



СИГНАЛЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗОНДА С ТОРОИДАЛЬНЫМИ КАТУШКАМИ В НАКЛОННЫХ СКВАЖИНАХ (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ)

И.В. Михайлов¹, И.В. Суродина², О.П. Темирбулатов³

¹*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,*

²*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 6, Россия,*

³*Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,
e-mail: MikhaylovIV@ipgg.sbras.ru*

Исследование направлено на анализ применимости каротажного зонда с тороидальными катушками в разрезах наклонных нефтегазовых скважин. Выполнено трехмерное конечно-разностное моделирование электромагнитных сигналов в геоэлектрических моделях нефте-, газо-, нефтеводо- и водонасыщенных коллекторов для всего набора режимов, операционных частот и положений приемных тороидальных катушек. Выявлены характерные особенности сигналов в зависимости от электрической контрастности и толщины коллектора при разных зенитных углах скважины.

Электрокаротаж; тороидальные катушки; численное моделирование; наклонная скважина; удельное электрическое сопротивление

SIGNALS OF ELECTROMAGNETIC TOOL WITH TOROIDAL COILS IN DEVIATED WELLS (FOLLOWING NUMERICAL SIMULATION RESULTS)

I.V. Mikhaylov¹, I.V. Surodina², O.P. Temirbulatov³

¹*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,*

²*Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,
Lavrentiev Ave., 6, Novosibirsk, 630090, Russia,*

³*Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: MikhaylovIV@ipgg.sbras.ru*

The study is aimed at analyzing the applicability of the logging tool with toroidal coils in the sections of deviated oil- and-gas wells. We carried out a three-dimensional finite-difference simulation of the electromagnetic signals in geoelectric models of oil-, gas-, oil-water- and water-saturated reservoirs for the entire set of operating modes, frequencies and positions of the receiver toroidal coils. Characteristic features of the signals were revealed depending on the resistivity contrast and reservoir thickness at various well deviation angles.

Resistivity logging; toroidal coils; numerical simulation; deviated well; electrical resistivity

ВВЕДЕНИЕ

Гальванические и электромагнитные зондирования в скважинах широко используются по всему миру для оценки петрофизических свойств нефтегазовых коллекторов. В то же время каротаж с применением менее традиционных источников и приемников сигналов – тороидальных катушек – позволяет решать множество промыслово-геофизических задач и информационно дополняет результаты гальванических и электромагнитных исследований [Михайлов и др., 2021]. Первый в России каротажный прибор с тороидальными катушками (ЗЭТ) создан в рамках научно-технической коллаборации ИНГГ СО РАН и НПП ГА «Луч» [Эпов и др., 2018а]. Выполнено математическое обоснование многокатушечного многочастотного мультирежимного зонда ЗЭТ [Эпов и др., 2018б], по результатам которого выбрана его оптимальная конфигурация: металлический немагнитный корпус с двумя генераторными тороидальными катушками на расстоянии 1 м друг от друга и несколькими приемными между ними. Катушки расположены симметрично относительно центра зондовой части длиной 2 м. Операционные частоты: десятки–первые сотни кГц. ЗЭТ характеризуется двумя режимами работы: суммарным (токи в генераторных катушках одинаковы по величине и направлению) и дифференциальным (токи равны, но противоположного направления). Первый режим направлен на изучение распределения геоэлектрических параметров в разрезе, а второй – на выделение границ пластов.

На следующем этапе разработаны специализированные комплексы алгоритмов и программ для двумерного конечно-разностного моделирования, обработки и инверсии сигналов ЗЭТ из разрезов вертикальных скважин [Эпов и др., 2019], а также автоматизированная компьютерная система [Потапов и др., 2018] и методика интерпретации [Эпов и др., 2018а], с применением этих инструментов к полевым каротажным данным [Михайлов и др., 2020].

Вместе с тем чрезвычайно широкое применение сегодня имеют наклонно-направленные нефтегазовые скважины. Зарубежными исследователями предложено несколько аппаратных решений с тороидальными катушками для разрезов наклонных скважин [Prammer et al., 2009; Borghi et al., 2011; Ortenzi et al., 2012]. Однако основной акцент в указанных публикациях делается непосредственно на аппаратуре и получении с ее помощью практических каротажных диаграмм. Что касается всестороннего численного моделирования и анализа сигналов зондов с тороидальными катушками в наклонных скважинах, известны лишь отдельные попытки [Gianzero et al., 1990; Bittar, Hu, 2004].

Исходя из вышесказанного, актуальным представляется изучение сигналов каротажных зондов с тороидальными катушками, и ЗЭТ в частности, при изменении зенитного угла скважины, что и составляет цель представленного исследования.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ ЗЭТ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЗЕНИТНОГО УГЛА СКВАЖИНЫ: ОСОБЕННОСТИ

Для имитации электромагнитных откликов ЗЭТ используется компьютерный алгоритм трехмерного конечно-разностного моделирования с реалистичным описанием зондовой системы: в частности, конечных размеров металлического корпуса и его высокой электропроводности. Прямая задача решается в полной математической постановке при возбуждении электромагнитного поля круговым магнитным током конечного радиуса. Ввиду высокой ресурсоемкости рассматриваемой трехмерной задачи, задействуется кластер НКС-1П Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН. Для ускорения вычислений прямым методом, применяется параллельная версия решателя PARDISO из библиотеки Intel

Math Kernel Library. Это позволяет достигать повышения производительности при решении одной системы линейных алгебраических уравнений примерно в 35 раз [Суролина и др., 2020].

