



СИГНАЛЫ МНОГОЗОНДОВОГО ИНДУКЦИОННОГО И ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА В ПЛАСТАХ С ОКАЙМЛЯЮЩЕЙ ЗОНОЙ

К.В. Сухорукова, С.В. Ананьев, А.М. Петров, О.В. Нечаев

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

Окаймляющая зона пониженного УЭС, возникающая вблизи скважины в связи с оттеснением пластовых флюидов фильтратом бурового раствора, является надежным признаком наличия в пласте-коллекторе подвижной нефти. При анализе практических данных электрокаротажа оценка параметров окаймляющей зоны возможна по данным высокочастотного индукционного каротажа. При интерпретации практических данных других методов ее влияние на сигналы обычно не учитывается. В работе рассматриваются результаты численного моделирования сигналов зондов аппаратуры 5ИК и ВИКИЗ, обосновывающие возможность выявления окаймляющей зоны по данным многозондового низкочастотного индукционного каротажа в условиях, характерных для меловых коллекторов смешанного насыщения Имилорского месторождения.

Терригенный коллектор, геоэлектрическая модель, окаймляющая зона, многозондовый индукционный каротаж, высокочастотный индукционный каротаж, двумерное моделирование, синтетические сигналы

MULTI-PROBE LOW-FREQUENCY INDUCTION LOG AND HIGH-FREQUENCY INDUCTION LOG IF THE RESERVOIR CONTAINS THE LOW RESISTIVITY ANNULUS ZONE

K.V. Sukhorukova, S.V. Ananjev, A.M. Petrov, O.V. Nechaev

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

A low resistivity annulus appearing near the well due to reservoir fluid displacement by mud filtrate is a reliable indicator of movable oil presence in the reservoir. In practical cases estimation of low resistivity annulus parameters is possible based on high-frequency induction logging data analysis. When interpreting practical data of other resistivity logging methods its influence on signals is usually not taken into account. The paper discusses the results of the 5IK and VIKIZ logs numerical simulation which substantiate the possibility of identifying low resistivity annulus according to multi-probe low-frequency induction logging in geoelectric conditions typical for the Cretaceous mixed-saturation reservoirs of the Imilorskoye oilfield.

Terrigenous formation, geoelectrical model, annulus zone, multi-probe induction logging, high-frequency induction logging, numerical simulation, simulated signals

ВВЕДЕНИЕ

Как известно по опыту применения высокочастотного электромагнитного каротажного зондирования (ВЭМКЗ или ВИКИЗ), данные этого метода чувствительны к наличию в коллекторах смешанного насыщения окаймляющей зоны или зоны скопления минерализованной пластовой воды

[Антонов и др., 2012]. Окаймляющая зона (ОЗ) формируется в результате фильтрации бурового раствора во время и после бурения между зоной проникновения (ЗП), насыщенной пресным фильтратом бурового раствора, и неизменной частью коллектора с исходным соотношением нефти и воды [Пирсон, 1966]. Эта цилиндрическая зона с повышенной по сравнению с неизменной частью и ЗП электропроводностью проявляется на кривой зондирования ВИКИЗ (зависимость кажущегося удельного электрического сопротивления от длины зонда) характерным прогибом в области зондов средней длины [Технология..., 2000; Эпов и др., 2010]. Однако следует ожидать, что вклад окаймляющей зоны может быть существенным и для других зондов, формирующих в окружающей скважину среде систему круговых токов. К таковым относится любой зонд индукционного каротажа с катушками, моменты которых соосны скважине. Особенную актуальность вопросу о возможном влиянии ОЗ на сигналы придает распространение приборов многозондового индукционного каротажа 5ИК и 4ИК.

Чаще всего зонд ИК содержит две генераторные катушки и одну приемную. В настоящее время широко применяются четырехзондовые и пятизондовые приборы индукционного каротажа (серии ИКЗ-2, 4ИК, 5ИК и др.). В пятизондовые приборы фирмы "Нефтегазгеофизика" (далее – 5ИК) добавлен короткий зонд ЗИО.3 с базой 30 см для повышения информативности аппаратуры в ближней зоне исследования [Рудяк и др., 2013]. Например, пятизондовый прибор 5ИК-Т-76 содержит пять трехкатушечных зондов разной длины (от 0.3 до 2.05 м), каждый из которых включает одну измерительную катушку и две генераторные (основную и компенсационную), работающие на одной частоте 100 кГц. За рубежом применяются приборы многозондового индукционного каротажа, например, приборы АIT-B, АIT-N семейства АIT (Array Induction Imager Tool), содержащие 8 трехкатушечных зондов, работающих на частотах 25, 50 или 100 кГц, с одной общей генераторной катушкой и двумя измерительными, расстояние между которыми варьируется от 6 дюймов до 6 футов (~0.15–1.83 м) [Anderson, 2001]. Индукционный каротаж, как низкочастотный, так и высокочастотный, широко применяется для изучения средней и удаленной зон прискважинной области коллекторов, и, при комплексировании с методами постоянного тока (боковое каротажное зондирование – БКЗ, боковой каротаж – БК), позволяет получить наилучшее представление о геологическом разрезе [Кнеллер, Потапов, 2010; Дворкин и др., 2012]. Основные цели использования индукционного каротажа – определение кажущейся удельной электрической проводимости неизменной части пласта и зоны проникновения, а также глубины зоны проникновения [Методическое руководство..., 2006; Рудяк и др., 2013].

Низкая частота зондов ИК определяет достаточно сильное сглаживание сигналов ввиду много большей области среды, формирующей измеряемый сигнал, чем в случае зондов ВЭМКЗ, частоты которых в 10–100 раз больше (от 0.875 до 14 МГц). Разрешающую способность сигналов ИК искусственно повышают специальными алгоритмами обработки, особенности которых не раскрываются авторами. Обычно при анализе сигналов ИК в виде кажущегося сопротивления, в том числе и после дополнительной обработки, влияние ОЗ практически не заметно, особенно если сравнивать с сигналами ВИКИЗ [Сухорукова и др., 2019; Erov et al., 2020]. Однако при их совместной инверсии с данными БКЗ оказывается невозможно подобрать модель с одной измененной зоной для коллекторов смешанного насыщения. По этой причине следует рассмотреть более сложное строение измененной прискважинной области, и прежде всего исследовать влияние окаймляющей зоны на сигналы 5ИК.

Исследование основано на анализе синтетических сигналов, рассчитанных в модели коллектора, состоящей из зоны проникновения, окаймляющей зоны и неизменной части и типичной для пористых меловых песчаных отложений Широтного Приобья со смешанным насыщением нефтью и пластовой водой.

