



СИГНАЛЫ ЭЛЕКТРОКАРОТАЖА В ВЕРТИКАЛЬНЫХ И НАКЛОННЫХ СКВАЖИНАХ В ИНТЕРВАЛАХ АНИЗОТРОПНЫХ ЮРСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ (ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ)

Карина Владимировна Сухорукова^{1,✉}, Сергей Алексеевич Примаков²

^{1,2}Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

¹suhorukkv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8570-5880>

²PrimakovSA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0009-0007-4157-232X>

Аннотация. Для отложений средней юры Широкого Приобья Западной Сибири проведена численная инверсия сигналов скважинной электрометрии в вертикальных скважинах, проанализирована априорная геологическая информация. Выявлены типичные геоэлектрические модели коллекторов Ю₂. По результатам совместной инверсии сигналов гальванических и индукционных зондов отложения в интервале коллектора и вмещающих его пород отличаются сильным электрическим контрастом. Толщины пластов небольшие по сравнению с зондами электрокаротажа. Глинистые интервалы также осложнены электрической анизотропией. Для этих моделей проведено численное моделирование сигналов электромагнитного каротажа. Установлены основные изменения сигналов при увеличении зенитного угла наклона скважины.

Ключевые слова: электрокаротаж, вертикальная скважина, наклонная скважина, среднеюрские отложения, численная инверсия, численное моделирование, геоэлектрическая модель

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2022-0026 «Инновационные аспекты электродинамики в задачах разведочной и промысловой геофизики».

Для цитирования: Сухорукова К.В., Примаков С.А. Сигналы электрокаротажа в вертикальных и наклонных скважинах в интервалах анизотропных юрских отложений (численное моделирование) // Геофизические технологии. 2024. № 4. С. 19–33. doi:10.18303/2619-1563-2024-4-19.

ELECTRICAL LOGGING SIGNALS IN VERTICAL AND INCLINED WELLS IN INTERVALS OF ANISOTROPIC JURASSIC DEPOSITS (NUMERICAL MODELING)

Karina V. Sukhorukova^{1,✉}, Sergey A. Primakov²

^{1,2}Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

¹suhorukkv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8570-5880>

²PrimakovSA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0009-0007-4157-232X>

Abstract. Numerical inversion of borehole electrometry signals in vertical wells was performed for Middle Jurassic deposits of the central part of Western Siberia, and a priori geological information was analyzed. Typical geoelectric models of J₂ reservoirs have been constructed. According to the results of joint inversion of galvanic and induction probe signals, the deposits in the reservoir interval and the host rocks are distinguished by a strong resistivity contrast. The thickness of the formations is small compared to the electric logging probes. The clayey intervals are also characterized by electrical anisotropy. Numerical modeling of electromagnetic logging signals was performed for these models. The article demonstrates the main changes in the synthesized signals with an increase in the zenith angle of inclination of the well.

Keywords: electrical logging, vertical well, inclined well, Middle Jurassic deposits, numerical inversion, numerical modeling, geoelectric model

Funding: the study was carried out with the financial support of Russian Federal Research Project FWZZ-2022-0026 "Innovative aspects of electrodynamics in problems of exploration and oilfield geophysics".

For citation: Sukhorukova K.V., Primakov S.A. Electrical logging signals in vertical and inclined wells in intervals of anisotropic Jurassic deposits (numerical modeling) // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2024. No. 4. P. 19–33. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2024-4-19.

ВВЕДЕНИЕ

Юрские отложения зачастую характеризуются как анизотропные, что может обуславливаться их тонкой слоистостью. В том числе, тонкая слоистость выявляется на фотографиях керна, особенно сложенного аргиллитами. Однако подробных лабораторных исследований значений УЭС в направлении и поперек слоистости керна практически не проводится, хотя некоторые исследователи связывают флюидоупорные свойства покрышек в том числе и с их электрической анизотропией. При этом влияние анизотропии УЭС при увеличении наклона скважины приводит к завышению кажущегося сопротивления ρ_k .

Электрическая анизотропия может быть оценена по сигналам градиент-зондов в вертикальных скважинах [Петров и др., 2019] и по комплексу данных электрометрии с привлечением априорных данных – в горизонтальных скважинах [Сухорукова, 2017; Копытов и др., 2018]. Итоговая анизотропная геоэлектрическая модель отложений может быть уточнена по комплексу данных из вертикальных и наклонно-направленных скважин с использованием программ численного моделирования с учетом параметров скважины, измененных зон и прибора.