Трехмерное численное моделирование выполнено для двух основных групп геоэлектрических моделей, удельные электрические сопротивления (УЭС) в которых соответствуют нефте-, газо-, нефтеводо- и водонасыщенным коллекторам, а также глинистым и карбонатным отложениям:

1) модели с одной горизонтальной границей (рис. 1). Соотношения УЭС между верхним и нижним полупространствами составляют 1.2–20 раз (диапазон изменения УЭС 5–100 Ом·м);

2) модели с двумя горизонтальными границами (рис. 4): пласт-коллектор конечной толщины во вмещающих породах. Диапазон изменения УЭС такой же, как в первой группе моделей. Толщина коллектора: от 0.5 до 4 м.

Геоэлектрические параметры скважины: радиус – 0.108 м, УЭС – 2 Ом·м. В каждой из моделей зенитный угол скважины θ варьируется от 0 до 80° с шагом 20°.

Моделируемые сигналы: реальная и мнимая составляющие вертикальной компоненты электрического поля ($\text{Re}E_z$ и $\text{Im}E_z$) и тангенциальной компоненты магнитного поля ($\text{Re}H_\phi$ и $\text{Im}H_\phi$). Далее, с целью компактности представления результатов, анализируются диаграммы $\text{Re}E_z$ для частоты 100 кГц и центральной приемной катушки 0.0 м, в целом демонстрирующие основные особенности сигналов ЗЭТ при изменении зенитного угла скважины.

РЕЗУЛЬТАТЫ В МОДЕЛЯХ С ОДНОЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ГРАНИЦЕЙ

В рамках первой группы моделей (рис. 1) анализируется влияние на сигналы ЗЭТ зенитного угла скважины при разной электрической контрастности между верхним и нижним полупространствами, при этом УЭС верхнего фиксировано и составляет $\rho_1 = 5$ Ом·м.

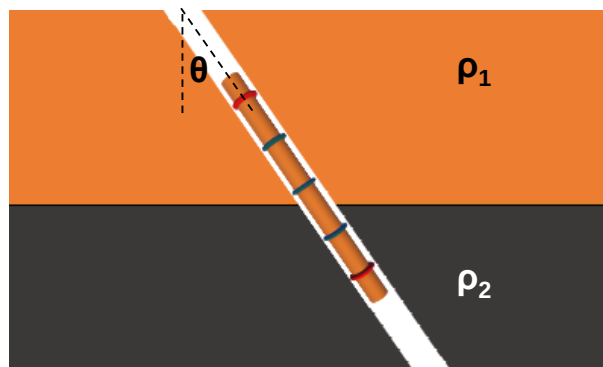


Рис. 1. Геоэлектрическая модель с одной горизонтальной границей, пересеченная наклонной скважиной с ЗЭТ

Из анализа диаграмм суммарного режима ЗЭТ (рис. 2) следует, что с увеличением зенитного угла скважины от 0 до 80° переход диаграмм от нижней асимптоты к верхней становится более резким для выбранного контраста УЭС; расстояние выхода на верхнюю асимптоту от горизонтальной границы уменьшается с 1.9 до 1.0 м. Что касается нижней асимптоты, то она достигается при расстояниях ≥ 1.3 м (0°), ≥ 1.1 м (40°) и ≥ 0.8 м (80°) от границы, т. е. все быстрее с возрастанием зенитного угла. Асимптотическое значение сигнала в верхнем полупространстве составляет $1.65 \cdot 10^{-4}$ В/м, а в нижнем равно $1.48 \cdot 10^{-4}$, $1.04 \cdot 10^{-4}$, $0.63 \cdot 10^{-4}$, $0.38 \cdot 10^{-4}$, $0.23 \cdot 10^{-4}$ и $0.19 \cdot 10^{-4}$ В/м при контрастностях УЭС 1.2, 2, 4, 8, 16 и 20 соответственно.

При фиксированном угле и с увеличением контрастности от 1.2 до 20, изменяется характер диаграмм суммарного режима при переходе из одной среды в другую, со все большим проявлением асимметрии сигналов относительно границы.

В случае малых и промежуточных зенитных углов (0 и 40°), при переходе ЗЭТ из верхнего полупространства в нижнее, в области границы проявлен локальный минимум при контрасте УЭС ≥ 4 . Отметим также, что если контраст ≥ 2 , то на расстоянии 0.5 м от границы в сторону нижнего полупространства наблюдается локальный максимум сигнала, ввиду особенностей конфигурации зондовой системы с высокопроводящим металлическим корпусом.