Для расчета сигналов ВИКИЗ и 5ИК в исследуемых моделях использовался комплекс численного моделирования и инверсии данных электрокаротажа AlondraWL (ИНГГ СО РАН). Основой комплекса являются представленные в работах [Эпов и др., 2007; Нечаев, Глинских, 2017; Петров и др., 2019а, б] конечно-элементные алгоритмы для моделирования сигналов ВИКИЗ, БКЗ, БК и ИК в вертикальных скважинах в классе двумерных (2D) геоэлектрических моделей. В модели можно задать произвольное количество слоев и радиальных зон и их электрических параметров в очень широких пределах, анизотропию УЭС (влияющую на сигналы БКЗ) и диэлектрическую проницаемость (влияющую на сигналы ВИКИЗ). При моделировании сигналов учитываются корпус прибора и неровности стенки скважины.

Алгоритмы моделирования верифицированы сравнением с другими известными алгоритмами и апробированы при обработке практических данных. В состав пакета входят модули для моделирования и инверсии сигналов БКЗ, ВИКИЗ, ИК и БК, однако в рамках данного исследования проводилось моделирование только данных ВИКИЗ и многозондового ИК.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ 5ИК И ВЭМКЗ В МОДЕЛИ КОЛЛЕКТОРА СМЕШАННОГО НАСЫЩЕНИЯ

Для оценки влияния низкоомной окаймляющей зоны на сигналы зондов ВИКИЗ и 5ИК в ходе исследования проведено их численное моделирование в программном комплексе Alondra WL в типичных геоэлектрических моделях меловых коллекторов Имилорского месторождения Западной Сибири.

Пример данных ВИКИЗ, БКЗ и 5ИК (четыре зонда из пяти), измеренных в вертикальной скважине Имилорского месторождения (Широтное Приобье) на интервале коллектора со смешанным насыщением, приведен на рис. 1. Здесь же показаны данные других методов ГИС: гамма-каротажа (ГК), нейтронного каротажа (НКт), потенциала самополяризации (ПС), микробокового (МБК), микроградиент (МГЗ) и микропотенциал (МПЗ) зондов и бокового каротажа (БК). На интервале глубин $\times\times 87.2\text{--}\times\times 90.1$ м по результатам совместной двумерной инверсии данных БКЗ и ВИКИЗ (зонды DF05–DF20) определено характерное для смешанного насыщения радиальное распределение УЭС – высокое–низкое–высокое, соответствующее зоне проникновения, окаймляющей зоне и неизменной части пласта. В среднем для меловых и юрских отложений Широтного Приобья для коллекторов со смешанным насыщением характерны УЭС от 5 до 30 Ом·м, толщины зон (ЗП и ОЗ) от 0.2 до 0.6 м, УЭС ЗП от 10 до 40 Ом·м, УЭС ОЗ от 3–4 до 6–7 Ом·м, УЭС глинистых отложений – перекрывающих и подстилающих коллектор пород – от 4 до 8–10 Ом·м.

Для численного анализа выбраны следующие параметры модели (рис. 2). УЭС перекрывающих и подстилающих коллектор пластов 8 Ом·м, толщины ЗП и ОЗ 0.3 м, УЭС блоков в коллекторе 20 (ЗП), 4 (ОЗ) и 12 (пласт) Ом·м, радиус скважины 0.108 м, УЭС бурового раствора 1 Ом·м. Толщина коллектора меняется от 0.5 до 3.0 м. Для сравнения рассчитываются также сигналы в модели без ОЗ, с теми же параметрами ЗП и неизменной части пласта. Зонды ВИКИЗ и 5ИК генерируют токи только в горизонтальной плоскости, поэтому для расчета сигналов не задается вертикальное УЭС, хотя для глинистых отложений и характерна электрическая анизотропия.

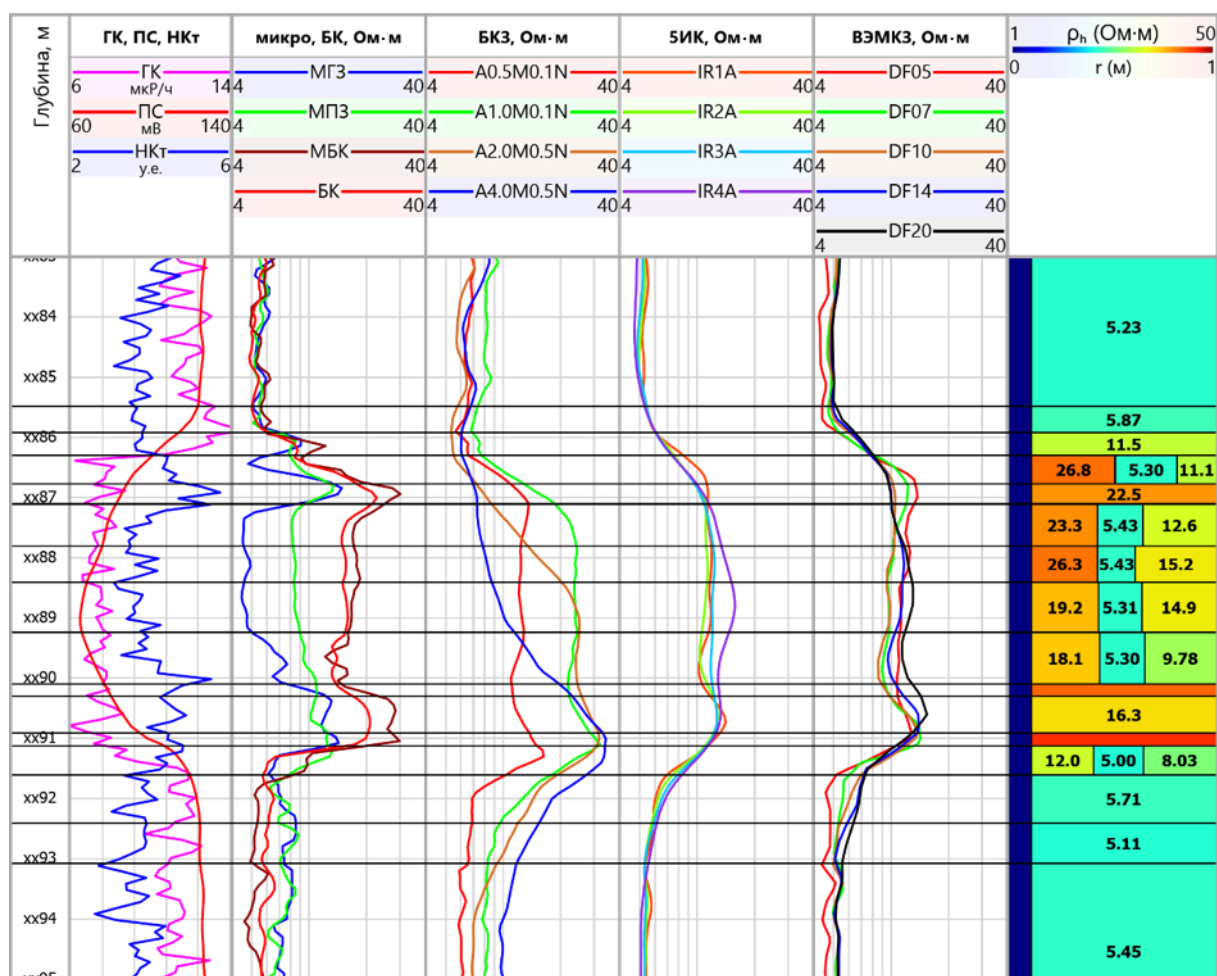


Рис. 1. Практические данные ГИС, полученные на Имилорском месторождении. Справа – цветное изображение геоэлектрической модели, полученной при совместной 2D инверсии данных БКЗ и ВИКИЗ: горизонтальное УЭС пластов и измененных фильтрацией бурового раствора зон (значения УЭС подписаны на блоках модели)