Разработанные в ИНГГ СО РАН программные комплексы обработки и количественной интерпретации данных индукционных и гальванических методов применены для численного анализа сигналов, измеренных в интервалах трансверсально-изотропных тонкослоистых юрских осадочных отложений, вскрытых вертикальными скважинами. Выявлены наиболее часто встречающиеся геоэлектрические модели, при пересечении которых скважиной анализ данных электрокаротажа может быть сложным в сильнонаклонных (субгоризонтальных) скважинах. Для вертикальных скважин в результате численной совместной инверсии данных электрокаротажа в классе аксиально-симметричных двумерных моделей [Михайлов и др., 2017; Нечаев, Глинских, 2017, 2018; Петров и др., 2021] определены электрофизические свойства юрских отложений с сильным электрическим контрастом и небольшими толщинами пластов. Выполнено численное моделирование индукционных сигналов в геоэлектрических моделях с наклонной скважиной.

МОДЕЛИ ЮРСКИХ КОЛЛЕКТОРОВ И ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД ПО КОМПЛЕКСУ ДАННЫХ ГИС И РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОЙ ИНВЕРСИИ СИГНАЛОВ ЭЛЕКТРОКАРОТАЖА

Разрез юрских отложений характеризуется сильным контрастом электрических свойств, частым чередованием низкоомных глинистых и высокоомных карбонатных пластов небольшой толщины, повышенной глинистостью пластов-коллекторов и рассеянной пиритизацией, что значительно затрудняет интерпретацию данных каротажа даже при визуальном анализе диаграмм. Анизотропия, характерная для микроструктуры порового пространства и/или для тонкослоистых пород, определяет также анизотропию физических свойств, таких как акустические, тепловые, и электрические.

Осадочные породы, как правило, характеризуются одним значением УЭС в плоскости наслоений и другим – большей величины – перпендикулярно слоистости. Как правило, наличие вертикального УЭС ρ_v не рассматривается при задачах оценки нефтесодержания в вертикальных скважинах, потому что в них большая часть зондов электрокаротажа чувствительна только к горизонтальному УЭС ρ_h . Однако при больших зенитных углах наклона скважины с электрокаротажным прибором практически все зонды, разработанные для исследования вертикальных скважин, становятся чувствительны к обоим компонентам УЭС. Это обстоятельство становится значимым при геонавигации горизонтального ствола и оценке УЭС вскрытого им коллектора.

Ниже рассматриваются особенности количественной интерпретации данных электрокаротажа на интервалах отложений средней юры центральной части Западной Сибири (коллекторы Ю₂), а также априорная информация.

В верхней части тюменской свиты (Широтное Приобье) выделяется нефтенасыщенный горизонт Ю₂, являющийся перспективным источником углеводородов. Коллекторы Ю₂ представлены песчаниками и алевролитами, сильно неоднородны по своим текстурным и структурным особенностям, а их коллекторские свойства определяются наличием глинистого и карбонатного материала, а также пиритизацией и окварцеванием [Севастьянов и др., 2017].

В настоящее время в батском резервуаре, включающем пласты Ю₂–Ю₄ на учет поставлены значительные запасы углеводородов, однако освоение их в целом по всей Западно-Сибирской НГП остается ничтожно малым. Выработанность запасов нефти от начальных составляет 8.7 %, а газа (свободного и газовых шапок) – около 0.008 %. Более 68 % объема нефти добыто на 9 месторождениях: в ХМАО (Тайлаковское, Федоровское, Восточно-Сургутское, Русскинское, Омбинское, Ловинское и Краснотенинское), в Тюменской области (Усть-Тегусское) и в ЯНАО (Ярудейское). На территории ХМАО в настоящее время в разработку введены залежи на 116 из 234 месторождений, в Тюменской области – на 14 из 33 [Казаненков, 2024].

В целом горизонт Ю₂ по геологическим данным и петрофизическим исследованиям характеризуется [Батурин и др., 2007]:

- фациальной неоднородностью коллекторов, обусловленной своеобразием речных, пойменно-болотных и прибрежно-морских отложений, а также многократными размывами и переотложениями материала в периоды морской трансгрессии и сезонных колебаний уровней пресных водоемов;
- неоднозначностью зависимости ФЕС пород-коллекторов от характера, степени и сочетания различных типов их вторичных преобразований;
- развитием вторичной пористости кавернозного, трещинного и кавернозно-трещинного типов в гранулярных коллекторах со значительной степенью уплотнения.