В сильнонаклонной скважине (80°) диаграммы в значительной степени выполаживаются: подобных особенностей не наблюдается, и происходит в целом плавный переход сигнала от нижней асимптоты к верхней.

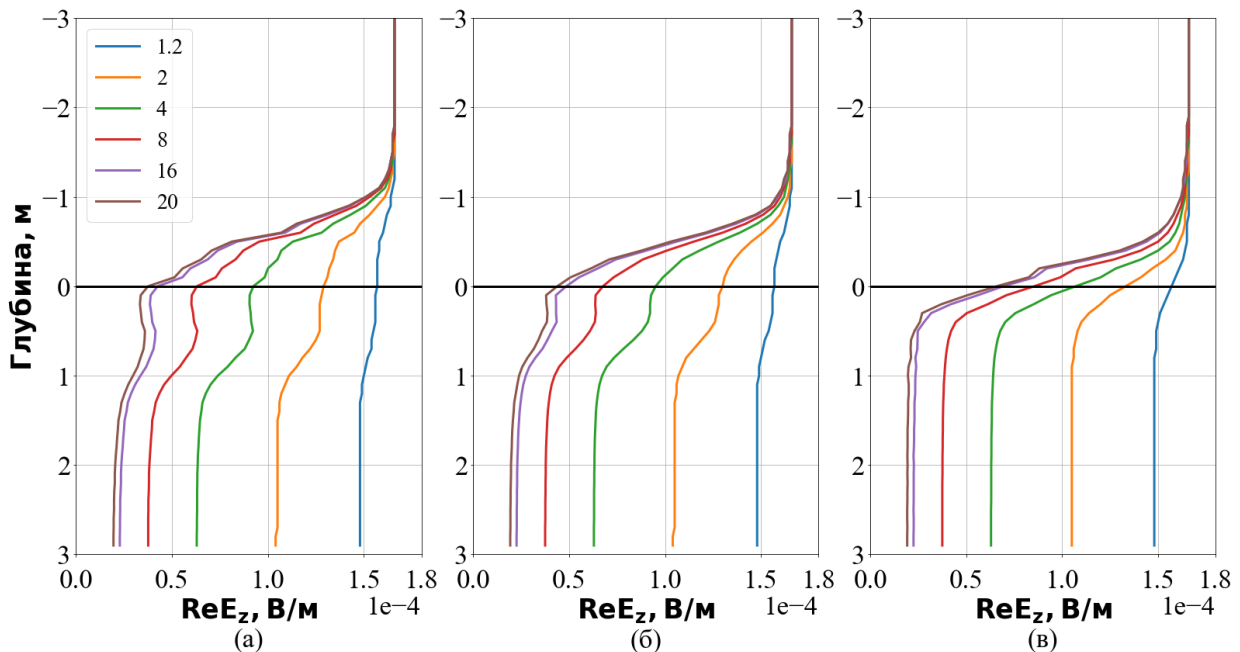


Рис. 2. Реальная составляющая вертикальной компоненты электрического поля в суммарном режиме при разных зенитных углах скважины: а – 0°; б – 40°; в – 80°. Граница между полупространствами расположена на глубине 0 м. Легенда – контраст УЭС между полупространствами

У сигналов в дифференциальном режиме ЗЭТ (рис. 3) выделяется по одному максимуму в каждом полупространстве в пределах 0.5 м от границы. Значение экстремума в более проводящем верхнем полупространстве выше, чем у экстремума в нижнем с меньшей электропроводностью. Помимо этого, вблизи границы проявлен минимум сигнала. Исключение составляет случай зенитного угла 80° при контрастности УЭС 1.2, где эти закономерности не прослеживаются.

Увеличение электрического контраста между полупространствами приводит ко все большей асимметрии диаграмм дифференциального режима ЗЭТ относительно горизонтальной границы.

При росте угла от 0 до 80° усиливается локальность экстремумов по обе стороны от границы: они сдвигаются все ближе к последней. Так, при угле 0° максимумы удалены примерно на 0.5 м, что справедливо для всех рассмотренных контрастов УЭС. При увеличении угла до 40° максимумы смещаются ближе к границе на 0.1–0.2 м и, таким образом, располагаются на расстоянии 0.3–0.4 м от нее.