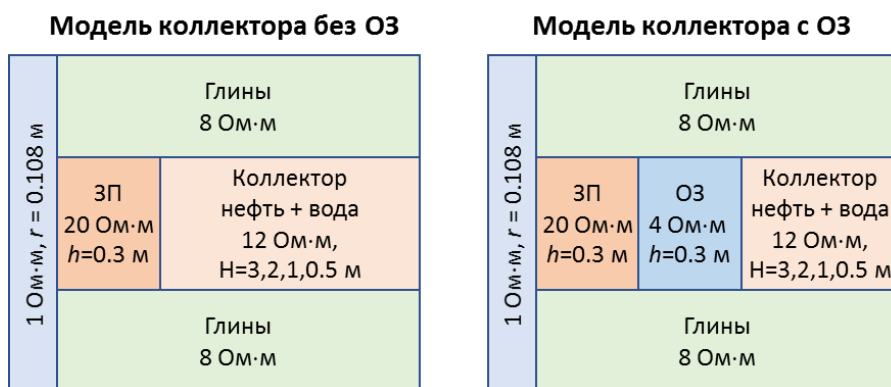


Рис. 2. Модели, используемые при численном моделировании сигналов зондов ВИКИЗ

СИГНАЛЫ ЗОНДОВ ВИКИЗ В МОДЕЛЯХ КОЛЛЕКТОРОВ С ОЗ И БЕЗ НЕЕ

На рисунке 3 представлены диаграммы кажущегося УЭС (ρ_k) для зондов ВИКИЗ в моделях коллекторов без ОЗ и с ОЗ с различной мощностью пронизываемого пласта.

Рассчитанные значения ρ_k уменьшаются по мере увеличения длины зонда, что обусловлено как радиальным распределением УЭС, так и влиянием вмещающих пластов более низкого УЭС. В интервале

пласта значение ρ_k для каждого зонда начинает снижаться под влиянием вмещающих пластов только при толщине коллектора, близкой к длине зонда. Сигнал короткого зонда DF05 не выходит на значение УЭС ЗП вследствие небольшой ее толщины. Значения ρ_k , определяемые наиболее длинным зондом DF20, при всех рассматриваемых значениях толщины проницаемого пласта наиболее близки к значению УЭС его неизменной части (12 Ом·м), выходят на него в нижней трети пласта при толщине 3 м и уменьшаются до 10 Ом·м в полуметровом пласте. То есть при всех значениях толщины пласта с повышающей зоной проникновения значения ρ_k с увеличением длины зондов уменьшаются. Исключение – зона под пластом, где монотонность расположения сигналов меняется из-за приближения к проницаемому пласту; характерный интервал изменений – длина зонда.

В модели с окаймляющей зоной на диаграммах ρ_k наблюдается заметное расхождение сигналов зондов разной длины (рис. 3). Наиболее длинному и короткому зондам ВИКИЗ, как и в модели без ОЗ, соответствуют повышенные значения кажущегося УЭС, относительно уровня во вмещающих породах. В случае короткого зонда это обусловлено большим вкладом в его показания повышающей зоны проникновения, чем для более длинных зондов, а в случае длинного зонда – большим вкладом неизменной части пласта. При этом значения ρ_k для короткого зонда ниже, чем в модели без ОЗ, примерно на 3 Ом·м, а для длинного зонда – не превышают 10 Ом·м, т. е. не выходят на УЭС неизменной части ни в одной точке измерения. Зондам средней длины (DF07, DF10 и DF14) соответствуют пониженные значения ρ_k в проницаемом пласте, что является результатом вклада в сигналы низкоомной окаймляющей зоны.

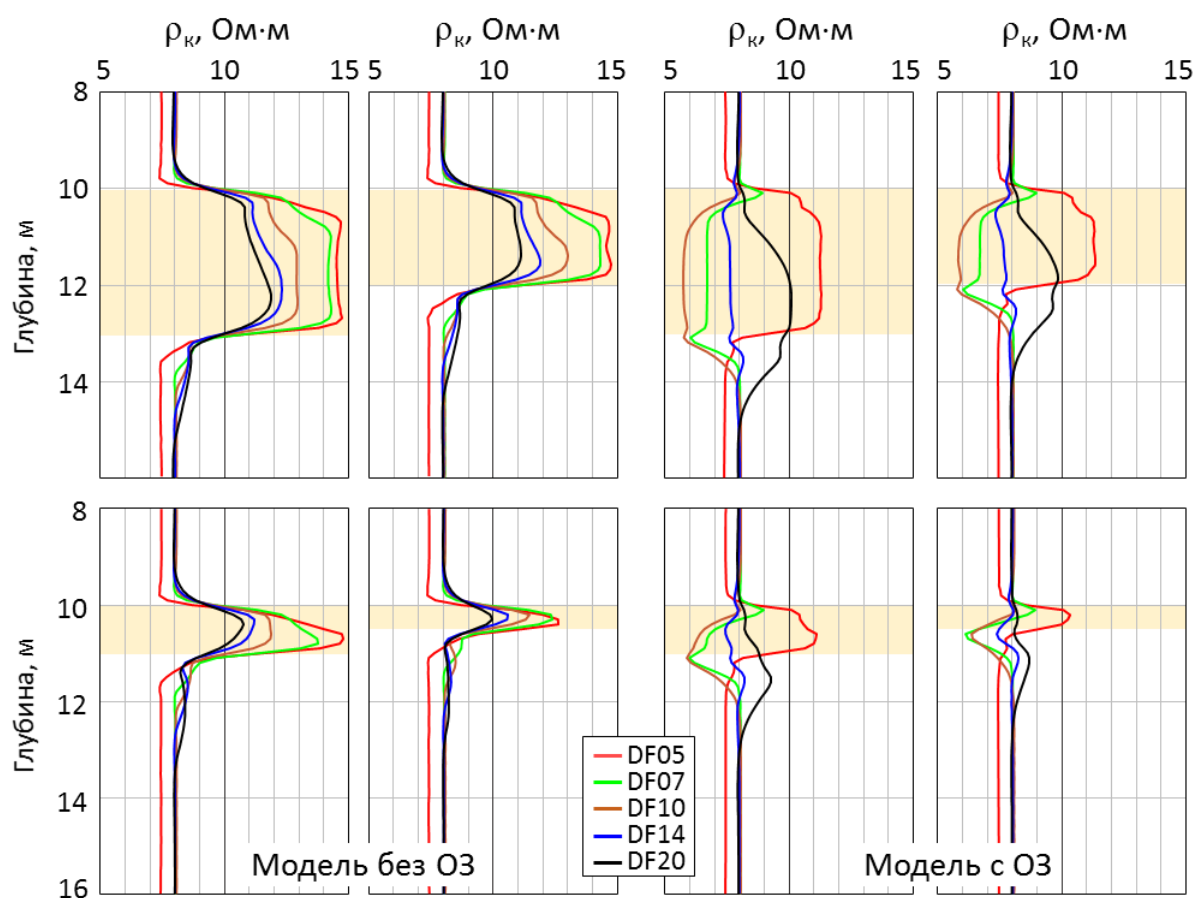


Рис. 3. Кажущееся УЭС для зондов ВИКИЗ (DF05, ..., DF20, число в мнемонике – длина зонда в дм) в моделях коллектора без окаймляющей зоны (слева) и с ней (справа). Толщина проницаемого пласта: 3, 2, 1, 0.5 м. Интервал проницаемого пласта выделен прямоугольной заливкой

