 2008; Hou et al., 2013] и многих других. Смещение прибора с оси скважины приводит к изменениям сигнала зондов, включающих катушки с перпендикулярными оси прибора моментами, многократно превышающим полезный сигнал, показано в статьях сотрудников фирм

Schlumberger, Baker Hughes, Halliburton [Rosthal et al., 2003a; Rabinovich et al., 2014; Hou et al., 2013]. Решение проблемы влияния эксцентриситета здесь оказывается конструктивным: во всех случаях эффект уменьшается добавлением в прибор проводящих элементов, корпуса или внутреннего проводника, замкнутого на буровой раствор специальной системой электродов, что позволяет избавиться от токов, возникающих в скважине в результате асимметрии положения зонда в скважине. Такие решения как описаны в статьях [Li et al., 2005; Hou, Bittar, 2010] и др., так и защищены патентами [Rosthal et al., 2003b; Omeragic, 2003; Чен, Ванг, 2009; Rabinovich et al., 2014; и др.]

Как правило, в способах численной коррекции влияние эксцентриситета рассчитывается в модели "скважина – пласт" при максимальном смещении зонда, и на основе этих расчетов проводится коррекция измеренных сигналов. Для вычислений применяются как аналитические подходы, например, в работах [Gianzero, Rau, 1977; Sun et al., 2008; Nikitenko et al., 2016; Kaufman, Itskovich, 2017; и др.], так и методы конечных элементов и конечных разностей [Anderson et al., 1997; Liu, 1993; и др.].

Отдельные серии расчетов методом конечных разностей в усложненных моделях приводятся в статьях [Hue et al., 2005; Lee et al., 2012]. Авторы анализируют сигналы 2-МГц зонда аппаратуры LWD в вертикальной и наклонной скважинах, пересекающих изотропный и анизотропный пласт в изотропных вмещающих полупространствах в случае осесимметричного и смещенных положений зонда и показывают изменение уровней разности фаз и отношения амплитуд с увеличением смещения зонда от оси, а также усиление влияния на эти характеристики поляризации границ при увеличении угла наклона скважины и смещения от оси зонда в скважине с УЭС раствора 2000 Ом·м.

В статье [Liu, 1993] приведены результаты расчетов влияния смещения с оси скважины зонда в дипольном приближении комбинацией конечно-разностного метода и метода разложения по собственным модам в пятислойной модели со скважиной. Частота поля двухкатушечного зонда 50 МГц, длина 0.254 м. Влияние скважины в осесимметричном случае приводит к сглаживанию, смещение на стенку – к более резкой форме диаграмм и изменению их уровня. Для учета этого влияния вначале проводится коррекция влияния скважины и эксцентриситета, а потом – влияния вмещающих, несмотря на то, что влияние надо учитывать совместно, особенно в области пересечения границ.

Следует отметить, что все авторы, предлагая различные модификации способа коррекции, отмечают сложность выбора параметров расчетной модели для оценки влияния эксцентриситета. Обычно с хорошей точностью известны значения УЭС раствора в скважине, но для более точного учета всех параметров требуется знать диаметр скважины, состояние ее стенки, положение зонда относительно стенки скважины и ее неровностей, а также УЭС измененной породы на контакте с буровым раствором. Идеальным является использование центраторов или, для поперечных датчиков, прижим прибора к стенке скважины. Однако такая фиксация положения приборов ведет к усложнению проведения каротажа во многих практических ситуациях. Когда прибор не фиксирован, он может как лежать на стенке скважины, так и быть расположен соосно с ней или наклонно, что уменьшает эксцентриситет зондов. Неопределенность в смещении заставляет или использовать сигналы такими, как они измерены, или проводить коррекцию влияния максимального эксцентриситета по всему интервалу скважины.

ВЛИЯНИЕ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА НА СИГНАЛЫ ЗОНДА 2 МГЦ КАРОТАЖНОГО ПРИБОРА LWD

Во всех указанных выше публикациях рассматриваются в основном сигналы зондов ИК, работающих на традиционно низких частотах индукционного каротажа (50, 100, 400 кГц). Влияние эксцентриситета становится более значимым на более высоких частотах, например, при измерении

разности фаз (и в меньшей степени – отношения амплитуд) зондами высокочастотного электромагнитного каротажа (ВЭМКЗ, ВИКИЗ) на частотах 14, 7 и 3.5 МГц. В публикациях с описанием зарубежных приборов влияние эксцентриситета рассматривается для каротажа во время бурения (LWD), зонды в котором работают на частотах 400 кГц и 2 МГц.

Самая высокая частота в аппаратуре LWD – 2 МГц. Для этой частоты при измерении трехкатушечным зондом в статье [Hue et al., 2005] приводятся результаты расчетов разности фаз и отношения амплитуд конечно-разностным способом во временной области (FDTD). В модели не учитывается диэлектрическая проницаемость, зонд состоит из одной генераторной и двух приемных катушек, размещенных на металлической трубе. Изменение сигналов в зависимости от смещения зонда с оси скважины рассчитывается в сильно контрастной модели. Радиус металлической трубы 4 дюйма (0.102 м), радиус катушек 4.5 дюйма (0.114 м), радиус скважины 12 дюймов (0.305 м), расстояние между генераторной и приемными катушками 24 и 30 дюймов (0.610 и 0.762 м). В таких условиях эксцентриситет зонда сильно влияет на измеряемые сигналы.

В первом случае удельная электропроводность раствора на нефтяной основе составляет 0.0005 См/м (УЭС 2000 Ом·м), а пласта – 10 См/м (0.1 Ом·м). Разность фаз (рис. 1, *а*, вверху), равная 30° при осевом положении зонда, снижается до ≈ –23° уже при смещении зонда с оси скважины на 1.5–2 дюйма (0.03–0.05 м) и медленно возрастает по мере дальнейшего смещения до ≈7° при максимально возможном смещении (на 7 дюймов или на 0.178 м). Отношение амплитуд (рис. 1, *а*, внизу) равно 6.5 при осевом положении, повышается до ≈7 при смещении 0.5–1 дюйм (0.012–0.025 м) и снижается до 2.1–2.2 при смещении больше 3.5 дюймов (0.089 м), далее не изменяясь.

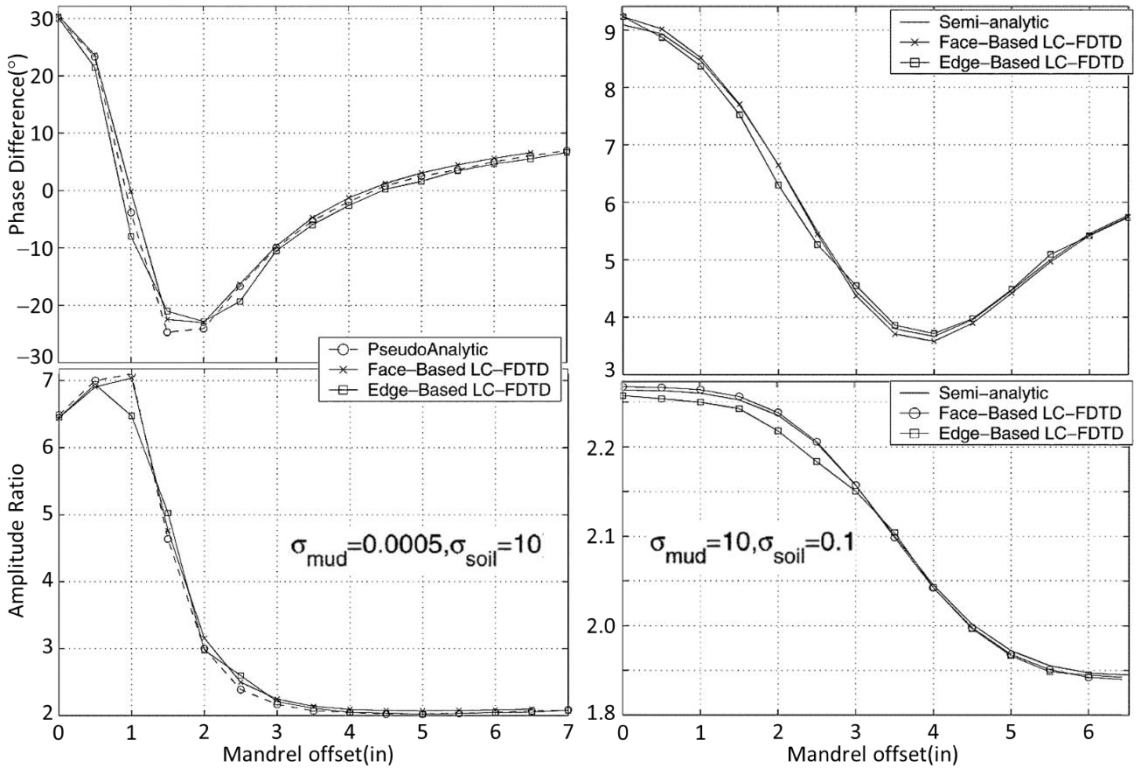

Рис. 1. Разность фаз (phase difference) и отношение амплитуд (amplitude ratio) для зонда LWD (2 МГц) в зависимости от смещения с оси скважины (рис. 9 и 10 из статьи [Hue et al., 2005]), заполненной изолирующим буровым раствором (слева) и проводящим буровым раствором (справа). По оси абсцисс отложено расстояние между осями прибора и скважины (смещение) в дюймах, по оси ординат – разность фаз в градусах (вверху) и безразмерное отношение амплитуд (внизу)

Во второй модели взят электропроводящий буровой раствор. Электропроводность раствора 10 См/м, пласта 0.1 См/м (0.1 и 10 Ом·м соответственно). В этой модели эксцентриситет влияет на сигналы в существенно меньшей степени. Разность фаз (рис. 1, *б*, вверху) от 9.3° на оси плавно снижается до 3.7° при смещении на 4 дюйма (0.100 м) и также плавно поднимается до 5.7° при смещении на 6.5 дюймов (0.165 м) без выхода на постоянное значение. Отношение амплитуд (рис. 1, *б*, внизу) почти одинаково при небольших смещениях (2.25–2.27 при смещении до 1.5 дюймов или 0.037 м) и при больших (около 1.95 при смещении больше, чем на 5.5 дюймов или 0.014 м). Между указанными значениями смещения сигнал изменяется плавно.