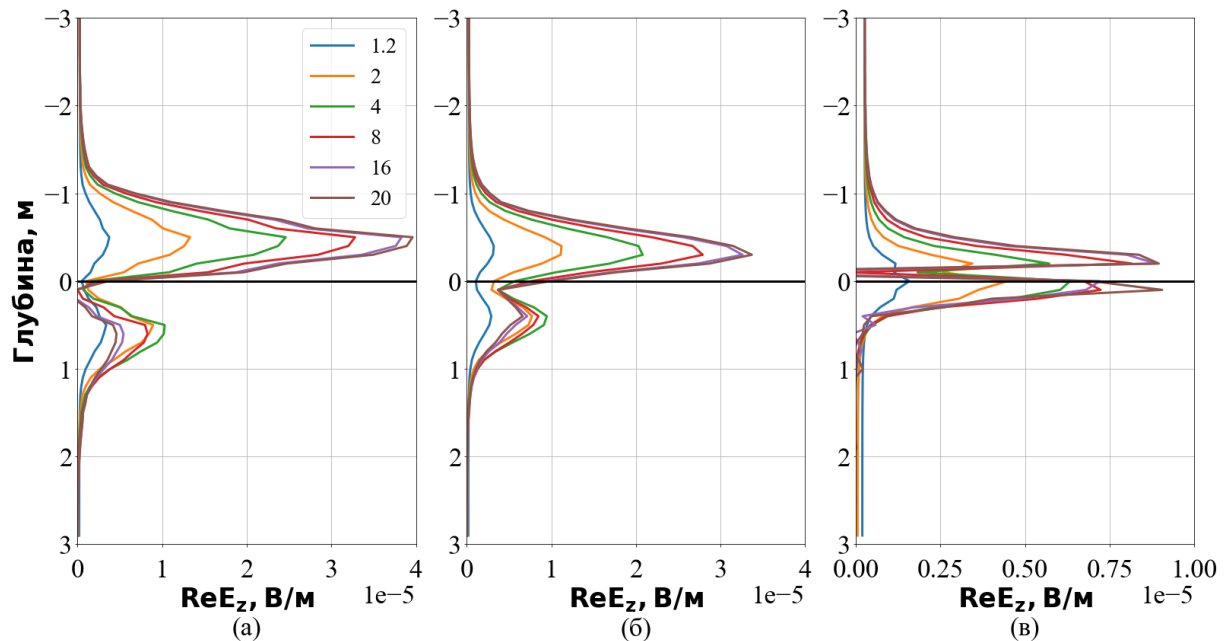


Рис. 3. Реальная составляющая вертикальной компоненты электрического поля в дифференциальном режиме при разных зенитных углах скважины: а – 0° ; б – 40° ; в – 80° . Обозначения см. на рис. 2

В свою очередь, при 80° кривые становятся близки к квазисимметричным относительно точки перехода через ноль в верхнем полупространстве, которая удалена на 0.1 м выше границы. Для угла 80° при всех контрастах УЭС, за исключением наименьшего 1.2, присутствуют выраженные максимумы сверху и снизу от границы, на расстояниях ≤ 0.2 м и ≤ 0.1 м соответственно.

При зенитных углах 0 и 40° , с повышением электрической контрастности между полупространствами, отношение экстремальных значений сигналов сверху и снизу от границы растет в разы. Так, при 0° отношение изменяется от 1.02 (контраст 1.2) до 9.45 (контраст 20). При 40° аналогичный диапазон лежит в более узких пределах – от 1.1 до 5.8. Рост контрастности УЭС приводит к некоторому смещению минимального значения сигнала в сторону нижней менее проводящей среды – на 0.1–0.2 м. Ситуация ощутимо иная в случае угла 80° и контраста ≥ 8 , где диаграммы переходят через ноль вблизи границы в более проводящей верхней среде.

В целом, с ростом угла, значения сигналов дифференциального режима ЗЭТ в выбранной геоэлектрической модели уменьшаются и не превышают $4 \cdot 10^{-5}$, $3.5 \cdot 10^{-5}$ и 10^{-5} В/м при углах 0° , 40° и 80° соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ В МОДЕЛЯХ С ДВУМЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ ГРАНИЦАМИ

Для выяснения особенностей сигналов ЗЭТ в пластах ограниченной толщины при изменении зенитного угла скважины, проводится анализ сигналов в геоэлектрических моделях с двумя горизонтальными границами (рис. 4). Далее рассматриваются электромагнитные отклики ЗЭТ в модели нефтеводонасыщенного коллектора, заключенного между более проводящими глинистыми отложениями ($\rho_1 = 5$ Ом·м, $\rho_2 = 10$ Ом·м, $\rho_3 = 5$ Ом·м), толщина коллектора $h = 0.5$ –4 м.

Диаграммы суммарного режима (рис. 5) характеризуются инвертированием при углах скважины 0 и 40° и пластах малой толщины (≤ 1 м), что связано с влиянием более проводящих вмещающих пород на сигналы ЗЭТ.

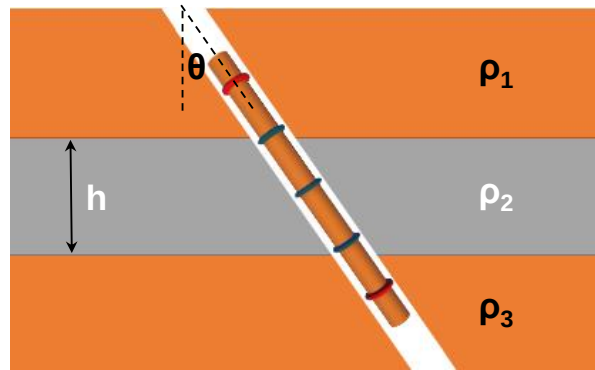


Рис. 4. Геоэлектрическая модель пласта ограниченной толщины, пересеченного наклонной скважиной с ЗЭТ