Следует отметить достаточно сложные формы полученных в модели с ОЗ сигналов по сравнению с сигналами в модели без ОЗ. В модели без ОЗ границы пласта четко локализируются по точкам пересечения диаграмм, а изменение сигналов при подходе к пласту начинается на расстоянии длины зонда под его подошвой и в одинаковую сторону (повышения для ρ_k). В модели с ОЗ выделение границ оказывается возможным только по диаграмме короткого зонда, а изменение при подходе к подошве пласта происходит как в сторону увеличения ρ_k (наиболее выраженного для длинного зонда), так и в сторону уменьшения (зонды длиной 0.7 и 1.0 м).

При толщине пласта больше 0.5 м на диаграммах можно выделить границы по сигналу короткого зонда, а пластовые отсчеты сигналов образуют вогнутую кривую зондирования, характерную для ВИКИЗ в пласте с окаймляющей зоной. В случае пласта толщиной 0.5 м выделение такого интервала, в котором можно уверенно снять пластовые отсчеты, затруднено вследствие резких изменений сигналов: форму кривой зондирования сложно предсказать, даже если выделить пласт по диаграмме короткого зонда.

Как видно на диаграммах приращения значений кажущегося УЭС ($\Delta\rho_k$) и разности фаз ($\Delta(\Delta\phi)$), в результате добавления окаймляющей зоны наибольшим образом изменяются сигналы средних зондов (рис. 4). Именно в области формирования сигнала зондов длиной 0.7 и 1.0 м окаймляющая зона занимает наибольшую долю по сравнению с остальными: сигнал зонда длиной 0.5 м формируется в зоне проникновения и частично в окаймляющей зоне, а области формирования сигналов зондов длиной 1.4 и 2.0 м уже захватывают неизмененную часть пласта.

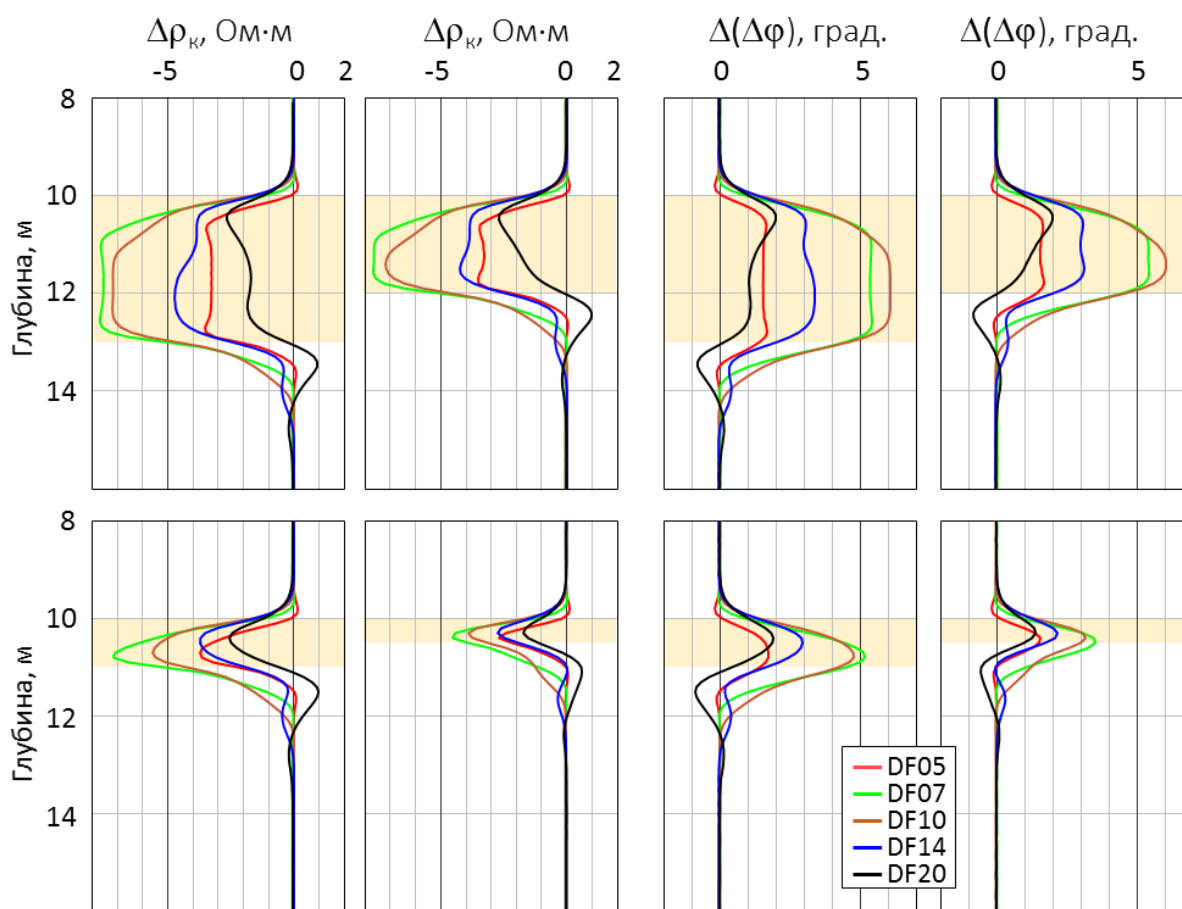


Рис. 4. Диаграммы приращений кажущегося УЭС $\Delta\rho_k$ и разности фаз $\Delta(\Delta\phi)$ для зондов ВИКИЗ (из значений в модели с ОЗ вычтены значения в модели без ОЗ). Толщина проницаемого пласта: 3, 2, 1, 0.5 м. Интервал проницаемого пласта выделен прямоугольной заливкой

Приращения разности фаз целесообразно сравнивать с абсолютной погрешностью измерения, обычно не превышающей в рассматриваемом диапазоне сигналов 0.5° . Из приведенных на рис. 4 диаграмм приращений следует вывод о возможности даже в тонком пласте выявить наличие ОЗ по соотношению сигналов зондов ВИКИЗ разной длины, тем более при их инверсии в классе 2D моделей.