Также в статье [Hue et al., 2005] приведены результаты расчетов в модели с изменяющимся радиусом скважины, при УЭС раствора и пласта 0.1 и 1000 Ом·м и при радиусах скважины от 0.12 до 0.23 м. Сигналы на оси и при смещении на стенку скважины остаются практически одинаковыми при небольших радиусах – до 5.5 дюймов, то есть при сравнимых радиусах катушек прибора (0.114 м) и скважины (от 0.127 до 0.140 м). Однако при дальнейшем увеличении радиуса скважины разница между осевым и смещенным значением разности фаз начинает быстро нарастать. То есть в скважине небольшого радиуса при смещении зонда можно ожидать отклонения небольшой амплитуды, а в скважине большого радиуса они могут быть весьма значительными. Например, если радиус скважины 6.5 дюймов (0.165 м), значение сигнала в центре равно 0.05°, смещенного – 0.32°, а если радиус около 0.20 м, значение сигнала на оси равно 0.25°, смещенного – 1.52°. Разница между осевым и смещенным значением отношения амплитуд растет при увеличении значений радиуса от 5.5 до 7 дюймов и становится почти постоянной при дальнейшем увеличении. Таким образом, расчеты показывают, что сигнал высокочастотного зонда LWD будет вести себя сложным образом в скважине изменяющегося радиуса (например, при наличии каверн) при высоком контрасте УЭС бурового раствора и пласта даже при отсутствии влияния вмещающих пород.

Интересными в той же статье представляются и расчеты сигналов 2 МГц зонда, пересекающего наклонный полутораметровый пласт (угол между нормалью к пласту и вертикалью 0, 20, 45, 60°) и смещенного с оси на разные расстояния (расстояние между осями скважины и прибора 0, 1.5, 2.5 и 3.5 дюйма или 0, 3.8, 6.4 и 8.9 см) (рис. 2). В тексте не указано, как взаимно располагаются скважина, наклонный пласт и прибор, но в более поздней статье почти тех же авторов [Lee et al., 2012] приведен поясняющий рисунок модели, которая, по-видимому, и была выбрана для расчетов (рис. 3). На этом рисунке показано, что прибор сдвинут к той направляющей цилиндрической поверхности скважины, которая проходит через верхнюю точку пересечения подошвы пласта. Графики на рис. 2 показывают существенное изменение формы диаграмм отношения амплитуд в ближней и дальней приемных катушках из-за приближения прибора к стенке скважины при всех углах наклона пласта, а также большее изменение уровня сигнала в более проводящих вмещающих пластах (УЭС 1 Ом·м) по сравнению с пластом с большим УЭС (100 Ом·м). Последнее отражает сильное влияние контраста УЭС бурового раствора (2000 Ом·м) и окружающей скважину среды: чем сильнее контраст, тем больше изменение сигнала при сдвиге прибора с оси симметрии.

Разница значений отношения амплитуд в границах пласта и во вмещающих пластах таким образом возрастает с движением зонда от оси к стенке скважины. При этом значения в пределах пласта изменяются незначительно для углов наклона 0–45°, и только при наклоне 60° в области кровли заметно изменение диаграммы, увеличивающееся с эксцентриситетом.

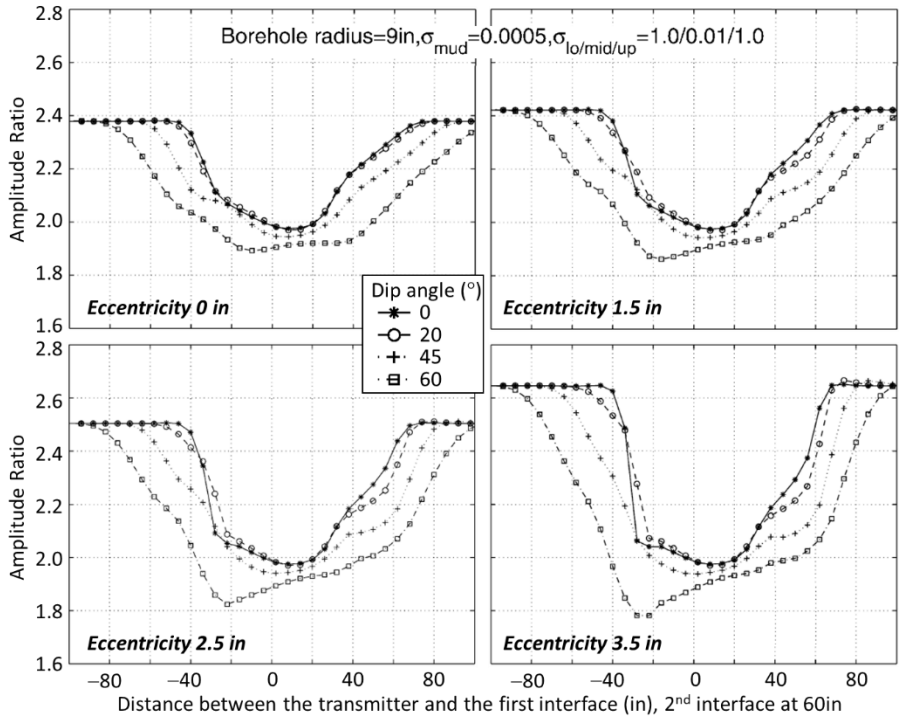

Рис. 2. Отношение амплитуд (amplitude ratio) для зонда LWD (2 МГц), наклонно пересекающего изотропный пласт, в зависимости от смещения с оси скважины, заполненной изолирующим буровым раствором (рис. 15 из статьи [Hue et al., 2005]). По оси абсцисс отложено расстояние между генератором и подошвой пласта в дюймах, по оси ординат – безразмерное отношение амплитуд

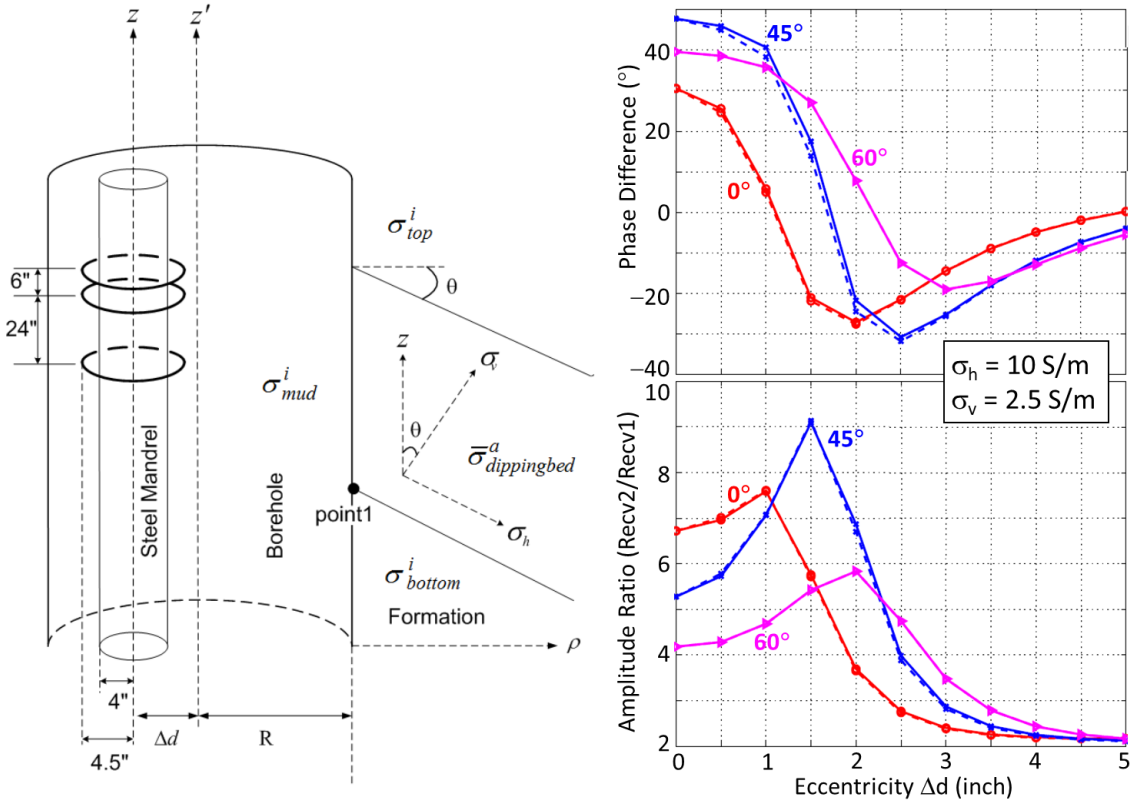

Рис. 3. Рисунки 1 и 5 из статьи [Lee et al., 2012]: модель скважины с наклонным пластом и сдвинутым с оси прибором и измеряемые сигналы: разность фаз (phase difference) и отношение амплитуд (amplitude ratio) в зависимости от эксцентриситета прибора Δd, рассчитанные в однородной анизотропной среде (σ_h = 10 См/м и σ_v = 2.5 См/м) с наклоном оси анизотропии под углом θ = 0°, 45°, 60°. Радиус скважины R = 12 дюймов (≈0.31 м), электропроводность бурового раствора σ_{mud} = 0.0005 См/м (УЭС 2000 Ом·м)

В статье [Lee et al., 2012] приводятся результаты аналогичных расчетов сигналов зонда с той же частотой (2 МГц), но в моделях анизотропных пород. Для неограниченного пласта с наклонной анизотропией (0, 45, 60°; рис. 3) подробно исследовано влияние эксцентриситета (с целью тестирования программы расчета). Влияние наклона оси анизотропии на сигнал достаточно сильное при центрированном положении прибора, сдвигает положение минимума разности фаз и максимума отношения амплитуд на большее значение эксцентриситета при большем угле наклона, становится минимальным для разности фаз и практически незначимым для отношения амплитуд при сдвиге оси прибора с оси симметрии модели на 5 дюймов. При этом эксцентриситет 5 дюймов не является максимально возможным в рассматриваемой модели, а горизонтальное и вертикальное УЭС пласта слишком низкие (0.1 и 0.4 Ом·м), чтобы этот пласт представлял реальный интерес.