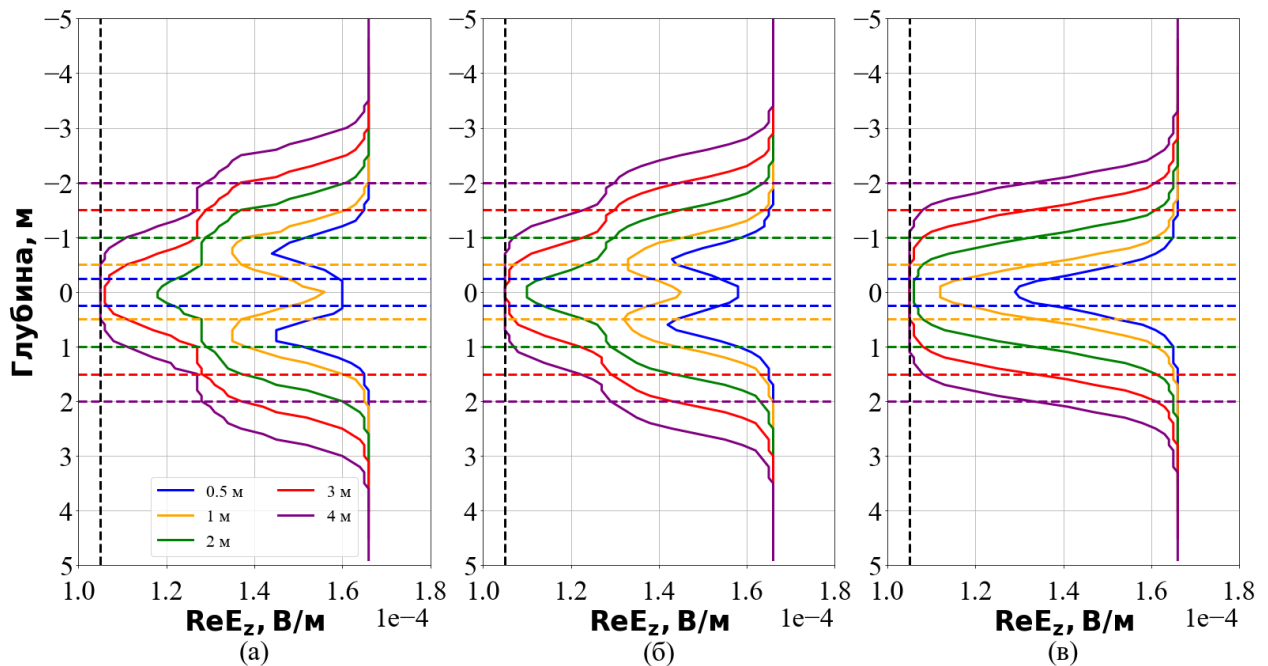


Рис. 5. Реальная составляющая вертикальной компоненты электрического поля в суммарном режиме при разных зенитных углах скважины: а – 0°; б – 40°; в – 80°. Цветным пунктиром показаны границы коллектора, черным пунктиром – асимптотическое значение сигнала в нефтеводонасыщенном коллекторе. Легенда – толщина коллектора

При угле 0° сигнал существенно изменяется с увеличением толщины коллектора от 0.5 до 4 м. В частности, при толщине 0.5 м он достигает минимального значения на расстоянии около 0.5 м над кровлей и под подошвой коллектора. В интервале последнего сигнал имеет максимальные значения. Когда толщина коллектора составляет 1 м, сигнал в целом имеет те же особенности. Однако различие заключается в том, что минимумы сигнала возникают уже на расстоянии 0.2 м выше кровли и ниже подошвы, а максимум посередине более выражен. При толщине пласта 2 м сигнал имеет два локальных минимума, приуроченных к горизонтальным границам, и один минимум, возникающий в середине коллектора. В случае толщин 3 и 4 м, сигналы имеют схожие характеристики. В частности, локальные минимумы появляются напротив горизонтальных границ, тогда как минимумы достигаются на более протяженном участке в центральной части пласта. Сигналы достигают асимптотического значения $1.66 \cdot 10^{-4}$ В/м во вмещающих глинах на расстоянии 1.5–2 м от горизонтальных границ.

Когда зенитный угол равен 40°, диаграммы становятся более сглаженными. Экстремумы,

возникающие вне коллектора при его толщине 0.5 м, сдвигаются ближе к границам на 0.1 м относительно вертикальной скважины. Аналогичная ситуация – при толщине коллектора 1 м, что приводит к расположению этих экстремумов непосредственно на границах. Точки выхода на асимптоту при представленных толщинах коллектора перемещаются в сторону границ также на 0.1 м.