СИГНАЛЫ ЗОНДОВ 5ИК В МОДЕЛЯХ КОЛЛЕКТОРОВ С ОЗ И БЕЗ НЕЕ

В модели коллектора без окаймляющей зоны для прибора 5ИК на диаграммах кажущейся удельной электрической проводимости σ_k наблюдается сильное расхождение сигналов зондов разной длины во вмещающих породах, представляющих собой однородную среду (рис. 5). Это связано с тем, что в отличие от зондов ВЭМКЗ зонды ИК при разной длине работают на одной и той же частоте и для них не выполняется условие изопараметричности.

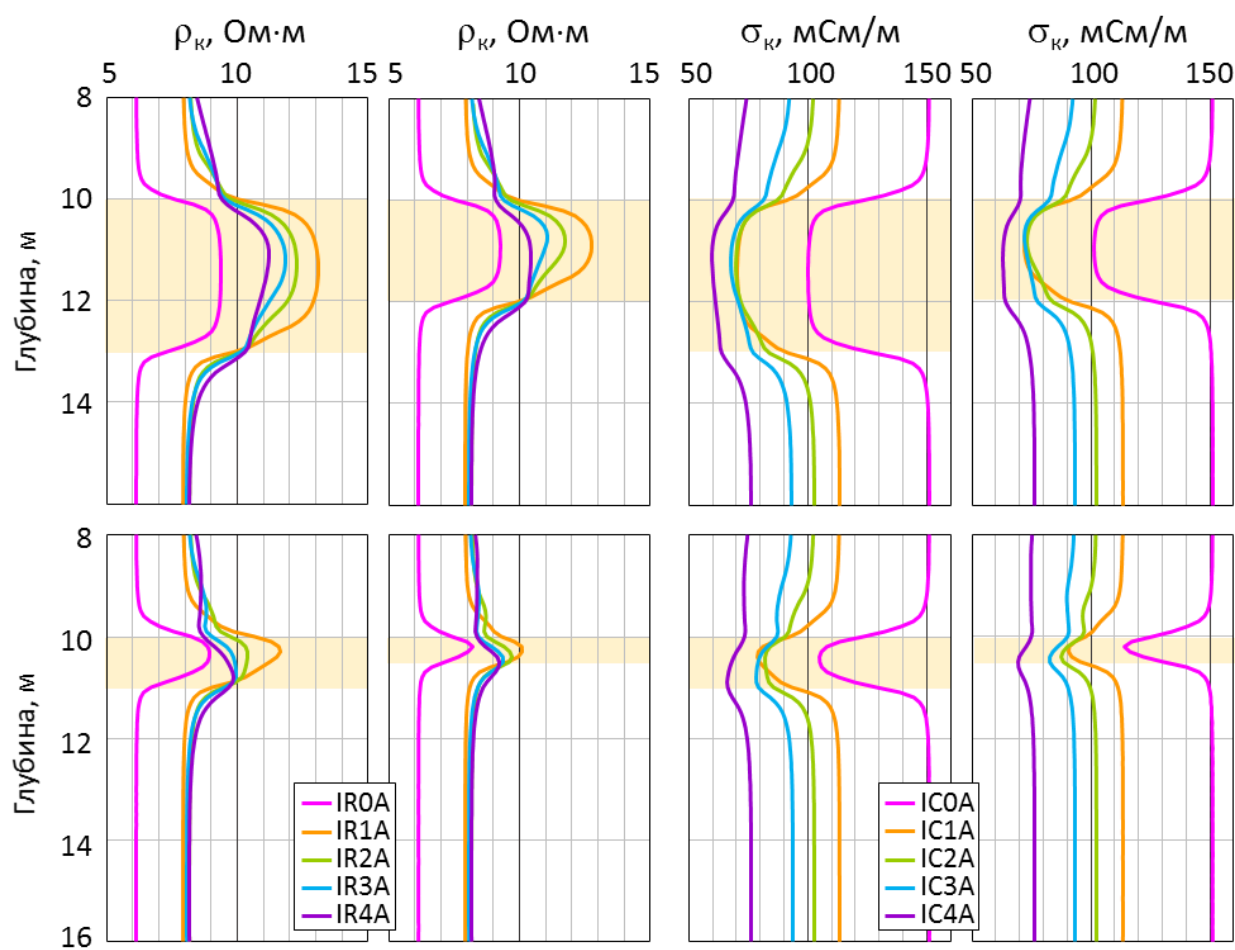


Рис. 5. Кажущееся УЭС (IR0A, ..., IR4A) и кажущаяся электропроводность (IC0A, ..., IC4A) для зондов 5ИК в модели коллектора без окаймляющей зоны. Толщина проницаемого пласта: 3, 2, 1, 0.5 м. Интервал проницаемого пласта выделен прямоугольной заливкой

В проницаемом пласте неглубокая зона проникновения снижает значения σ_k для средних зондов (IC1A, IC2A, IC3A) таким образом, что становится практически одинаковой – около 70 мСм/м. Большие значения, около 100 мСм/м, показывает короткий зонд IC0A, и меньшие, около 60 мСм/м – длинный зонд IC4A.

Изменение значений электропроводности в диапазоне от 60 до 150 мСм/м означает и разную абсолютную погрешность измерения, оцениваемую как $\pm (0.03 \cdot \sigma_k + 1)$ мСм/м [Рудяк и др., 2013]. Для $\sigma_k = 50$ мСм/м абсолютная погрешность составит ± 2.5 мСм/м, для $\sigma_k = 150$ мСм/м – ± 5.5 мСм/м. Следовательно, сигнал короткого зонда измеряется с наибольшей погрешностью, длинного – с наименьшей.

При переводе в кажущееся сопротивление с коррекцией скин-эффекта значения для всех зондов кроме короткого практически совпадают в непроницаемых пластах. Значения ρ_k короткого зонда занижены влиянием скважины с раствором. В проницаемом пласте для зондов IC1A, IC2A, IC3A, IC4A влияние ЗП на значения ρ_k тем больше, чем короче зонд, то есть, за исключением зонда IC0A, распределены в проницаемом пласте таким же образом, что и для ВЭМКЗ. Значения, определяемые длинным зондом IC4A, являются наименьшими, зондом IC1A – наибольшими. Диаграммы ρ_k зондов 5ИК изменяются более плавно, чем сигналы зондов ВИКИЗ, и достигают меньших экстремальных значений. Значения ρ_k для короткого зонда IC0A – наименьшие, как в проницаемом, так и в непроницаемых пластах модели, что является следствием значительного вклада в сигнал скважины с проводящим раствором. По-видимому, по этой причине данные короткого зонда часто совсем не приводят на планшетах.