Влияние электрической анизотропии в модели с наклонным высокоомным анизотропным пластом в низкоомном изотропном окружении несущественно меняет общую картину изменений сигналов (рис. 4) по сравнению с графиками на рис. 2. При пересечении скважиной пласта под прямым углом наибольшие изменения, обусловленные смещением зонда с оси скважины, заметны на графиках сигналов в низкоомных вмещающих пластах, в области выхода на значения в пласте между его границами изменения сигналов не заметны при используемой толщине линий. При угле пересечения скважины и границ пласта 45° на диаграммах разности фаз смещенного с оси зонда возникает минимум, значение которого тем ниже, чем больше смещение, диаграммы отношения амплитуд немного изменяются по сравнению с нормальным пересечением, но не осложняются дополнительными экстремумами.

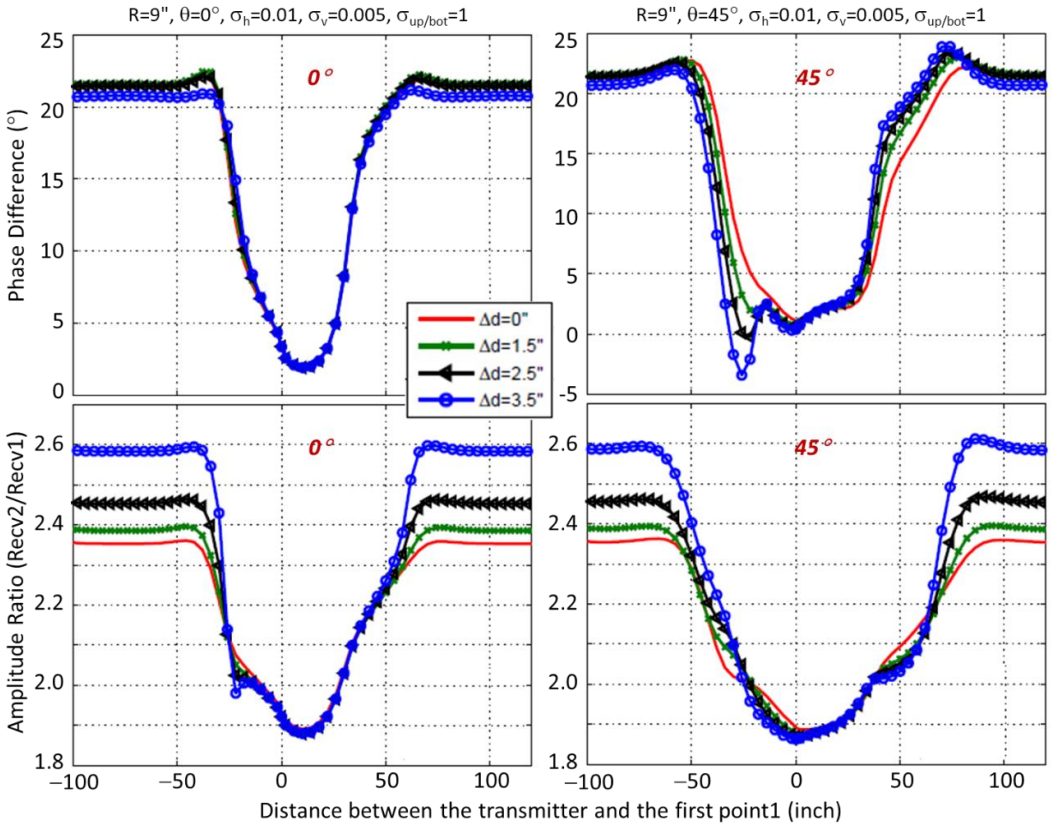

Рис. 4. Разность фаз и отношение амплитуд для зонда LWD (2 МГц), пересекающего анизотропный пласт, в зависимости от смещения с оси скважины (рис. 7 и 8 из статьи [Lee et al., 2012]), заполненной изолирующим буровым раствором (УЭС 2000 Ом·м). По оси абсцисс отложено расстояние между генератором и подошвой пласта в дюймах, по оси ординат – разность фаз в градусах (вверху) и безразмерное отношение амплитуд (внизу). Слева – скважина пересекает границы под прямым углом, справа – под углом 45°

Остается отметить, что значения УЭС моделей мало соответствуют реальным горным породам, и, по-видимому, выбраны авторами для наиболее наглядной иллюстрации возможных изменений сигналов.

ВЛИЯНИЕ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА НА СИГНАЛЫ ЗОНДОВ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА

В разрезах Западной Сибири большая часть отложений характеризуется средним диапазоном значений УЭС – от 1.5 до 50 Ом·м, радиусы скважин редко бывают много больше 0.10–0.15 м, УЭС глинистого, полимер-глинистого или полимер-карбонатного растворов лежит в диапазоне 0.5–3.0 Ом·м. В наиболее неблагоприятном случае минерализованного биополимерного раствора УЭС снижается до сотых долей омметра, но такой раствор, как правило, используется только при бурении наклонных скважин малого радиуса.

Влияние разного типа неровностей стенки скважины, заполненных буровым раствором с низким относительно пород значением УЭС, вносит свой вклад в сигналы индукционного каротажа. Так, при бурении на растворах с большой электропроводностью, возникает известная квазипериодическая помеха, причиной которой является периодическое изменение направления ствола скважины или изменение диаметра, сильно искажающая диаграммы как высокочастотного, так низкочастотного индукционного каротажа. Непериодические помехи вносят трещины и каверны, иногда приводящие к выходу сигналов за пределы ожидаемого диапазона. Также можно предположить, что влияние эксцентриситета прибора приводит к систематическому сдвигу сигналов на некотором протяженном интервале, поскольку угол наклона скважины не может быстро измениться.

Относительно высокие частоты (0.875, 1.75, 3.5, 7.0, 14.0 МГц для зондов длиной 2.0, 1.4, 1.0, 0.7 и 0.5 м соответственно), используемые в аппаратуре ВЭМКЗ (ВИКИЗ), разнообразие значений радиусов скважин и приборов, а также контраста УЭС буровых растворов и пород обуславливает интерес к влиянию неосесимметричного положения зонда на измеряемые разность фаз $\Delta\varphi$ (обозначение: DF05, DF07, DF10, DF14 и DF20; число – длина зонда в дм) и отношение амплитуд A_2/A_1 (обозначение: DA05, DA07, DA10, DA14 и DA20) [Эпов и др., 2010]. Исследование этого влияния необходимо, поскольку широко распространенные методики и средства количественной интерпретации основаны на предположении о соосности зонда ВЭМКЗ и скважины, и их применение к искаженным влиянием эксцентриситета сигналам может приводить к ошибкам при определении УЭС пластов и их измененных зон. Особенно важным исследование влияния эксцентриситета становится при определении радиального распределения УЭС по комплексу ВЭМКЗ и БКЗ в задачах оценки фильтрационно-емкостных свойств коллекторов на основе фильтрационного моделирования или исследования уплотнения породы вблизи стенки скважины в процессе бурения [Epov et al., 2002; Нестерова и др., 2014].

В первых работах, посвященных влиянию эксцентриситета на разность фаз, измеряемую зондами электромагнитного каротажа в модификации ВИКИЗ, рассматривались условия глинистых растворов на пресной воде и средних значений УЭС отложений. К тому же методика количественной интерпретации данных ВИКИЗ самих по себе предполагает оценку параметров осредненной зоны проникновения, и подробности ее строения не рассматриваются. Поэтому основной вывод в работах сводился к тому, что изменение сигналов зонда в результате смещения не влияет на оценку УЭС неизмененной части пласта и незначительно меняет параметры повышающей зоны проникновения.

Влияние смещения зонда индукционного каротажа с оси скважины исследовано в работе [Кауфман и др., 1974]. Вывод авторов: для фокусированного трехкатушечного зонда влияние эксцентриситета может

быть существенным при определении относительно высокого удельного сопротивления пласта, когда скважина заполнена сильно минерализованным буровым раствором (отношение удельных электропроводностей пласта и раствора менее 10^{-3}), потому что в этом случае для получения уверенно измеряемых сигналов, создаваемых токами в плохо проводящей среде, необходимо использование относительно высоких частот, при которых "расчеты необходимо выполнять по точным формулам".

В работе [Антонов, Кривопуцкий, 1981] приведены результаты расчетов разности фаз для трех изопараметрических зондов высокочастотного индукционного каротажа при контрасте УЭС раствора и пласта от 1/2 до 1/512 и показано, что смещение зонда с оси скважины практически не влияет, если УЭС пласта отличается от УЭС бурового раствора не более чем в 10 раз, что соответствует наиболее распространенной ситуации при бурении глинисто-песчаных отложений на пресном глинистом растворе.