Когда угол достигает 80° , все диаграммы сильно сглаживаются и принимают более простой вид. Минимальные значения отмечаются в интервале коллектора, при этом никаких других экстремумов не возникает. Кроме того, в отличие от случаев при 0 и 40° , сигнал практически достигает асимптотического значения в коллекторе уже при толщине последнего в 2 м. Во вмещающих же породах асимптота ($1.66 \cdot 10^{-4}$ В/м) достигается на расстоянии не более 1.5 м от горизонтальных границ. В целом, с увеличением зенитного угла от 0 до 80° , сигналы принимают значения, все более близкие к асимптотическим в коллекторе ограниченной толщины ($1.05 \cdot 10^{-4}$ В/м).

Стоит отдельно отметить симметрию всех представленных сигналов суммарного режима относительно центра геоэлектрической модели из-за симметрии как модели, так и выбранной каротажной системы, независимо от зенитного угла. Кроме того, эти сигналы в интервале коллектора становятся меньше с увеличением толщины последнего. Это обусловлено ослаблением влияния вмещающих глин и увеличением вклада от менее проводящего нефтеводонасыщенного коллектора.

В отношении диаграмм дифференциального режима (рис. 6) можно заметить, что они существенно отличны от только что рассмотренных. Прежде всего, обращает на себя внимание пересечение всех диаграмм в центре пласта, вне зависимости от его толщины и угла скважины. Значение сигнала как в точке пересечения, так и на асимптоте во вмещающих породах нулевое, ввиду противоположных моментов генераторных катушек и расположения приемной катушки посередине между ними. Тип симметрии диаграмм дифференциального режима относительно центра модели принципиально иной по сравнению с суммарным.

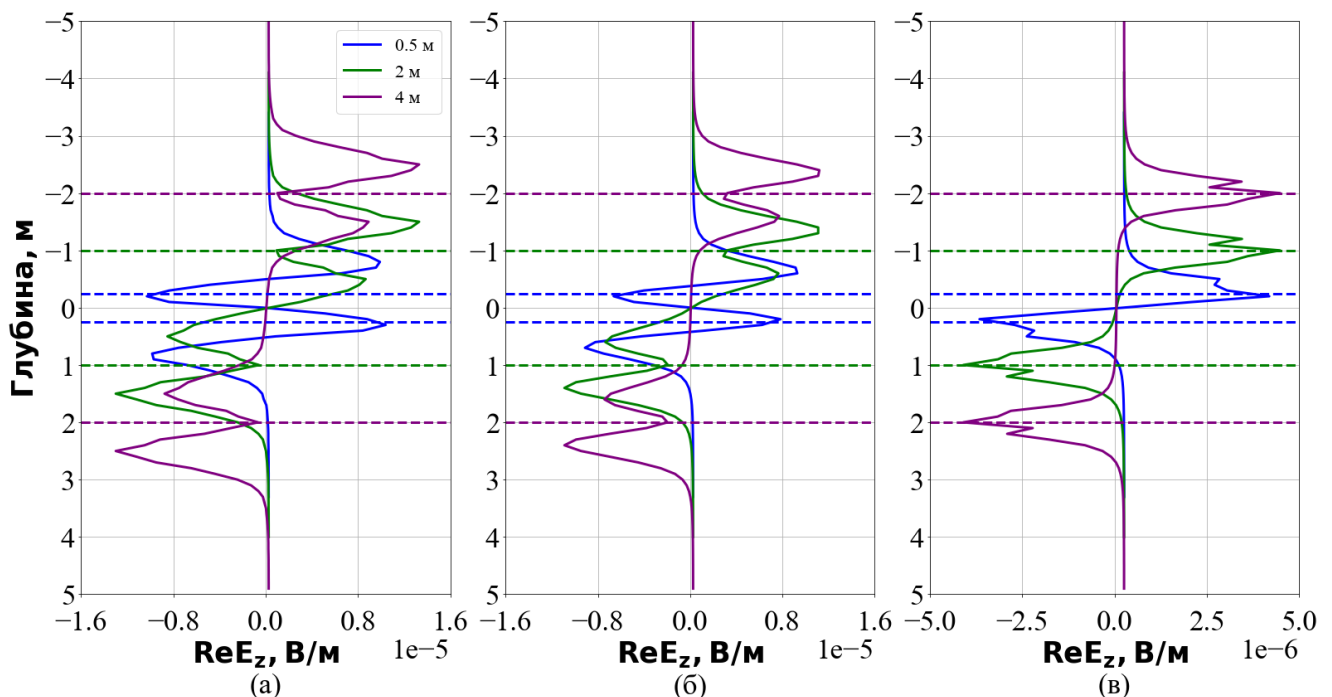


Рис. 6. Реальная составляющая вертикальной компоненты электрического поля в дифференциальном режиме при разных зенитных углах скважины. Обозначения см. на рис. 5

В вертикальной скважине, при любой толщине пласта, существуют максимумы и минимумы, удаленные на 0.5 м выше и ниже горизонтальных границ, ввиду перехода тороидальных катушек на металлическом корпусе через границы. При возрастании угла до 40°, амплитуда экстремумов уменьшается; других значительных изменений диаграмм не происходит.