По результатам лабораторных исследований образцов песчано-алевритовых пород, отобранных из интервала горизонта Ю₂ в 199 скважинах на 54 площадях Широтного Приобья, коэффициент их пористости не превышает 23.1 % и в среднем составляет 11–12 % [Казаненков, 2024]. Количество образцов с проницаемостью более 10^{-3} мкм² составляет 37 % от общего числа в выборке, нефтенасыщенные породы с меньшей проницаемостью при традиционных технологиях вскрытия и опробования (без применения методов интенсификации притоков) не рассматриваются как коллекторы и, как правило, не имеют промышленного значения. Тем не менее, на некоторых площадях в отдельных

скважинах из пласта Ю₂ были получены фонтанные притоки, например, на Восточно-Сургутском, Быстринском, Омбинском и Салымском месторождениях.

Таким образом, горизонт Ю₂ является сложным, но перспективным для изучения объектом. Вследствие его неоднородности и широкой вариативности фильтрационно-емкостных и электрофизических свойств классический подход к интерпретации данных ГИС может привести к неверным выводам о продуктивности. Вышеописанные особенности приводят и к осложнениям при количественной интерпретации сигналов БКЗ и ВИКИЗ. Тонкое горизонтальное переслаивание алевроаргиллита с алевролитом в перекрывающих и подстилающих пластах и песчаника с карбонатизированными и глинистыми прослоями в самом коллекторе приводит к возникновению электрической анизотропии, т. е. различию значений удельного электрического сопротивления вдоль слоистости и по нормали к ней [Каринский, 2018]. Наличие микроанизотропии глинистых пород затрудняет применение одномерного подхода к интерпретации данных БКЗ на интервале коллектора из-за значительного влияния вмещающих пород на формирование сигнала в выделенном пласте. Рассеянная пиритизация и глинистость приводит к повышенным значениям эффективной диэлектрической проницаемости и ее частотной дисперсии, вследствие этого возникают противоречия в радиальном распределении УЭС, определяемом по данным гальванических и электромагнитных зондов по отдельности. Поэтому для корректной оценки электрофизических свойств юрских коллекторов необходимо применение новых методик интерпретации, позволяющих учитывать влияние на сигналы электрометрии, вмещающих тонкие пласты коллектора пород, возможной анизотропии УЭС и диэлектрической проницаемости отложений.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ГИС И РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА СИГНАЛОВ ЭЛЕКТРОКАРОТАЖА НА ИНТЕРВАЛЕ ЮРСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ

Данные электрокаротажа в наклонных и горизонтальных скважинах существенно отличаются от сигналов в вертикальных скважинах [Горбатенко, Сухорукова, 2014, 2017; Сухорукова и др., 2016]. Для наклонных скважин численное моделирование сигналов необходимо для их анализа с целью выяснить возможности оценки УЭС – одного из основных параметров флюидосодержащей пористой среды, по которым рассчитывается коэффициент насыщения коллектора. Исследование поведения сигналов проводится также для решения задачи геонавигации: для позиционирования ствола скважины относительно кровли и подошвы коллектора или оценки расстояния до ВНК по сигналам электрокаротажа в процессе бурения [Аксельрод, 2012; Эпов и др., 2016а, б; Глинских и др., 2017; Копытов и др., 2018; Никитенко и др., 2021; Темирбулатов и др., 2023].

При моделировании в условиях субгоризонтальных скважин кроме УЭС необходимо учитывать такие свойства отложений, как электрическая анизотропия для всех методов каротажа и поляризуемость – для высокочастотных индукционных зондов. В наибольшей степени эти эффекты характерны для глинистых отложений, но их учет может быть критичен при анализе сигналов в песчано-глинистых пачках, при небольшой толщине коллекторов, а также при наличии в них глинистых и/или карбонатизированных прослоев, отличающихся по УЭС [Эпов и др., 2016а, б; Сухорукова, 2017; Сухорукова и др., 2017; Петров и др., 2019].

Анализ комплекса данных ГИС в интервале среднеюрских отложений приводит к выводу о довольно разнообразном строении коллекторов, что обусловлено вариациями условий

осадконакопления. Тем не менее, можно выделить несколько основных типов геоэлектрического строения для определенных площадей Широтного Приобья.