В методической работе [Технология ..., 2000] показано, что для аппаратуры ВИКИЗ с радиусом корпуса 0.0365 м, размещенной в скважине радиусом 0.108 м, влияние эксцентриситета тем больше, чем выше контраст УЭС и меньше длина зонда. При УЭС бурового раствора 2 Ом·м и пласта 100 Ом·м значение $\Delta\varphi$ короткого зонда DF05 при максимальном эксцентриситете увеличивается на 20 % относительно значения на оси, зонда DF07 – на 15 %, зонда DF10 – на 5 %, зонда DF14 – на 2 %, зонда DF20 – не изменяется. Но при низком УЭС бурового раствора зависимость от смещения прибора с оси оказывается сложнее: для УЭС раствора 0.2 Ом·м и пласта 20 Ом·м изменяется тип кривой зондирования – с монотонно падающей с длиной зонда при осевом положении до восходящей при максимальном эксцентриситете. При этом значение $\rho_к^{\Delta\varphi}$ для длинных зондов практически одинаково при любом смещении.

В последующем для более полного исследования влияния смещения прибора с оси скважины расчет сигналов выполняется с использованием программ, реализующих как численно-аналитический алгоритм, так и конечно-разностный или конечно-элементный, с взаимным тестированием результатов. Основной объем расчетов проведен конечно-элементным способом для модели "скважина круглого сечения – пласт" при максимальном смещении зондов на стенку скважины. Максимальное смещение Δr, или расстояние между осями прибора и скважины, определяется радиусом скважины и внешним радиусом корпуса прибора.

Смещение зондов ВЭМКЗ с оси скважины значительно влияет на измеряемые сигналы [Игнатов, Сухорукова, 2009; Epov et al., 2012; Эпов, Сухорукова, 2012; Сухорукова, 2017]. Это влияние тем больше, чем больше радиус скважины, сильнее контраст УЭС раствора и пласта и выше рабочая частота зонда.

Детальные расчеты разности фаз $\Delta\varphi$ и отношения амплитуд A_2/A_1 проведены для фиксированной сетки радиусов скважины (0.062, 0.073, 0.108, 0.150 м) и радиусов основных модификаций аппаратуры ВЭМКЗ (0.0365 и 0.051 м) для двух положений прибора: на оси скважины и на ее стенке [Горбатенко и др., 2013]. В модели "скважина–пласт" диапазон УЭС пласта $\rho_п$ от 0.5 до 2000 Ом·м, бурового раствора $\rho_с$ – от 0.01 до 1000 Ом·м.

В вертикальных скважинах большей частью измеряется разность фаз прибором ВИКИЗ, типичный радиус скважины 0.108 м, радиус прибора 0.0365 м [Сухорукова, 2017]. При $\rho_с = 0.1$ Ом·м при осевом положении прибора значения $\Delta\varphi$ монотонно возрастают от короткого зонда к длинному, графики $\Delta\varphi$ почти параллельны для всех рассмотренных значений $\rho_п$ (рис. 5). При смещении прибора на стенку скважины значения $\Delta\varphi$ увеличиваются на несколько градусов (1–5°) для всех зондов кроме длинного, на кривой зондирования появляется максимум для зонда 0.7 м, значение $\Delta\varphi$ минимально для зонда 2.0 м. Такая форма кривой зондирования при инверсии приводит к возникновению в модели ложной глубокой зоны

понижающего проникновения, в то время как при инверсии кривой зондирования центрированного прибора сигналы соответствуют модели пласта без проникновения. Графики $\Delta\varphi$ для смещенного прибора тоже почти параллельны, для каждого зонда изменение $\Delta\varphi$ в результате смещения с оси на стенку при всех значениях $\rho_п$ примерно одинаковое. Значения A_2/A_1 при центральном положении прибора одинаковы для двух длинных зондов (1.4 и 2.0 м) и немного больше для средних зондов (0.7 и 1.0 м), значение для зонда 0.5 м близко к значениям для длинных зондов. При смещении прибора на стенку значения A_2/A_1 не меняются для двух длинных зондов, что обеспечивает правильное определение кажущегося УЭС по этим сигналам. Для остальных зондов значения A_2/A_1 снижаются по сравнению с положением на оси.

При $\rho_с$ = 0.5 Ом·м и при центральном положении прибора значения как $\Delta\varphi$, так и A_2/A_1 всех зондов кроме короткого соответствуют значению $\rho_п$, влияние скважины на сигналы короткого зонда увеличивает значение $\Delta\varphi$ примерно на 1° и уменьшает значение A_2/A_1 примерно на 0.01. При смещении на стенку не изменяются значения $\Delta\varphi$ для двух длинных зондов и значения A_2/A_1 для зондов 1.0–2.0 м. Значения $\Delta\varphi$ зондов 0.5–1.0 м для $\rho_п$ от 30 до 500 Ом·м завышены (примерно на 3° для DF05), значения A_2/A_1 двух коротких зондов занижены (на 0.05 для 0.5 м). Изменение вследствие смещения минимально при $\rho_п$ = 5 Ом·м: значение $\Delta\varphi$ для короткого зонда снижается примерно на 1°, для зонда 0.7 м – повышается на эту же величину, значение A_2/A_1 снижается для этих зондов не более чем на 0.01. Графики обоих измеряемых сигналов почти параллельны между собой для $\rho_п$ = 30–500 Ом·м.

С увеличением значения $\rho_с$ до 1.0 Ом·м изменение сигналов при смещении уменьшается. Значение A_2/A_1 снижается только для зонда 0.5 м, значение $\Delta\varphi$ повышается для зондов 0.5 и 0.7 м. Графики $\Delta\varphi$ для $\rho_п$ = 10–500 Ом·м соответствуют кривым зондирования пласта с понижающей зоной проникновения. При $\rho_с$ = 10.0 Ом·м изменения, обусловленные сдвигом прибора с оси на стенку скважины, становятся практически незаметными.

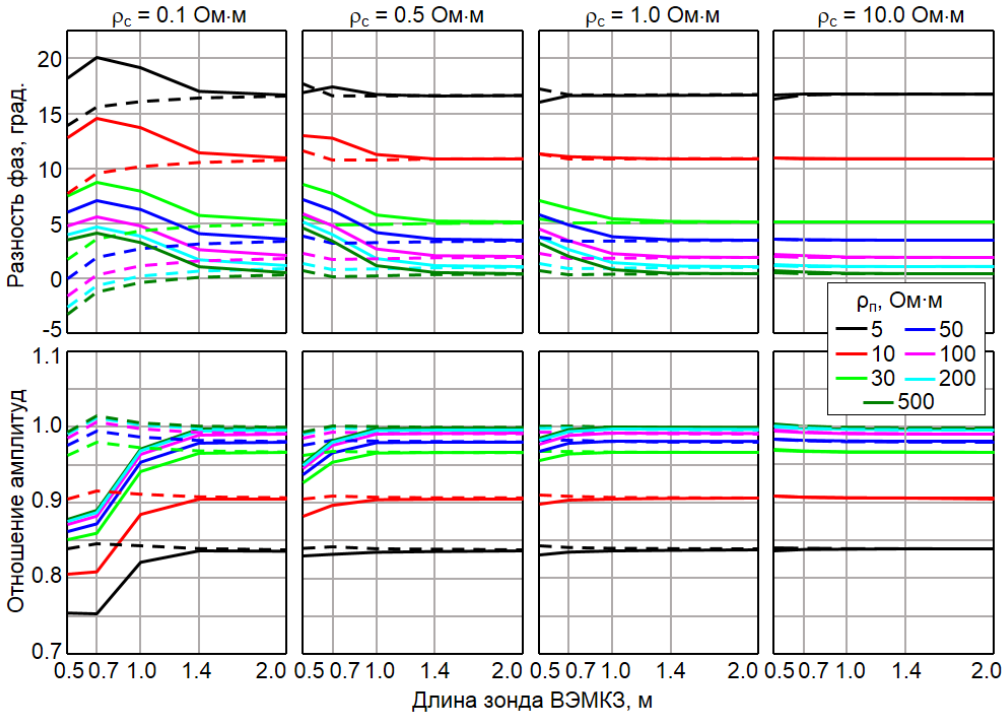

Рис. 5. Значения разности фаз и отношения амплитуд для разных УЭС пласта и бурового раствора и положений прибора ВЭМКЗ в зависимости от длины зондов (рис. 1.9 из [Сухорукова, 2017]). Радиус прибора 0.0365 м, радиус скважины 0.108 м, УЭС раствора 0.1–10 Ом·м. Пунктир – прибор расположен на оси скважины, сплошная линия – на ее стенке

На основе подобных расчетов для разных соотношений УЭС бурового раствора и пласта созданы палетки поправок для пересчета сигналов, измеренных смещенным прибором, на ось скважины [Сухорукова, 2017]. Пусть $\Delta\varphi_э$ – сигнал зонда, лежащего на стенке, $\Delta\varphi_о$ – сигнал зонда на оси, тогда $\Delta(\Delta\varphi)=\Delta\varphi_э - \Delta\varphi_о$ – изменение (приращение) сигнала при сдвиге прибора с оси на стенку. Величина $\Delta(\Delta\varphi)$ для разных зондов ВИКИЗ оказывается довольно значительной при таком соотношении радиусов скважины и прибора (рис. 6). Белым цветом обозначена область, в которой сигналы при положении зонда на стенке и на оси скважины равны с практической точностью (различие не превышает погрешности измерения $|\Delta(\Delta\varphi)| < 0.3°$). Эта область включает линию равных между собой значений $\rho_п$ и $\rho_с$ (показана на рисунках), довольно широкую полосу вокруг нее, смещенную в сторону $\rho_п > \rho_с$. При низких значениях $\rho_п$ и $\rho_с$ значение $\Delta(\Delta\varphi)$ меняет знак.