Увеличение угла скважины до 80° при любой толщине коллектора приводит к исчезновению выраженных экстремумов вокруг горизонтальных границ: остается один максимум непосредственно напротив кровли коллектора и минимум на его подошве. Дополнительно прослеживается маловыраженный экстремум на 0.2 м выше кровли и ниже подошвы соответственно.

С ростом зенитного угла от 0 до 80°, максимальные значения сигналов дифференциального режима по модулю уменьшаются. Диапазоны их изменения для рассматриваемой геоэлектрической модели при этом составляют: $\leq 1.33 \cdot 10^{-5}$ В/м (0°), $\leq 1.12 \cdot 10^{-5}$ В/м (40°) и $\leq 4.48 \cdot 10^{-6}$ В/м (80°).

Итак, из результатов проведенного ресурсоемкого трехмерного численного моделирования следует, что сигналы ЗЭТ как в суммарном, так и в дифференциальном режиме отчетливо зависят от изменения как электрической контрастности разреза и толщины коллектора, так и зенитного угла скважины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием разработанного конечно-разностного алгоритма трехмерного моделирования сигналов электромагнитного зонда с тороидальными катушками ЗЭТ и вычислительных ресурсов Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН рассчитаны электромагнитные отклики в геоэлектрических разрезах, вскрытых вертикальными и наклонными скважинами. Сигналы обладают выраженной чувствительностью как к электрически контрастным границам, так и к зенитному углу скважины. В обоих режимах ЗЭТ сигналы из вертикальных и наклонных скважин существенно различаются друг от друга, что открывает путь к решению задач геонавигации и оценке петрофизических свойств пласта из наклонных скважин.

В продолжение данной работы, целесообразно трехмерное моделирование сигналов ЗЭТ в более сложных разрезах сильнонаклонных скважин, а также в горизонтальных стволах, включая обратное соотношение электросопротивлений между пластом и вмещающими породами, электрическую анизотропию, зону проникновения фильтрата бурового раствора и высокопроводящие биополимерные растворы.

Научные исследования выполнены при поддержке РФФИ (проект № 19-05-00595).

ЛИТЕРАТУРА

Михайлов И.В., Велесов Д.В., Глинских В.Н. Изучение тонкослоистых коллекторов с применением тороидальных источников и приемников (на примере Приобского нефтяного месторождения) // Геофизические технологии. – 2020. – № 1. – С. 16–27, doi: 10.18303/2619-1563-2020-1-16.

Михайлов И.В., Глинских В.Н., Никитенко М.Н. Применение тороидальных катушек в задачах каротажа нефтегазовых скважин (аналитический обзор) // Геофизические исследования. – 2021. – Т. 22, № 1. – С. 5–24, doi: 10.21455/gr2021.1-1.

Потапов В.В., Эпов М.И., Суродина И.В., Никитенко М.Н., Глинских В.Н., Михайлов И.В. Автоматизированная система обработки и интерпретации данных электромагнитного зонда с тороидальными катушками (ZET) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. – 2018. – № 2018616171.

Суродин И.В., Михайлов И.В., Глинских В.Н. Математическое моделирование сигналов тороидального источника в трехмерных изотропных моделях геологических сред // *Естественные и технические науки*. – 2020. – № 12. – С. 131–134, doi: 10.25633/ETN.2020.12.17.

Эпов М.И., Глинских В.Н., Еремин В.Н., Михайлов И.В., Никитенко М.Н., Осипов С.В., Петров А.Н., Суродин И.В., Яценко В.М. Новый электромагнитный зонд для высокоразрешающего каротажа: от теоретического обоснования до скважинных испытаний // *Нефтяное хозяйство*. – 2018а. – № 11. – С. 23–27, doi: 10.24887/0028-2448-2018-11-23-27.

Эпов М.И., Никитенко М.Н., Глинских В.Н. Математическое обоснование нового электромагнитного зонда с тороидальными катушками для высокоразрешающего каротажа нефтегазовых скважин // *Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии*. – 2018б. – Т. 16, № 1. – С. 113–129, doi: 10.25205/1818-7900-2018-16-1-113-129.

Эпов М.И., Михайлов И.В., Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Суродин И.В. Алгоритмы обработки и инверсии данных электромагнитного зонда с тороидальными катушками при изучении макроанизотропных свойств пластов-коллекторов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330, № 6. – С. 187–197, doi: 10.18799/24131830/2019/6/2139.

Bittar M.S., Hu G. The effects of rock anisotropy on LWD toroidal resistivity sensors // *SPWLA 45th Annual Logging Symposium (June 6–9, 2004)*. – Noordwijk, Netherlands, 2004. – Paper SPWLA-2004-WW.

Borghi M., Piani E., Barbieri E., Dubourg I., Ortenzi L., van Os R. New logging-while-drilling azimuthal resistivity and high resolution imaging in slim holes // *10th Offshore Mediterranean Conference and Exhibition (March 23–25, 2011)*. – Ravenna, Italy, 2011. – Paper OMC-2011-167.