Значения ρ_k в проницаемом пласте, рассчитанные для зонда IC0A, снижаются с уменьшением толщины пласта от 9.2 до 8.1 Ом·м. Сигнал зонда IC4A выходит на значение 11.1 Ом·м в верхней трети пласта толщиной 3 м и на около 9.2 Ом·м – при толщине пласта 0.5 м. Значения ρ_k максимальны для зонда IC1A при всех значениях толщины пласта, но на УЭС ЗП не выходят (13.1 Ом·м при толщине 3.0 м, 10.1 Ом·м при толщине 0.5 м).

Добавление в модель низкоомной окаймляющей зоны приводит к заметному изменению рассчитанных сигналов 5ИК при всех значениях толщины проницаемого пласта, что видно на соответствующих диаграммах σ_k и ρ_k (рис. 6). Кажущаяся проводимость для всех зондов в интервале проницаемого пласта повышена по сравнению с сигналами, рассчитанными для модели без окаймляющей зоны. Сигналы зондов IC1A и IC2A в проницаемом пласте практически такие же, как и во вмещающих породах. Относительно значения в модели без ОЗ изменение уровня сигнала длинного зонда в минимуме оказывается минимальным: не более 3 мСм/м, т. е. не превышает погрешности измерения. При этом уровни сигналов трех средних зондов заметно расходятся между собой, в отличие от сигналов в модели без ОЗ.

На диаграммах ρ_k наблюдается обратное, по сравнению с моделью без ОЗ, расположение сигналов всех зондов, кроме самого короткого – наибольшие значения ρ_k соответствуют зонду IC4A, наименее подверженному влиянию ОЗ и ЗП; наименьшие – средним зондам. Значения ρ_k в проницаемом пласте для зонда IC0A снизились на ~2 Ом·м по сравнению со значениями в модели без ОЗ. Сигнал зонда IC4A выходит на значение 10.6 Ом·м только в самом мощном пласте и снижается до 8.8 Ом·м в пласте толщиной 0.5 м. Однако даже в модели с самым тонким пластом значение ρ_k на его интервале максимально именно для длинного зонда, а расположение значений для зондов разной длины обратно расположению в модели без ОЗ: ρ_k снижается с уменьшением длины зонда, а не возрастает. На диаграммах ρ_k четырех зондов прибора 5ИК, приведенных на рис. 1, можно заметить похожее соотношение сигналов: максимальное значение показывает самый длинный зонд, и его сигнал далеко отстоит от сигналов средних зондов.

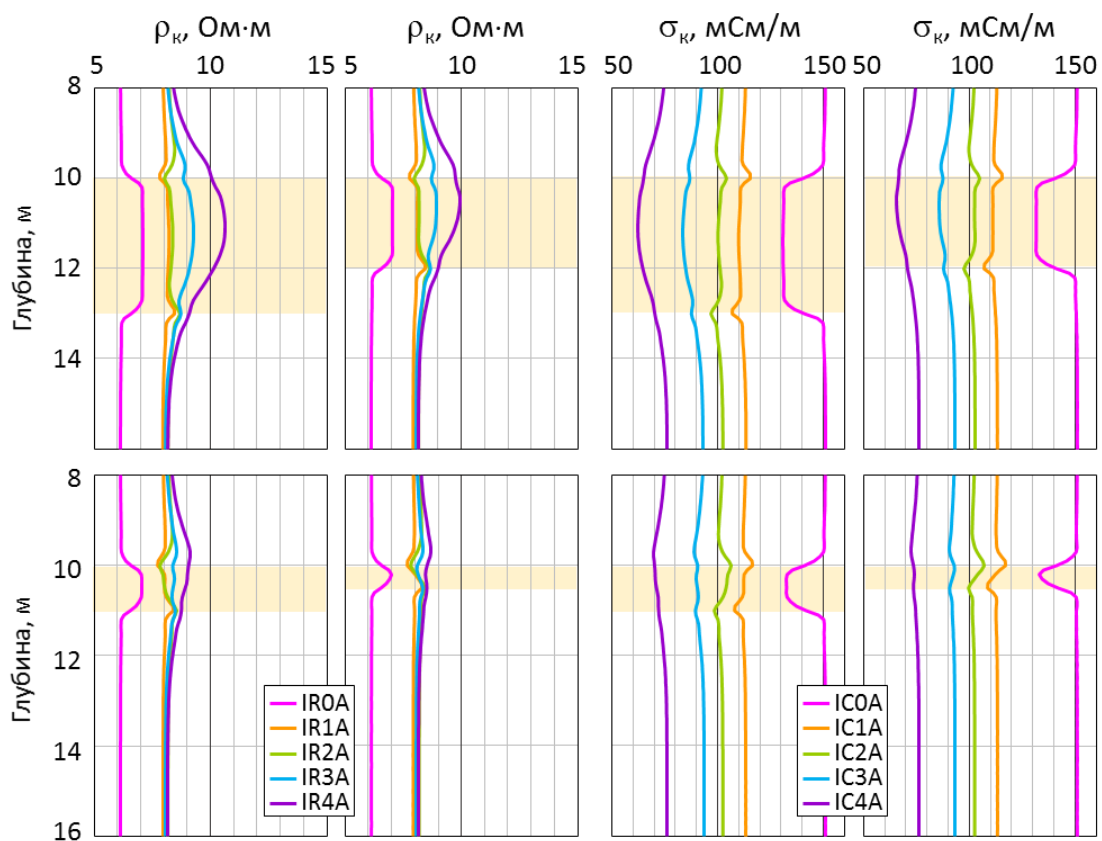


Рис. 6. Кажущееся УЭС (IR0A, ..., IR4A) и кажущаяся электропроводность (IC0A, ..., IC4A) для зондов 5ИК в модели коллектора с окаймляющей зоной. Толщина проницаемого пласта: 3, 2, 1, 0.5 м. Интервал проницаемого пласта выделен прямоугольной заливкой