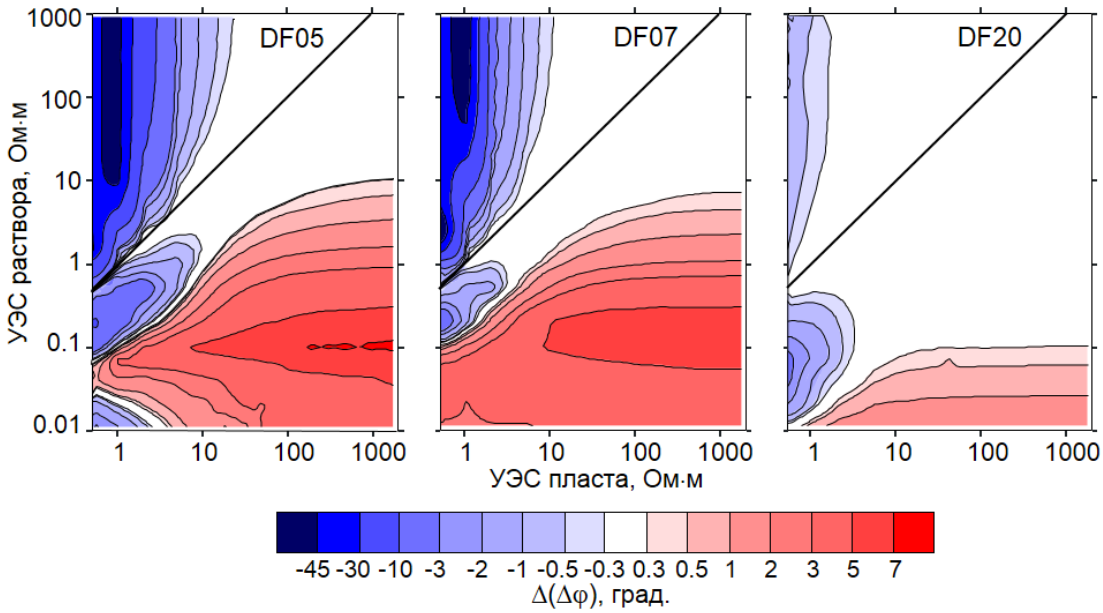

Рис. 6. Приращение разности фаз при сдвиге прибора с оси скважины на стенку для разных УЭС пласта (по горизонтальной оси) и УЭС бурового раствора (по вертикальной оси) (рис. 1.10 из [Сухорукова, 2017]). Радиус скважины 0.108 м, прибора – 0.0365 м

При бурении наклонных или горизонтальных стволов радиус скважины равен 0.062 м, внешний радиус корпуса модулей ВЭМКЗ автономной аппаратуры – 0.051 м. Изменение сигналов ($\Delta\varphi$ и A_2/A_1) в результате сдвига прибора на стенку скважины (рис. 7) максимально для высокочастотного зонда 0.5 м и практически незначимо (меньше погрешности измерения) для зондов длиной больше 1 м (1.1, 1.4, 1.6, 2.0 м). Эксцентриситет больше влияет на $\Delta\varphi$, чем на A_2/A_1, увеличивая $\Delta\varphi$ и уменьшая A_2/A_1 при высокой электропроводности раствора в скважине [Горбатенко и др., 2013; Сухорукова, 2017].

С применением подобных палеток влияние эксцентриситета на сигналы ВЭМКЗ необходимо исключать до проведения численной инверсии на основе цилиндрически-слоистой модели при наличии предпосылок для этой коррекции (большой контраст значений $\rho_п$ и $\rho_с$, широкая скважина, нецентрированный прибор, нефизичные формы кривых зондирования, признаки глубокого понижающего проникновения в непроницаемых неглинистых породах). При этом влияние эксцентриситета на сигналы длинных зондов не превышает погрешности измерения в практически важном диапазоне значений $\rho_п$ и $\rho_с$ и меньше для отношения амплитуд, чем для разности фаз [Epov et al., 2012; Сухорукова, 2017]. При нецентрированном положении прибора ВЭМКЗ в задачах определения радиального распределения УЭС в проницаемом

пласте измеренные короткими высокочастотными зондами ВЭМКЗ (0.5–1.0 м) значения разности фаз и отношения амплитуд следует пересчитывать в значения на оси скважины. В задачах определения параметров горизонтально-слоистой среды по сигналам длинных низкочастотных зондов (1.1–2.0 м) коррекция измеренных значений, при типичных размерах радиусов скважины и прибора, не требуется.

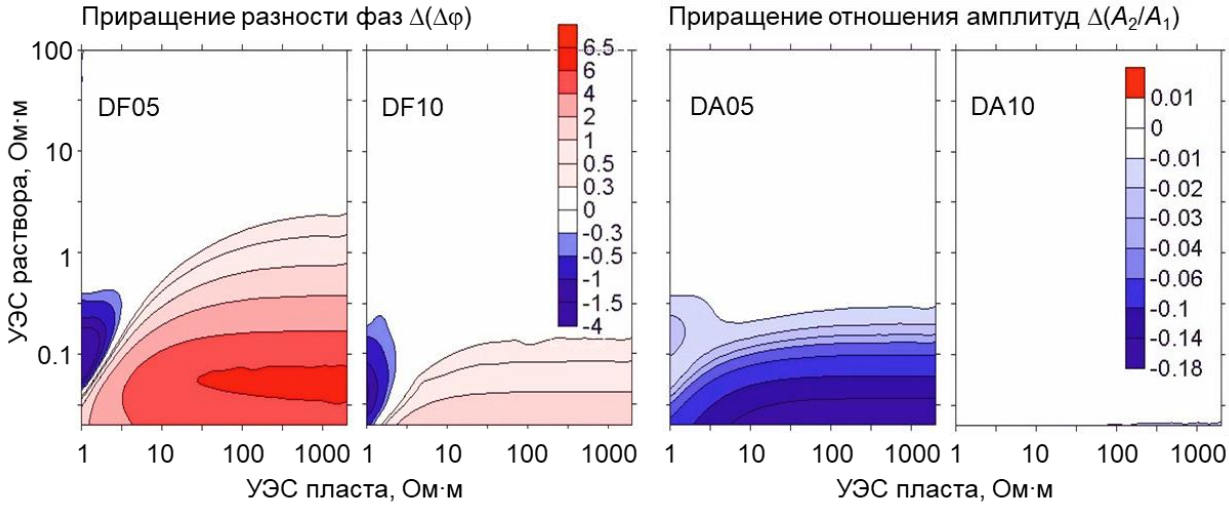

Рис. 7. Приращение разности фаз при сдвиге прибора с оси скважины на стенку для разных УЭС пласта (по горизонтальной оси) и УЭС бурового раствора (по вертикальной оси). Радиус скважины 0.062 м, прибора – 0.051 м (рис. 1.11 из [Сухорукова, 2017])

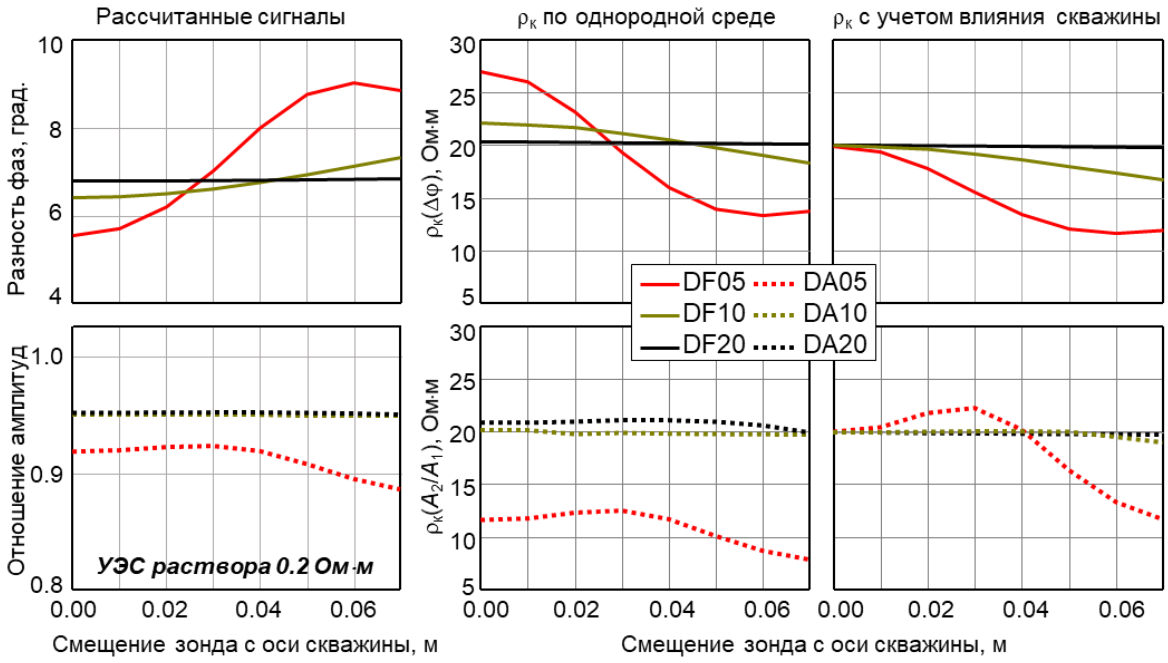

Рис. 8. Значения разности фаз и отношения амплитуд в зависимости от смещения зонда с оси скважины (рис. 1.12 из [Сухорукова, 2017], дополненный) и их трансформации в кажущееся сопротивление. Диаметр скважины 0.216 м, прибора 0.073 м, $\rho_п$ = 20 Ом·м, $\rho_с$ = 0.2 Ом·м