С применением двумерной геоэлектрической инверсии сигналов электрокаротажа (БКЗ, БК, ВИКИЗ) в вертикальных скважинах [Михайлов и др., 2017; Нечаев, Глинских, 2017, 2018; Петров и др., 2021] построены геоэлектрические модели исследуемых отложений и выявлены параметры основных типов моделей, представляющих интерес для численного моделирования сигналов электрокаротажа в наклонных скважинах и их анализа.

Совместная двумерная инверсия сигналов электрокаротажа, разработанная в лаборатории многомасштабной геофизики ИНГГ СО РАН в предыдущие годы, в 2022–2024 гг. опробована при выполнении хозяйственных договоров в рамках соглашения с АО «СНИИГГиМС» и показала свою эффективность на нескольких десятках километров вертикальных скважин разных месторождений Западной Сибири, включая арктические. Поэтому именно этот подход оправдан при определении электрофизических свойств юрских отложений, отличающихся большим электрическим контрастом и небольшими толщинами пластов, особенно при необходимости оценки их анизотропии.

Пример мощного коллектора Ю₂ приведен на рис. 1. В рассмотренном интервале хорошо разделяются пласты глин и песчаников по данным ПС и ГК. Верхняя часть интервала представлена глинистыми отложениями. Целевой объект – песчаный коллектор, находится на глубине ××05–××22 м и подстилается переслаиванием глин, алевролитов и углей. В верхней половине коллектора по данным нейтронного каротажа повышением значений выявляются два уплотненных прослоя, также заметных повышением кажущегося сопротивления в данных БК. При значении УЭС около 100 Ом·м насыщение пласта оценивается как нефтяное, но за первые три месяца эксплуатации этого интервала в притоке зафиксировано 5 % пластовой воды. Если исключить технический фактор (некачественное цементирование), то наличие в притоке пластовой воды, скорее всего, обусловлено подтеканием из близко расположенных залегающих ниже водонасыщенных песчаных пластов по трещиноватости промежуточных пород. Близость водонефтяного контакта вынуждает выявлять такие пласты даже в контрастном переслаивании под основным коллектором, поскольку их наличие необходимо учитывать при обсадке, перфорации и тем более при гидроразрыве в горизонтальных стволах.

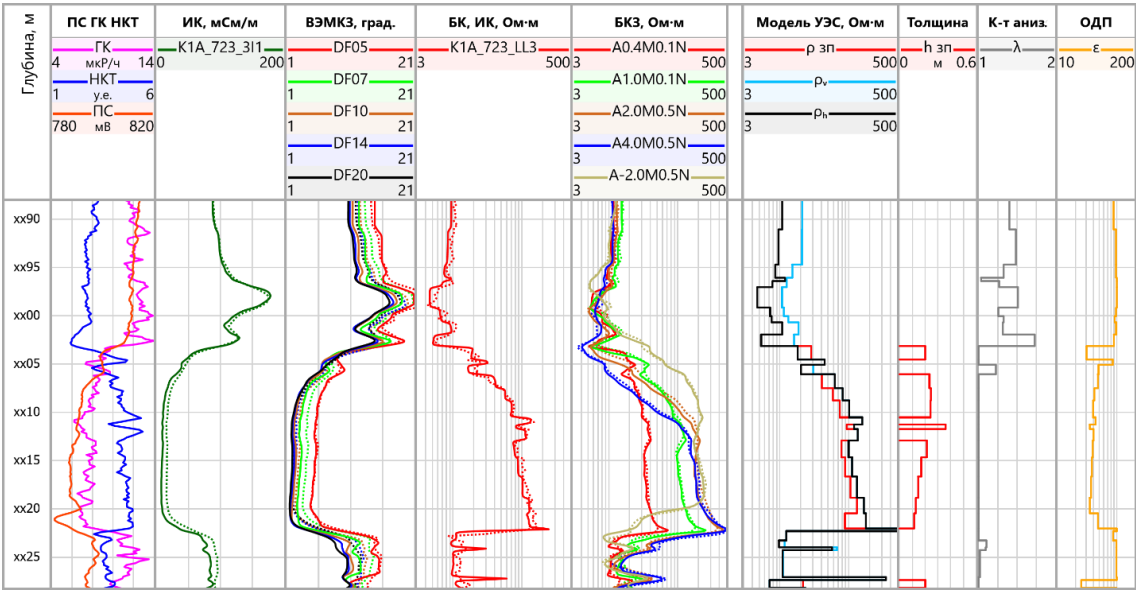


Рис. 1. Пример диаграмм данных ГИС на интервале однопластового коллектора Ю₂.