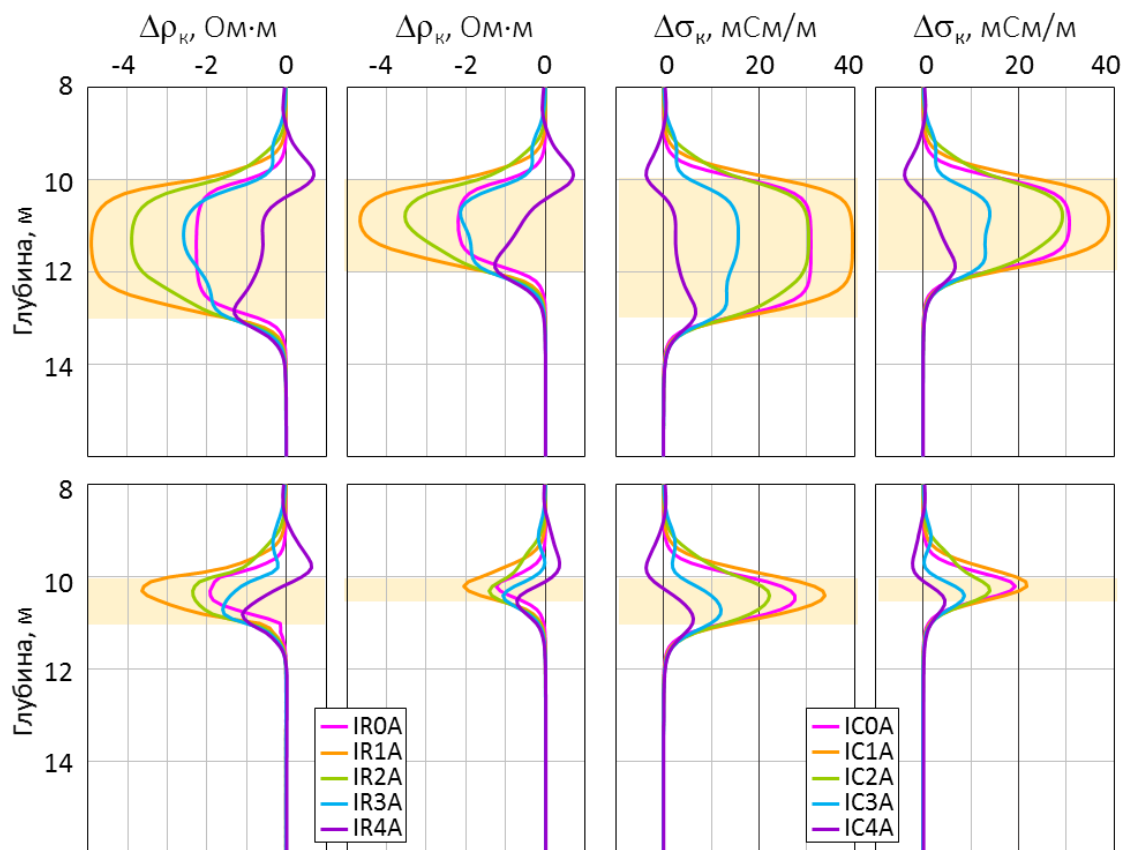


Рис. 7. Диаграммы приращений $\Delta\rho_k$ и $\Delta\sigma_k$ для зондов 5ИК (из значений в модели с ОЗ вычтены значения в модели без ОЗ). Толщина проницаемого пласта: 3, 2, 1, 0.5 м. Интервал проницаемого пласта выделен прямоугольной заливкой

Влияние окаймляющей зоны на сигналы зондов 5ИК особенно заметно на диаграммах приращений $\Delta\sigma_k$ (рис. 7). Как и в методе ВИКИЗ, наличие окаймляющей зоны меньше всего влияет на показания длинного зонда, и значительно более сильному влиянию ОЗ подвержены сигналы средних зондов IC1A, IC2A, IC3A, при этом даже для длинного зонда приращение кажущейся проводимости в полтора-два раза превышает погрешность измерения.

На диаграммах $\Delta\rho_k$ видно, что сигналы зондов IC1A и IC2A подвержены существенно большему влиянию ОЗ, чем сигналы других зондов. Максимальные значения $\Delta\rho_k$ для зондов 5ИК (5.0 Ом·м для зонда IC1A) меньше максимальных значений $\Delta\rho_k$ для зондов ВЭМКЗ (7.5 Ом·м для зонда DF07), что указывает на меньшую чувствительность сигналов зондов 5ИК к окаймляющей зоне. Стоит отметить, что изменение ρ_k для зонда IC1A, обусловленное наличием ОЗ, примерно такое же, что и для зонда IC3A, то есть, при инверсии сигнал короткого зонда повысит достоверность определяемых параметров модели.

Следует отметить, что выявление тонкого коллектора с ОЗ по данным только зондов 5ИК может оказаться проблематичным: при толщине пласта менее метра его можно вообще пропустить, особенно если не брать в рассмотрение самый короткий зонд, хоть как-то отражающий повышающую зону проникновения. Поэтому при поиске коллекторов небольшой толщины обязательно рассматривать весь доступный комплекс ГИС и комплексировать данные всех электрокаротажных зондов. Напротив, при наличии только повышающей ЗП коллекторы небольшой толщины выявляются по данным 5ИК вполне надежно.

ВЫВОДЫ

По результатам проведенного численного моделирования сигналов многозондовых приборов низкочастотного (5ИК) и высокочастотного (ВИКИЗ) индукционного каротажа в двумерных моделях коллектора с окаймляющей зоной и без нее можно сделать следующие выводы.

Сигналы зондов и ВИКИЗ, и 5ИК значительно отличаются в моделях с окаймляющей зоной и без нее, и по среднему уровню, и по соотношению для зондов разной длины. Сигналы обоих методов чувствительны к окаймляющей зоне, при этом наибольшему ее влиянию подвержены сигналы зондов средней длины.

Изменение значений кажущегося сопротивления для зондов 5ИК при добавлении в модель окаймляющей зоны меньше, чем для зондов ВИКИЗ, что указывает на меньшую, по сравнению с ВИКИЗ, чувствительность метода 5ИК к окаймляющей зоне.

При выявлении коллекторов толщиной около метра и менее при наличии окаймляющей зоны обязательно рассматривать весь доступный комплекс ГИС и комплексировать данные всех электрокаротажных зондов, потому что сигналов только 5ИК не будет достаточно из-за их слабого изменения по сравнению с сигналами во вмещающих отложениях.

Таким образом, анализ рассчитанных в типичной модели коллектора сигналов показал, что метод 5ИК чувствителен к окаймляющей зоне (в наибольшей степени – зонды средней длины); сигналы 5ИК различны в моделях с окаймляющей зоной и без нее по уровню и соотношению для зондов разной длины. Надежность выявления ОЗ и оценки ее толщины и УЭС будет выше при комплексировании с методами постоянного тока.