Изменение сигналов ВЭМКЗ от величины смещения зонда с оси скважины также оказывается достаточно сложным. Если зонд не лежит на стенке скважины, оценить влияние смещения, не зная величину последнего, оказывается невозможно [Сухорукова, 2017; Сухорукова и др., 2018]. Но при этом можно установить, сигналы каких зондов будут искажены в наименьшей степени. Зависимость величин $\Delta\varphi$

и A_2/A_1 от смещения с оси в модели с параметрами диаметр скважины 0.216 м, прибора 0.073 м, $\rho_п$ = 20 Ом·м, $\rho_с$ = 0.2 Ом·м показывает (рис. 8), что значения $\Delta\varphi$ короткого зонда (DF05) изменяются слабо при небольшом смещении прибора с оси (до 0.01 м) в случае $\rho_с$ = 0.2 Ом·м и рядом со стенкой скважины (смещение 0.05–0.07 м), для среднего зонда (DF10) – при смещении до 0.03 м, длинного зонда (DF20) – не изменяются совсем; значения A_2/A_1 короткого зонда (DA05) заметно изменяются только при смещении более 0.04 м, для зондов 1 и 2 м (DA10 и DA20) влияние смещения отсутствует. В области средних значений смещения (0.025–0.040 м) изменение $\Delta\varphi$ с длиной зонда будет немонотонным, в отличие от изменения значений A_2/A_1. Немонотонная кривая зондирования, построенная по разности фаз, встречается при анализе практических сигналов, и это может быть признаком среднего смещения прибора в скважине. При максимальных смещениях оба сигнала изменяются таким образом, что в модели непроницаемого пласта появится понижающая зона проникновения.

При значительном контрасте $\rho_п$ и $\rho_с$ (20 и 0.2 Ом·м) трансформация в кажущееся сопротивление по однородной среде повторяет зависимости для сигналов. При центрированном положении на диаграммах будем видеть с уменьшением длины зондов увеличение значений $\rho_к(\Delta\varphi)$ и уменьшение значений $\rho_к(A_2/A_1)$. При положении на стенке удлинение зонда приводит к увеличению обеих характеристик. При среднем смещении (2.5–5.0 см) зависимость $\rho_к(\Delta\varphi)$ может быть сложной для анализа. Трансформации для длинного зонда слабо зависят от смещения и соответствуют УЭС пласта.

Для трансформаций измеряемых сигналов в кажущееся сопротивление с учетом влияния скважины характерно следующее. Если прибор центрирован, то значения трансформаций $\rho_к(\Delta\varphi)$ и $\rho_к(A_2/A_1)$ практически равны УЭС пласта. При сантиметровом смещении с оси начинает снижаться $\rho_к(\Delta\varphi)$ короткого зонда, к 2 см смещения достигая 10% уменьшения, а при смещении на 5–7 см – уровня 12 Ом·м; начиная с 2 см снижается также значение среднего зонда до16.6 Ом·м при 7 см; на значение для длинного зонда смещение не влияет. Трансформация $\rho_к(A_2/A_1)$ двух коротких зондов будет завышена при смещении от 1 до 4 см; для зондов длиной 1–2 м (DA10–DA20) смещение практически не влияет на кажущееся сопротивление. При смещении, большем 4 см, кривые зондирования (в величинах кажущегося сопротивления) будут соответствовать понижающему проникновению.

При $\rho_с$ = 0.02 Ом·м (рис. 9) максимальные изменения $\Delta\varphi$ соответствуют разным смещениям: для короткого зонда это смещение 0.02 м, для среднего около 0.04 м. Немонотонная зависимость $\Delta\varphi$ заметна при смещении до 0.01 и более 0.05 м, A_2/A_1 – от 0.015 до 0.035 м. При смещении более 0.03 м заметно увеличение $\Delta\varphi$ длинного зонда, значение A_2/A_1 остается неизменным при любом его положении.

Трансформация в кажущееся сопротивление по однородной среде в такой контрастной модели повторяет зависимости для сигналов так же, как и для первой модели. Но значение $\rho_к(A_2/A_1)$ для длинного зонда оказывается на 20 % больше УЭС пласта, а в средней части скважины (смещение до 5 см) будут возможны большие колебания для коротких зондов. При смещении больше 2.5 см соотношение $\rho_к(\Delta\varphi)$ между зондами соответствует модели с окаймляющей зоной, что может быть признаком наличия смещения прибора ВЭМКЗ, поскольку при сильно минерализованном растворе проводящей окаймляющей зоны не формируется.

Так же, как и для модели на рис. 8, значения трансформаций $\rho_к(\Delta\varphi)$ и $\rho_к(A_2/A_1)$ с учетом влияния скважины практически равны УЭС пласта для центрированного прибора, однако при малейшем смещении начинается их уменьшение для всех зондов кроме длинного. Для смещения 2–7 см характерно, что значения $\rho_к(A_2/A_1)$ для зондов 0.5–1.0 м много ниже, чем значения $\rho_к(\Delta\varphi)$, в этом же диапазоне

соотношение $\rho_к(\Delta\varphi)$ между зондами соответствует модели с окаймляющей зоной, что может быть признаком наличия смещения прибора ВЭМКЗ.

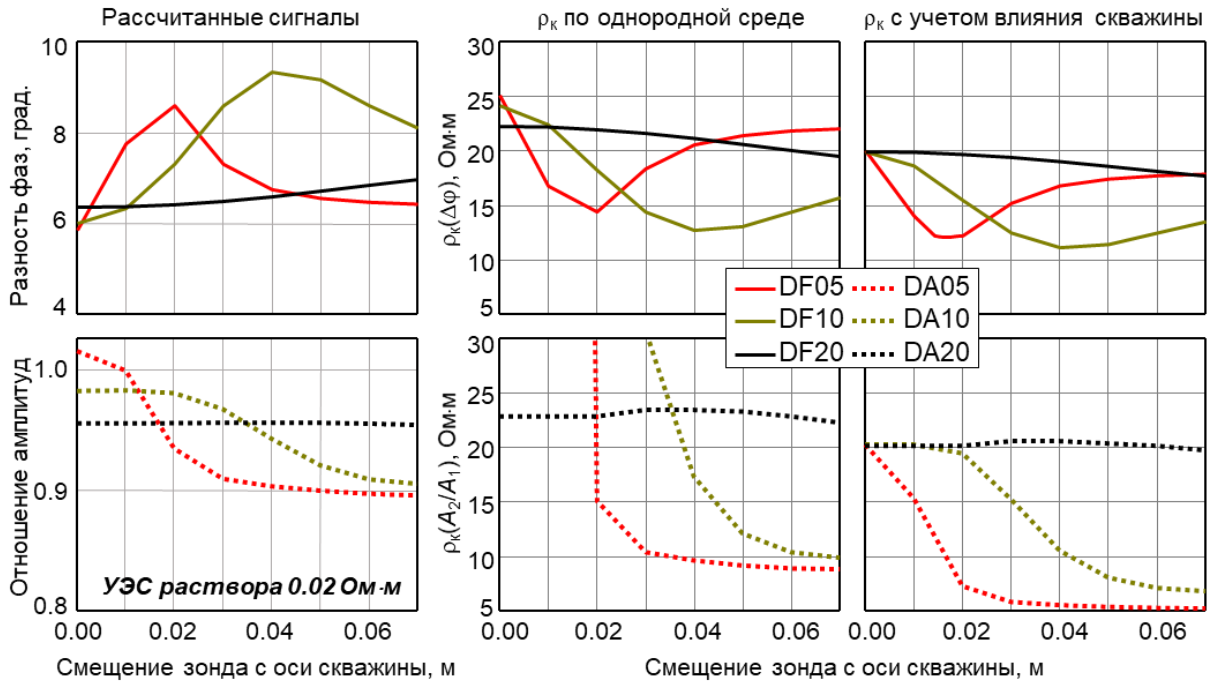

Рис. 9. Значения разности фаз и отношения амплитуд в зависимости от смещения зонда с оси скважины (рис. 1.12 из [Сухорукова, 2017], дополненный) и их трансформации в кажущееся сопротивление. Диаметр скважины 0.216 м, прибора 0.073 м, $\rho_п$ = 20 Ом·м, $\rho_с$ = 0.02 Ом·м

Зависимости A_2/A_1 от смещения зонда с оси скважины примерно такие же, что и результаты расчетов в статье [Hue et al., 2005], но на графиках $\Delta\varphi$ наблюдается максимум, а не минимум. При этом стоит отметить, что близкой формой зависимости обладают сигналы на частоте 2 МГц прибора LWD и 14 МГц прибора ВЭМКЗ при одном и том же контрасте УЭС раствора в скважине и пласта. Примеры успешного применения процедуры коррекции влияния эксцентриситета на сигналы ВЭМКЗ/ВИКИЗ приведены в статьях [Горбатенко и др., 2013; Литвиченко и др., 2018].

ВЫВОДЫ

В соответствии с результатами математического моделирования можно заключить, что в мегагерцовом диапазоне частот при смещении зондов с оси скважины сигналы зондов электромагнитного каротажа могут измениться достаточно сильно. Это проявляется как при максимальном смещении, когда зонд расположен на стенке скважины, так и при промежуточном. Смещение изменяет не только соотношение сигналов зондов ВЭМКЗ, работающих на разных частотах, но и форму диаграмм при пересечении границ пластов. Изменение сигналов тем больше, чем больше контраст значений УЭС пласта и бурового раствора в скважине, независимо от того, которое из них больше. Изменение оказывается разным для разности фаз и отношения амплитуд, что может быть некоторым основанием для определения значения смещения и коррекции его влияния (при достоверном измерении амплитудной характеристики). При смещении прибора ВЭМКЗ можно ошибочно выявить понижающее проникновение в непроницаемых породах по диаграммам трансформаций в кажущееся сопротивление как без учета скважины с раствором, так и с учетом.