Коллектор на рис. 2 также осложнен карбонатизацией в кровле, подошве и в средней части пласта. При этом свойства песчаника между этими прослоями удивительно однородны.

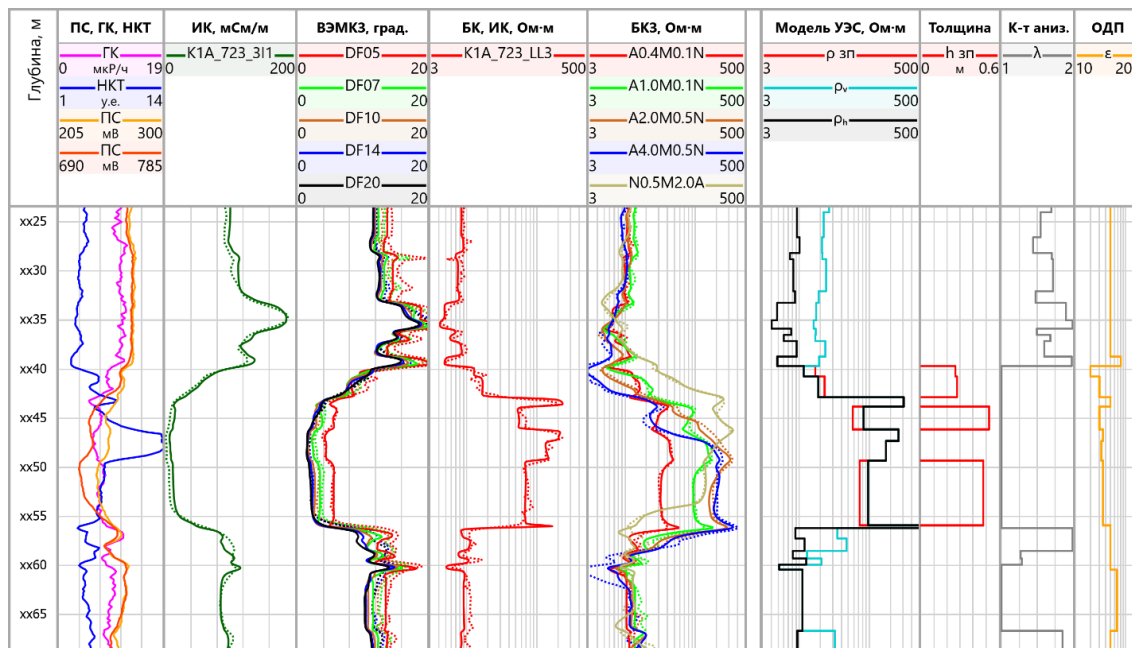


Рис. 2. Пример диаграмм данных ГИС на интервале однопластового коллектора Ю₂.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ (ВЭМКЗ, ВИК-ПБ) ПРИ ПЕРЕСЕЧЕНИИ КОЛЛЕКТОРА НАКЛОННОЙ СКВАЖИНОЙ

Одним из методов, применяемых при исследовании наклонных и горизонтальных скважин, в том числе в процессе бурения, является электромагнитный каротаж. Широко применяется аппаратура ВЭМКЗ (ВИКИЗ), выполненная как в автономном варианте, так и в кабельном, помещенном в специальный контейнер. Основной измеряемой характеристикой электромагнитного поля, возбуждаемого в среде генераторными катушками на частотах 14.0, 7.0, 3.5, 1.75 и 0.875 МГц (длины зондов основной изопараметрической группы 0.5, 0.707, 1.0, 1.414, 2.0 м соответственно) является разность фаз э.д.с. в двух приемных катушках каждого зонда [Технология..., 2000]. Дополнительно в приборах серии «СКЛ» и «ЛУЧ» (<https://looch.ru/skl-76>, <https://looch.ru/skl-a-102>, <https://looch.ru/looch-m-2014>) измеряется отношение амплитуды э.д.с. в приемных катушках.