Gianzero S., Chemali R., Su S.-M. Induction, resistivity, and MWD tools in horizontal wells // *The Log Analyst*. – 1990. – Nos. 5–6. – P. 158–171.

Ortenzi L., Dubourg I., van Os R., Han S.Y., Koepsell R., Ha S.C.Y. New azimuthal resistivity and high-resolution imager facilitates formation evaluation and well placement of horizontal slim boreholes // *Petrophysics*. – 2012. – Vol. 53 (3). – P. 197–207.

Prammer M., Morys M., Knizhnik S., Conrad C., Hendricks W., Bittar M., Hu G., Hveding F., Kenny K., Shokeir R., Seifert D., Neymann P., Al-Dossari S. A high-resolution LWD resistivity imaging tool – field testing in vertical and highly deviated boreholes // *Petrophysics*. – 2009. – Vol. 50 (1). – P. 49–66.

REFERENCES

Bittar M.S., Hu G. The effects of rock anisotropy on LWD toroidal resistivity sensors // *SPWLA 45th Annual Logging Symposium (June 6–9, 2004)*. – Noordwijk, Netherlands, 2004. – Paper SPWLA-2004-WW.

Borghi M., Piani E., Barbieri E., Dubourg I., Ortenzi L., van Os R. New logging-while-drilling azimuthal resistivity and high resolution imaging in slim holes // *10th Offshore Mediterranean Conference and Exhibition (March 23–25, 2011)*. – Ravenna, Italy, 2011. – Paper OMC-2011-167.

Epov M.I., Glinskikh V.N., Eremin V.N., Mikhaylov I.V., Nikitenko M.N., Osipov S.V., Petrov A.N., Surodin I.V., Yatsenko V.M. New electromagnetic tool for high-resolution logging: from theoretical substantiation to downhole testing // *Oil Industry*. – 2018а. – No. 11. – P. 23–27.

Epov M.I., Nikitenko M.N., Glinskikh V.N. Mathematical substantiation of a new electromagnetic tool with toroidal coils for high-resolution logging of oil and gas wells // *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*. – 2018b. – Vol. 16 (1). – P. 113–129.

- Epov M.I., Mikhaylov I.V., Glinskikh V.N., Nikitenko M.N., Surodina I.V.** Algorithms of data processing and inversion for an electromagnetic tool with toroidal coils when studying macroanisotropic properties of reservoirs // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. – 2019. – Vol. 330 (6). – P. 187–197.
- Gianzero S., Chemali R., Su S.-M.** Induction, resistivity, and MWD tools in horizontal wells // The Log Analyst. – 1990. – Nos. 5–6. – P. 158–171.
- Mikhaylov I.V., Glinskikh V.N., Nikitenko M.N.** Application of toroidal coils in oil and gas well logging problems (analytical review) // Geophysical Research. – 2021. – Vol. 22 (1). – P. 5–24.]
- Mikhaylov I.V., Velesov D.V., Glinskikh V.N.** Study of thin-layered reservoirs with toroidal sources and receivers (on the example of the Priobskoye oil field) // Russian Journal of Geophysical Technologies. – 2020. – No. 1. – P. 16–27.
- Ortenzi L., Dubourg I., van Os R., Han S.Y., Koepsell R., Ha S.C.Y.** New azimuthal resistivity and high-resolution imager facilitates formation evaluation and well placement of horizontal slim boreholes // Petrophysics. – 2012. – Vol. 53 (3). – P. 197–207.
- Potapov V.V., Epov M.I., Surodina I.V., Nikitenko M.N., Glinskikh V.N., Mikhaylov I.V.** Automated system for processing and interpreting data of the electromagnetic tool with toroidal coils (ZET) // Certificate of state registration of a computer program. – 2018. – No. 2018616171.
- Prammer M., Morys M., Knizhnik S., Conrad C., Hendricks W., Bittar M., Hu G., Hveding F., Kenny K., Shokeir R., Seifert D., Neymann P., Al-Dossari S.** A high-resolution LWD resistivity imaging tool – field testing in vertical and highly deviated boreholes // Petrophysics. – 2009. – Vol. 50 (1). – P. 49–66.
- Surodina I.V., Mikhaylov I.V., Glinskikh V.N.** Mathematical modeling of toroidal source signals in three-dimensional isotropic earth models // Natural and Technical Sciences. – 2020. – No. 12. – P. 131–134.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

МИХАЙЛОВ Игорь Владиславович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: численное моделирование и инверсия данных электрокаротажа, нефтепромысловая геофизика, петрофизика.

СУРОДИНА Ирина Владимировна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории вычислительных задач геофизики Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН. Основные научные интересы: математическое моделирование задач каротажа и наземного зондирования, разработка параллельных алгоритмов и программ для GPU.

ТЕМИРБУЛАТОВ Олег Павлович – бакалавр геологии геолого-геофизического факультета НГУ. Основные научные интересы: численное моделирование данных электрокаротажа.

*Статья поступила в редакцию 28 октября 2021 г.,
принята к публикации 15 ноября 2021 г.*