Аналогичным образом в сигналах ВЭМКЗ проявляется электрическая поляризация глинистого вещества, и здесь остается только один критерий определения источника такого изменения: проведение коррекции влияния смещения. Опыт анализа практических данных, измеренных при наиболее применяемых в Западной Сибири диаметрах скважин и буровых растворах, показал, что во многих случаях коррекция максимально возможного смещения не приводит к исключению влияния поляризации, а соотношение корректированных сигналов разных зондов получается более нереальным, чем исходных.

Таким образом, влияние смещения на практические сигналы электромагнитного каротажа остается скорее предметом численного изучения, что подтверждается большим количеством публикаций о результатах расчетов, но малым – о примерах практического применения. При этом постоянное изменение технологий буровых работ неизбежно приводит к новым вопросам о влиянии эксцентриситета приборов скважинной электрометрии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2022-0026 «Инновационные аспекты электродинамики в задачах разведочной и промысловой геофизики».

ЛИТЕРАТУРА

Антонов Ю.Н., Кривопуцкий В.С. Моделирование зондов изопараметрического каротажного зондирования // Геология и геофизика. – 1981. – № 10. – С. 127–131.

Горбатенко А.А., Вологдин Ф.В., Сухорукова К.В. Моделирование влияния неровностей стенки скважины и эксцентриситета каротажного зонда на показания высокочастотного электромагнитного каротажного зондирования в скважинах с высокопроводящим раствором // Каротажник. – 2013. – № 2. – С. 54–64.

Игнатов В.С., Сухорукова К.В. Влияние эксцентриситета зонда на сигналы высокочастотного электромагнитного каротажа // Каротажник. – 2009. – № 182. – С. 101–110.

Кауфман А.А., Каганский А.М., Кривопуцкий В.С. Радиальные характеристики индукционных зондов, смещенных относительно оси скважины// Геология и геофизика. – 1974. – № 7. – С. 102–116.

Литвиченко Д.А., Сухорукова К.В., Нечаев О.В. Влияние смещения прибора к стенке скважины на сигналы электромагнитного каротажа и их трансформации // Каротажник. – 2018. – № 9 (291). – С. 35–45.

Нестерова Г.В., Ельцов И.Н., Киндюк В.А., Назаров Л.А., Назарова Л.А. Моделирование гидродинамических процессов в напряженно-деформированной прискважинной зоне и геофизические приложения // Петрофизика сложных коллекторов: проблемы и перспективы 2014: Сборник статей. – М.: «ЕАГЕ Геомодель». – 2014. – С. 327–344.

Сухорукова К.В. Определение электрофизических параметров терригенных отложений на основе совместной численной инверсии данных электрического и электромагнитного каротажа в вертикальных и наклонных скважинах: Диссертация ... д. техн. наук. – Новосибирск, 2017. – 357 с. http://www.ipgg.sbras.ru/ru/publications/ibc/2017/ds-2017-sukhorukova.pdf

Сухорукова К.В., Нечаев О.В., Суродина И.В., Петров А.М. Практические приложения численного моделирования и инверсии в задачах электрокаротажа // Марчуковские научные чтения–2018: Труды Международной конференции "Вычислительная математика и математическая геофизика", посвящ. 90-летию со дня рождения акад. А.С. Алексеева (г. Новосибирск, Академгородок, 8–12 октября 2018 г.) – Новосибирск, 2018. – С. 368–374.

Технология исследования нефтегазовых скважин на основе ВИКИЗ: Методическое руководство / ред. М.И. Эпов, Ю.Н. Антонов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 2000. – 121 с.

Чаадаев Е.В. Развитие теории и методики интерпретации данных электрического и индукционного каротажа : автореф. дис. ... д. техн. наук. – Тверь, ВНИИГИС, 1991. – 32 с.

Чен К.Ч., Ванг Х. Устройство и способ для учета влияния эксцентриситета скважины: Пат. RU 2 347 243 C2. Опубл. 20.02.2009. Бюл. 5. 21 с.

Эпов М.И., Каюров К.Н., Ельцов И.Н., Петров А.Н., Сухорукова К.В., Соболев А.Ю., Власов А.А. Новый аппаратурный комплекс геофизического каротажа СКЛ и программно-методические средства интерпретации EMF Pro // Бурение и нефть. – 2010. – № 2. – С. 16–19.

Эпов М.И., Сухорукова К.В. Электрические и электромагнитные каротажные зондирования в реалистичных моделях нефтегазовых коллекторов: численное моделирование и интерпретация // Геофизический журнал (Киев). – 2012. – № 34 (4). – С. 5–15.

Anderson B., Barber T., Kennedy D., Shen L. New dimensions in modeling resistivity // Shlumberger Oilfield Review. – 1997. – Vol. 9. – P. 41–56.

Barber T., Jammes L., Smits J.W., Klopf W., Ramasamy A., Reynolds L., Sibbit A., Terry R. Real-time openhole evaluation // Oilfield Review. – 1999. – Summer. – P. 36–57.

Epov M., Yeltsov I., Kashevarov A., Sobolev A., Ulyanov V. Time evolution of the near borehole zone in sandstone reservoir from the data of repeated high-frequency electromagnetic logging // SPWLA 43rd Annual Logging Symposium. June 2–5, 2002. – 2002. – Paper SPWLA-2002-ZZ, https://onepetro.org/SPWLAALS/proceedings-abstract/SPWLA-2002/All-SPWLA-2002/SPWLA-2002-ZZ/27387.

Epov M.I., Suhorukova C.V., Nikitenko M.N., Gorbatenko A.A., Arzhantsev V.S. Electromagnetic sounding in deviated and horizontal wells: mathematical modeling and real data interpretation // SPE Russian Oil & Gas Exploration & Production Technical Conference & Exhibition (Moscow, Russia 16–18th October 2012). – Moscow, 2012. – Paper SPE-162034-MS, doi: 10.2118/162034-MS.

Gianzero S.C. Effect of sonde eccentricity on responses of conventional induction-logging tools // IEEE Transactions on Geoscience Electronics. – 1978. – Vol. 16 (4). – P. 332–339, doi: 10.1109/TGE.1978.294593.

Gianzero S.C., Rau R. The effect of sonde position in the hole on responses of resistivity logging tools // Geophysics. – 1977. – Vol. 42 (3). – P. 642–654, doi: 10.1190/1.1440734.

Hou J., Bittar M. Correction for the borehole effect of multi-component array induction log data // PIERS Proceedings (July 5–8, 2010). – Cambridge, USA, 2010. – P. 403–409.

Hou J., Sanmartin L., Wu D., Torres D., Celepcikay T. A new multi-frequency triaxial array induction tool for enhancing evaluation of anisotropic formations and its field testing // SPWLA 54th Annual Logging Symposium (June 22–26, 2013). – New Orleans, Louisiana, 2013. – Paper SPWLA-2013-CCC.

Hue Y.-K., Teixeira F.L., San Martin L.E., Bittar M. Three-dimensional simulation of eccentric LWD tool response in boreholes through dipping formations // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2005. – Vol. 43 (2). – P. 257–268, doi: 10.1109/TGRS.2004.841354.

Kaufman A., Itskovich G. Basic principles of induction logging: electromagnetic methods in borehole. – Elsevier, 2017. – 501 p.

Lee H., Teixeira F., San Martin L., Bittar M. Numerical modeling of eccentered LWD borehole sensors in dipping and fully-anisotropic earth formations // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2012. – Vol. 50 (3). – P. 727–735, doi: 10.1109/TGRS.2011.2162736.

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, 2005. – Paper SPWLA-2005-UU.

Liu Q.-H. Electromagnetic field generated by an off-axis source in a cylindrically layered medium with an arbitrary number of horizontal discontinuities // Geophysics. – 1993. – Vol. 58 (5). – P. 616–625, doi: 10.1190/1.1443445.

Minerbo G.N., Miles J.W. Borehole correction system for an array induction well-logging apparatus: United States Patent: 5,041,975. Date of Patent: Aug. 20, 1991. – 69 p.

Nikitenko M., Itskovich G., Seryakov A. Fast electromagnetic modeling in cylindrically layered media excited by eccentred magnetic dipole // Radio Science. – 2016. – Vol. 51 (6). – P. 573–588, doi: 10.1002/2016RS005950.

Omeragic D. Multi-coil electromagnetic focusing methods and apparatus reduce borehole eccentricity effects: United States Patent No.: US 6,541,979 B2. Date of Patent: Apr. 1, 2003. – 20 p.

Rabinovich M.B., Bespalov A.N., Forgang S.W. Use of electrodes and multi-frequency focusing to correct eccentricity and misalignment effects on transversal induction measurements: United States Patent US 8803527 B2. 12 Aug 2014. – 12 p.

Rosthal R., Barber T., Bonner S., Chen K.C., Davydycheva S., Hazen G., Homan D., Kibbe C., Minerbo G., Schlein R., Villegas L., Hanming W.H., Zhou F. Field test results of an experimental fully-triaxial induction tool // 44th Annual SPWLA Symposium (June 22–25, 2003). – Galveston, Texas, 2003a. – Paper SPWLA-2003-QQ.

Rosthal R.A., Homan D., Barber T.D., Bonner S., Clark B., Omeragic D. Method and apparatus for cancellation of borehole effects due to a tilted or transverse magnetic dipole: United States Patent: US 6,573,722 B2. Date of Patent: Jun. 3, 2003b. – 13 p.

Sun X., Nie Z., Li A., Luo X. Analysis and correction of borehole effect on the responses of multicomponent induction logging tools // PIER. – 2008. – Vol. 85. – P. 211–226, doi: 10.2528/PIER08072206.