В аппаратуре серии «ЛУЧ» с разным диаметром корпуса (ЛУЧ-102 (4") / ЛУЧ-121 (4 3/4") / ЛУЧ-172 (6 3/4") / ЛУЧ-203 (8")) зонды модуля ВИК-ПБ электромагнитного каротажа близки по частоте и характеристикам к среднему и длинному зондам классического ВИКИЗ. Измерения осуществляются двумя основными и четырьмя дополнительными трехкатушечными зондами с длинами 0.7, 1.05 и 1.4 м на двух частотах 0.88 и 3.5 МГц. Зонды одинаковой длины различаются базой, т. е. расстоянием между дальней и ближней приемными катушками. В парах приемных катушек регистрируются значения разности фаз и отношения амплитуд.

Параметры зондов и измеряемые сигналы ВИК-ПБ были выбраны на основе метода высокочастотного электромагнитного каротажа ВИКИЗ и его модификаций [Технология..., 2000; Эпов и др., 2010]. Детальное описание прибора ВИК-ПБ и способа передачи данных каротажа в процессе бурения с забоя на поверхность приведено в работе [Еремин и др., 2013]. Анализ сигналов и возможности

восстановления по ним электрического сопротивления пластов и расстояния до их границ для типичной модели мелового нефтеводонасыщенного коллектора, с небольшим электрическим контрастом и без учета скважины, рассмотрены в нескольких статьях, например, [Эпов и др., 2014, 2016а, б; Копытов и др., 2018].

Поскольку юрские отложения отличаются от меловых большим контрастом УЭС и слоистым строением коллекторов, необходимо численное моделирование и анализ сигналов для геоэлектрических моделей юрских коллекторов и окружающих их пород. Ввиду того, что параметры зондов ВИК-ПБ близки к параметрам зондов ВЭМКЗ, численный анализ влияния наклона скважины проведен для более полного набора зондов (основная изопараметрическая группа прибора ВЭМКЗ).

На рисунках 3–6 приведены результаты расчетов сигналов (разность фаз и отношение амплитуд), для удобства сравнения в трансформации в значения кажущегося сопротивления ρ_k . Геоэлектрическая модель приближена к мощному однопластовому коллектору, в том числе осложненному глинистым и карбонатным прослоями. Разность фаз и отношение амплитуд представлены в значениях ρ_k (Ом·м). Для удобства сравнения сигналы выведены в зависимости от глубины (вертикальной координаты), а не от расстояния вдоль наклонной скважины. Слева направо: треки 1 и 2: значения ρ_k ($\rho_{k05}-\rho_{k20}$, Ом·м), рассчитанные по разности фаз, в вертикальной (0°) и субгоризонтальной (88°) скважинах; треки 3 и 4: значения ρ_k (DA05–DA20, Ом·м), рассчитанные по отношению амплитуд; треки 5, 6 и 7: сравнение значений ρ_k , рассчитанных по разности фаз, при разном наклоне скважины для зондов длиной 1.0, 1.414, 2.0 м (ρ_{k10} , ρ_{k14} , ρ_{k20} , частоты 3.5, 1.75 и 0.875 МГц; зенитный угол наклона скважины указан в легенде).

Изменения разности фаз (см. рис. 3). В модели однородного нефтенасыщенного коллектора с УЭС 100 Ом·м и толщиной 5 м основные изменения сигналов по сравнению с сигналами в вертикальной скважине практически отсутствуют при значениях зенитного угла от 0 до 30° , что, с учетом необходимости пересчета глубины точек измерения на вертикаль, расширяет область применимости средств двумерной инверсии, ранее оцениваемую как $0-15^\circ$. Также с практической точностью совпадают и проекции на вертикаль сигналов в диапазоне значений угла $75-90^\circ$. При больших углах наклона увеличивается интервал глубин расхождения значений ρ_k для разных зондов при переходе между пластами с контрастными УЭС, кроме того увеличивается и само расхождение (см. интервалы 2–3, 5–7, 12–15 м). Этот эффект наблюдается с обеих сторон высокоомного коллектора. Внутри интервала высокоомного пласта при 88° расхождение для разности фаз, наоборот, существенно уменьшается по сравнению с 0° , сигналы выходят на УЭС пласта, но на расстоянии примерно длины зондов от границ значения ρ_k ниже УЭС пласта на $\approx 20\%$ (80 вместо 100 Ом·м). Также под кровлей и над подошвой пласта на 10% занижается ρ_k для длинного низкочастотного зонда, в то время как при 0° – всего на 5% . На границах пласта возникают локализованные максимумы значений, шириной около базы зонда (или около 20% длины), однако в условиях бурения с минерализованными полимерными растворами они могут быть незаметными на фоне помех.