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

ЛИТЕРАТУРА

- Антонов Ю.Н., Сметанина Л.В., Михайлов И.В.** Окаймляющая зона как признак подвижной нефти в терригенных коллекторах // Каротажник. – 2012. – № 6. – С. 16–40.
- Дворкин В.И., Морозова Е.А., Лаздин А.Р.** Определение удельного сопротивления коллекторов по данным пятизондового индукционного каротажа // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2012. – № 1. – С. 279–282, <http://ngdelo.ru/article/view/10595/0>.
- Кнеллер Л.Е., Потапов А.П.** Определение удельного электрического сопротивления пластов при радиальной и вертикальной неоднородности разреза скважин // Геофизика. – 2010. – № 1. – С. 52–64.
- Методическое** руководство по проведению индукционного каротажа аппаратурой 4ИК и первичной обработке данных. – Тверь: Нефтегазгеофизика, 2006. – 38 с.
- Нечаев О.В., Глинских В.Н.** Быстрый прямой метод решения обратной задачи электрического каротажа в нефтегазовых скважинах // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2017. – № 15 (4). – С. 53–63, doi: 10.25205/1818-7900-2017-15-4-53-63.
- Петров А.М., Нечаев О.В., Сухорукова К.В.** Двумерная инверсия сигналов российского электрокаротажа, измеренных на интервалах сложнопостроенных отложений [Электронный ресурс] // Геомодель–2019: 21-я конференция по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа (г. Геленджик, 9–13 сентября 2019 г.): Тезисы докладов. – Геленджик, 2019а. – С. 1–5, doi: 10.3997/2214-4609.201950044.
- Петров А.М., Сухорукова К.В., Нечаев О.В.** Совместная двумерная инверсия данных электрического и электромагнитного каротажных зондирований в анизотропных моделях песчано-глинистых отложений // Каротажник. – 2019б. – № 3 (297). – С. 85–103.
- Пирсон С. Дж.** Справочник по интерпретации данных каротажа / под ред. С.Г. Комарова. – Москва: Недра, 1966. – 413 с.
- Рудяк Б.В., Снежко О.М., Шеин Ю.Л.** Технология индукционного каротажного зондирования высокого разрешения // Каротажник. – 2013. – № 3 (225). – С. 70–83.
- Сухорукова К.В., Петров А.М., Москаев И.А., Нечаев О.В., Никитенко М.Н.** Геоэлектрические модели меловых коллекторов Западной Сибири и сигналы электрокаротажа // Интерэкспо ГЕО-Сибирь–2019. XIV Междунар. науч. конгр. (24–26 апреля 2019 г., Новосибирск): Сб. материалов в 9 т. Т. 2. – Новосибирск: СГУГиТ, 2019. – С. 79–86.
- Технология** исследования нефтегазовых скважин на основе ВикиЗ: Методическое руководство // под ред. М.И. Эпова, Ю.Н. Антонова. – Новосибирск: НИЦ ОИГГМ СО РАН, 2000. – 121 с.
- Эпов М.И., Каюров К.Н., Ельцов И.Н., Петров А.Н., Сухорукова К.В., Соболев А.Ю., Власов А.А.** Новый аппаратный комплекс геофизического каротажа СКЛ и программно-методические средства интерпретации EMF PRO // Бурение и нефть. – 2010. – № 2. – С. 16–19.
- Эпов М.И., Шурина Э.П., Нечаев О.В.** Прямое трехмерное моделирование векторного поля для задач электромагнитного каротажа // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48, № 4. – С. 989–995.
- Anderson B.** Modeling and inversion methods for the interpretation of resistivity logging tool response. – Delft University Press, Delft, The Netherlands. – 2001. – 378 p.
- Epov M.I., Sukhorukova K.V., Nechaev O.V., Petrov A.M., Rabinovich M., Weston H., Tyurin E., Wang G.L., Abubakar A., Claverie M.** Comparison of the Russian and western resistivity logs in typical Western Siberian reservoir environments: A numerical study // Petrophysics. – 2020. – Vol. 61 (1). – P. 38–71, doi: 10.30632/PJV61N1-2020a1.

REFERENCES

- Anderson B.** Modeling and inversion methods for the interpretation of resistivity logging tool response. – Delft University Press, Delft, The Netherlands. – 2001. – 378 p.
- Antonov Yu.N., Smetanina L.V., Mikhailov I.V.** A low-resistivity zone as an indication of mobile oil in terrigenous // *Karotazhnik*. – 2012. – Vol. 6. – P. 16–40.
- Dvorkin V.I., Morozova E.A., Lazdin A.R.** Formation resistivity evaluation according to the five-sonde induction logging data // *The electronic scientific journal Oil and Gas Business*. – 2012. – Vol. 1. – P. 279–282.
- 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. – Geo, Novosibirsk, 2002. – 112 p.
- Epov M.I., Shurina E.P., Nechaev O.V.** 3D forward modeling of vector field for induction logging problems // *Russian Geology and Geophysics*. – 2007. – Vol. 48 (9). – P. 770–774.
- Epov M., Kayurov K., Yeltsov I., Petrov A., Sukhorukova K., Sobolev A., Vlasov A.** New SKL geophysical-logging system and EMF Pro software for induction log interpretation // *Burenie i Neft'*. – 2010. – No. 2. – P. 16–19.
- Epov M.I., Sukhorukova K.V., Nechaev O.V., Petrov A.M., Rabinovich M., Weston H., Tyurin E., Wang G.L., Abubakar A., Claverie M.** Comparison of the Russian and western resistivity logs in typical Western Siberian reservoir environments: A numerical study // *Petrophysics*. – 2020. – Vol. 61 (1). – P. 38–71, doi: 10.30632/PJV61N1-2020a1.
- Kneller L.E., Potapov A.P.** Reservoir rock resistivity studies while lateral and vertical heterogeneity // *Geofizika*. – 2010. – Vol. 1. – P. 52–64.
- Methodological** guide for induction logging with 4IK equipment and primary data processing. *Neftegazgeofizika*, Tver, 2006. – 38 p.
- Nechaev O.V., Glinskikh V.N.** Fast direct method for solving inverse problems of electrical logging in oil and gas wells // *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*. – 2017. – Vol. 15 (4). – P. 53–63, doi: 10.25205/1818-7900-2017-15-4-53-63.
- Petrov A.M., Nechaev O.V., Sukhorukova K.V.** Two-dimensional inversion of Russian electric logging signals measured at intervals of complex sediments // *Geomodel 2019: 21st Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development*. – EAGE, Gelendzhik, 2019a, – Vol. 2019. – P. 1–5, doi: 10.3997/2214-4609.201950044.
- Petrov A.M., Sukhorukova K.V., Nechaev O.V.** A combined two-dimension inversion of electric and electromagnetic sounding logs in models of anisotropic sand-and-clay sediments // *Karotazhnik*. – 2019b. – Vol. 3 (297). – P. 85–103.
- Pearson S.D.** Log data interpretation handbook. – Nedra, Moscow, 1966. – 416 p.
- Rudiyak B.V., Snezhko O.M., Shein Yu.L.** High-resolution induction logging sounding technology // *Karotazhnik*. – 2013. – Vol. 3 (225). – P. 70–83.
- Sukhorukova K.V., Petrov A.M., Moskaev I.A., Nechaev O.V.** Galvanic and electromagnetic logs in realistic models of West-Siberian cretaceous formations // *Proceedings of XIII International congress GEO-Sibir-2019* (24–26 April 2019, Novosibirsk). – Novosibirsk: SGUGiT, 2019. – Vol. 2. – P. 79–86.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

СУХОРИКОВА Карина Владимировна – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: количественная интерпретация комплекса данных скважинной электрометрии в вертикальных и субгоризонтальных скважинах.

АНАНЬЕВ Станислав Вячеславович – студент кафедры геофизики геолого-геофизического факультета НГУ. Основные научные интересы: исследование поведения сигналов низкочастотного и высокочастотного индукционного каротажа в вертикальных и субгоризонтальных скважинах.

ПЕТРОВ Алексей Михайлович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: методическое и программное обеспечение количественной интерпретации данных зондирующих методов скважинной электрометрии.

НЕЧАЕВ Олег Валентинович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: численное моделирование и инверсия данных разведочной и скважинной электрометрии.

*Статья поступила в редакцию 27 июля 2022 г.,
принята к публикации 7 октября 2022 г.*