Thunehed H., Olsson O. Borehole corrections for a thick resistivity probe // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. – 2004. – Vol. 9 (4). – P. 217–224, doi: 10.4133/JEEG9.4.217.

REFERENCES

Anderson B., Barber T., Kennedy D., Shen L. New dimensions in modeling resistivity // Shlumberger Oilfield Review. – 1997. – Vol. 9. – P. 41–56.

Antonov Yu.N., Krivoputsky V.S. Modeling of probes of isoparametric logging sounding // Soviet Geology and Geophysics. – 1981. – Vol. 10. – P. 127–131.

Barber T., Jammes L., Smits J.W., Klopf W., Ramasamy A., Reynolds L., Sibbit A., Terry R. Real-time openhole evaluation // Oilfield Review. – 1999. – Summer. – P. 36–57.

Chaadaev E.V. Development of the theory and methodology for the interpretation of electrical and induction logging data. SciD Thesis [in Russian]. – VNIIGIS, Tver, 1991. – 32 p.

Chen K.Ch., Vang Kh. Device and method for account of influence of centering error of chink: Patent RU 2 347 243 C2. Date of publication: 20.02.2009. – Bull. 5. – 21 p.

Epov M., Yeltsov I., Kashevarov A., Sobolev A., Ulyanov V. Time evolution of the near borehole zone in sandstone reservoir from the data of repeated high-frequency electromagnetic logging // SPWLA 43rd Annual Logging Symposium. June 2–5, 2002. – 2002. – Paper SPWLA-2002-ZZ, https://onepetro.org/SPWLAALS/proceedings-abstract/SPWLA-2002/All-SPWLA-2002/SPWLA-2002-ZZ/27387.

Epov M.I., Antonov Yu.N., Yeltsov I.N., Zhmaev S.S., Petrov A.N., Ulyanov V.N., Glinskikh V.N., Eremin V.N., Kayurov K.N., Kiselev V.V., Lavrukhov V.T., Martakov S.V., Nikitenko M.N., Revva M.Yu., Sobolev

A.Yu., Sukhorukova K.V., Cheryauka A.B. VIKIZ Method for Logging Oil and Gas Boreholes [in Russian]. – Novosibirsk, GEO, 2002. – 112 p.

Epov M.I., Kayurov K.N., Yeltsov I.N., Sukhorukova K.V., Petrov A.N., Sobolev A.Yu., Vlasov A.A. New SKL logging equipment, methods and EMF PRO programs for data interpretation // Burenie i Neft. – 2010. – Vol. 2. – P. 16–19.

Epov M.I., Suhorukova C.V., Nikitenko M.N., Gorbatenko A.A., Arzhantsev V.S. Electromagnetic sounding in deviated and horizontal wells: mathematical modeling and real data interpretation // SPE Russian Oil & Gas Exploration & Production Technical Conference & Exhibition (Moscow, Russia 16–18th October 2012). – Moscow, 2012. – Paper SPE-162034-MS, doi: 10.2118/162034-MS.

Epov M.I., Sukhorukova K.V. Electric and electromagnetic logging sounding in realistic models of oil-gas collectors: numerical modeling and interpretation // Geofizicheskii Zhurnal (Kiev). – 2012. – Vol. 34 (4). – P. 5–15.

Gianzero S.C. Effect of sonde eccentricity on responses of conventional induction-logging tools // IEEE Transactions on Geoscience Electronics. – 1978. – Vol. 16 (4). – P. 332–339, doi: 10.1109/TGE.1978.294593.

Gianzero S.C., Rau R. The effect of sonde position in the hole on responses of resistivity logging tools // Geophysics. – 1977. – Vol. 42 (3). – P. 642–654, doi: 10.1190/1.1440734.

Gorbatenko A.A., Vologdin F.V., Sukhorukova K.V. Simulation of the effect of rough borehole walls and an excentered logging sonde on the readings of high-frequency electromagnetic logging sounding in wells filled with a high-conductivity drilling mud // Karotazhnik. – 2013. – Vol. 2. – P. 54–64.

Hou J., Bittar M. Correction for the borehole effect of multi-component array induction log data // PIERS Proceedings (July 5–8, 2010). – Cambridge, USA, 2010. – P. 403–409.

Hou J., Sanmartin L., Wu D., Torres D., Celepcikay T. A new multi-frequency triaxial array induction tool for enhancing evaluation of anisotropic formations and its field testing // SPWLA 54th Annual Logging Symposium (June 22–26, 2013). – New Orleans, Louisiana, 2013. – Paper SPWLA-2013-CCC.

Hue Y.-K., Teixeira F.L., San Martin L.E., Bittar M. Three-dimensional simulation of eccentric LWD tool response in boreholes through dipping formations // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2005. – Vol. 43 (2). – P. 257–268, doi: 10.1109/TGRS.2004.841354.

Ignatov V.S., Sukhorukova K.V. Sonde eccentricity effect on high-frequency electromagnetic log responses // Karotazhnik. – 2009. – Vol. 5. – P. 101–110.

Kaufman A., Itskovich G. Basic principles of induction logging: electromagnetic methods in borehole. – Elsevier, 2017. – 501 p.

Kaufman A.A., Kaganskii A.M., Krivoputskii V.S. Radial characteristics of induction probes in an off-axis position in a borehole // Soviet Geology and Geophysics. – 1974. – Vol. 7. – P. 78–88.

Lee H., Teixeira F., San Martin L., Bittar M. Numerical modeling of eccentered LWD borehole sensors in dipping and fully-anisotropic earth formations // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2012. – Vol. 50 (3). – P. 727–735, doi: 10.1109/TGRS.2011.2162736.

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, 2005. – Paper SPWLA-2005-UU.

Litvichenko D.A., Sukhorukova K.V., Nechaev O.V. The effect of a tool bias towards the borehole wall on electromagnetic-log responses and their transformations // Karotazhnik. – 2018. – Vol. 9. – P. 35–45.

Liu Q.-H. Electromagnetic field generated by an off-axis source in a cylindrically layered medium with an arbitrary number of horizontal discontinuities // Geophysics. – 1993. – Vol. 58 (5). – P. 616–625, doi: 10.1190/1.1443445.

Minerbo G.N., Miles J.W. Borehole correction system for an array induction well-logging apparatus: United States Patent: 5,041,975. Date of Patent: Aug. 20, 1991. – 69 p.

Nesterova G.V., Eltsov I.N., Kindyuk V.A., Nazarov L.A., Nazarova L.A. Modeling of hydrodynamic processes in the stress-strain near-wellbore zone and geophysical applications // Petrophysics of complex reservoirs: problems and prospects–2014: Collection of articles. – EAGE Geomodel, Moscow, 2014. – P. 327–344.

Nikitenko M., Itskovich G., Seryakov A. Fast electromagnetic modeling in cylindrically layered media excited by eccentred magnetic dipole // Radio Science. – 2016. – Vol. 51 (6). – P. 573–588, doi: 10.1002/2016RS005950.

Omeragic D. Multi-coil electromagnetic focusing methods and apparatus reduce borehole eccentricity effects: United States Patent No.: US 6,541,979 B2. Date of Patent: Apr. 1, 2003. – 20 p.

Rabinovich M.B., Bespalov A.N., Forgang S.W. Use of electrodes and multi-frequency focusing to correct eccentricity and misalignment effects on transversal induction measurements: United States Patent US 8803527 B2. 12 Aug 2014. – 12 p.

Rosthal R., Barber T., Bonner S., Chen K.C., Davydycheva S., Hazen G., Homan D., Kibbe C., Minerbo G., Schlein R., Villegas L., Hanming W.H., Zhou F. Field test results of an experimental fully-triaxial induction tool // 44th Annual SPWLA Symposium (June 22–25, 2003). – Galveston, Texas, 2003a. – Paper SPWLA-2003-QQ.

Rosthal R.A., Homan D., Barber T.D., Bonner S., Clark B., Omeragic D. Method and apparatus for cancellation of borehole effects due to a tilted or transverse magnetic dipole: United States Patent: US 6,573,722 B2. Date of Patent: Jun. 3, 2003b. – 13 p.

Sukhorukova K.V. Determination of the electrophysical parameters of terrigenous deposits based on the joint numerical inversion of electrical and electromagnetic logging data in vertical and deviated wells: Dissertation ... Doct. of Techn. Sci. – Novosibirsk, 2017. – 357 p., http://www.ipgg.sbras.ru/ru/publications/ibc/2017/ds-2017-sukhorukova.pdf.

Sukhorukova K.V., Nechaev O.V., Surodina I.V., Petrov A.M. Practical applications of numerical modeling and inversion in electrical logging problems // Marchuk Scientific Readings–2018: Proceedings of the International Conference "Computational Mathematics and Mathematical Geophysics", dedicated to 90th anniversary of Acad. A.S. Alekseev (Novosibirsk, Akademgorodok, October 8–12, 2018). – Novosibirsk, 2018. – P. 368–374.

Sun X., Nie Z., Li A., Luo X. Analysis and correction of borehole effect on the responses of multicomponent induction logging tools // PIER. – 2008. – Vol. 85. – P. 211–226, doi: 10.2528/PIER08072206.

Thunehed H., Olsson O. Borehole corrections for a thick resistivity probe // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. – 2004. – Vol. 9 (4). – P. 217–224, doi: 10.4133/JEEG9.4.217.

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

СУХОРУКОВА Карина Владимировна – доктор технических наук, заведующая лабораторией многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: количественная интерпретация комплекса данных скважинной электрометрии в вертикальных и субгоризонтальных скважинах.

Статья поступила в редакцию 9 июня 2023 г.,
принята к публикации 16 августа 2023 г.