Изменения отношения амплитуд. Так же, как и для разности фаз, изменяются области расхождений при переходе из одного пласта в другой (см. рис. 3). И также практически идентичны между собой сигналы в диапазонах $0-30^\circ$ и $75-90^\circ$. В отличие от разности фаз, проблемы с амплитудными измерениями очевидны даже при угле 0° – на частоте 0.88 МГц, применяемой в ВИК-ПБ, эта измеряемая

характеристика даже в мощном пласте не достигает значения его УЭС (меньше на 40 %), а на частоте 3.5 МГц – достигает в небольшом интервале глубины (9.5–10.5 м).

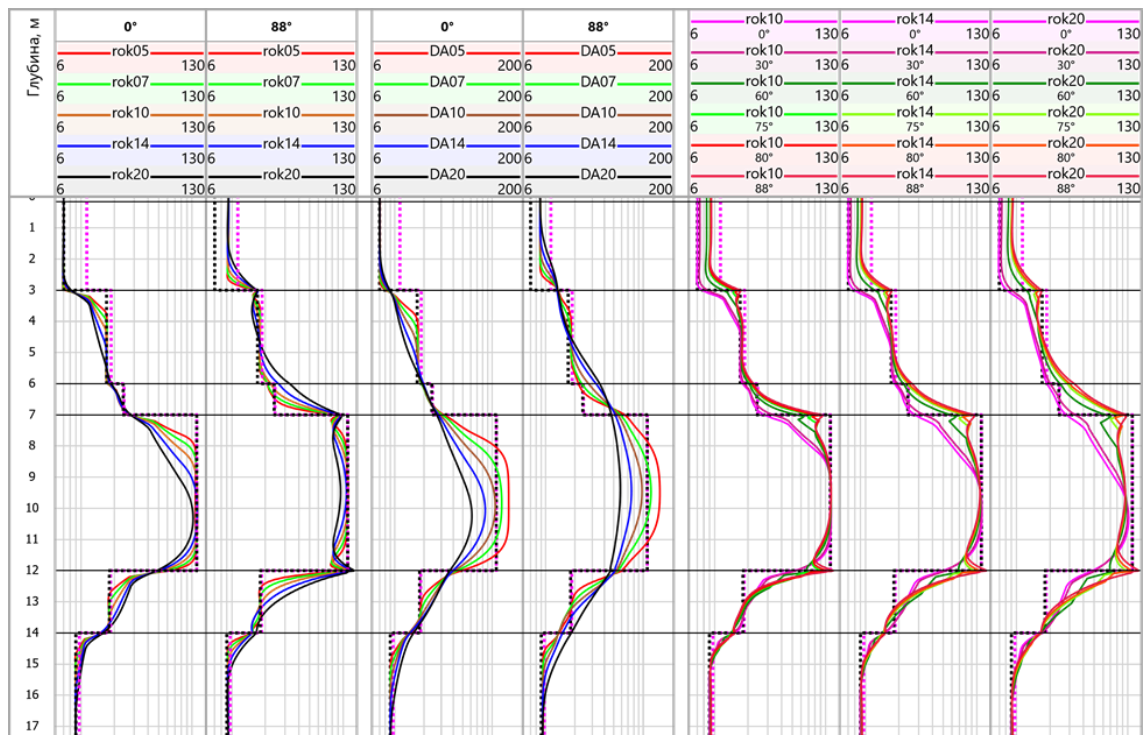


Рис. 3. Сигналы ВЭМКЗ, рассчитанные в наклонной скважине, пересекающей модель однородного юрского коллектора. УЭС пластов геоэлектрической модели на каждом треке: горизонтальное – черный пунктир, вертикальное – розовый пунктир, горизонтальными черными линиями обозначены границы. Описание диаграмм см. в тексте.

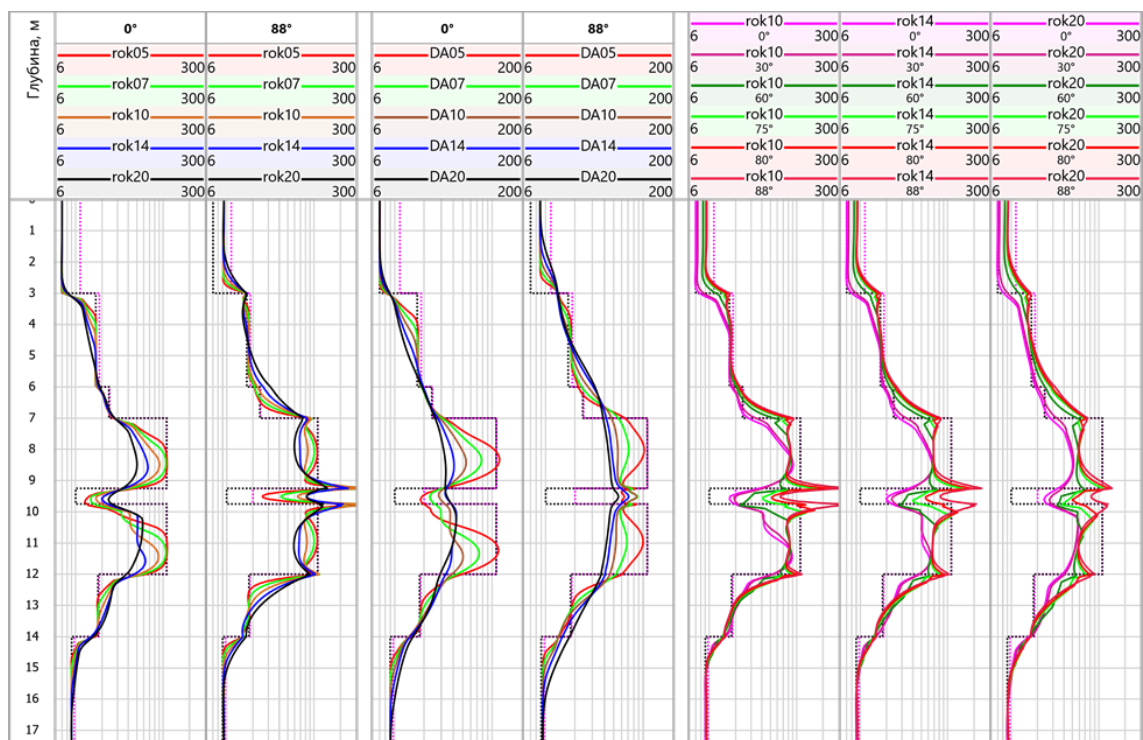


Рис. 4. Сигналы ВЭМКЗ, рассчитанные в наклонной скважине, пересекающей модель однородного юрского коллектора с низкоомным прослоем. УЭС пластов геоэлектрической модели на каждом треке: горизонтальное – черный пунктир, вертикальное – розовый пунктир.

Добавление в середине коллектора полуметрового низкоомного пласта, имитирующего глинистый, усложняет ситуацию: изменение значений разности фаз с увеличением угла происходит вплоть до 85° (рис. 4). При этом в диапазоне $0\text{--}30^\circ$ изменений практически не заметно, и можно применять 2D инверсию. В связи с тем, что толщина высокоомных частей уменьшилась до 2.25 м, уровня их УЭС достигает только высокочастотный зонд ВЭМКЗ, низкочастотный же по разности фаз при угле 0° показывает в максимуме около 50 Ом·м в верхней части и около 60 Ом·м в нижней, притом ближе к низкоомной вставке, а при угле 88° – около 60 Ом·м в середине обеих частей. Что в вертикальной, что в субгоризонтальной скважине зонды ВИК-ПБ не будут показывать ρ_k , равное УЭС пластов такой толщины. Кроме того, внутри частей коллектора низкочастотный зонд будет «фиксировать» снижение УЭС в средней части и повышение к границам. Диаграммы ρ_k для отношения амплитуд с выполаживанием скважины симметризируются относительно середины коллектора, на них отсутствуют максимумы в точке пересечения границ пласта, но значения в частях коллектора много ниже, чем для разности фаз (около 45 и 55 Ом·м для зондов с частотами 0.875 и 3.5 МГц). При этом в субгоризонтальной скважине тонкий низкоомный пласт в высокоомном окружении отмечается не снижением трансформации ρ_k , как на диаграммах для разности фаз, а наоборот – повышением до 60 и 90 Ом·м.

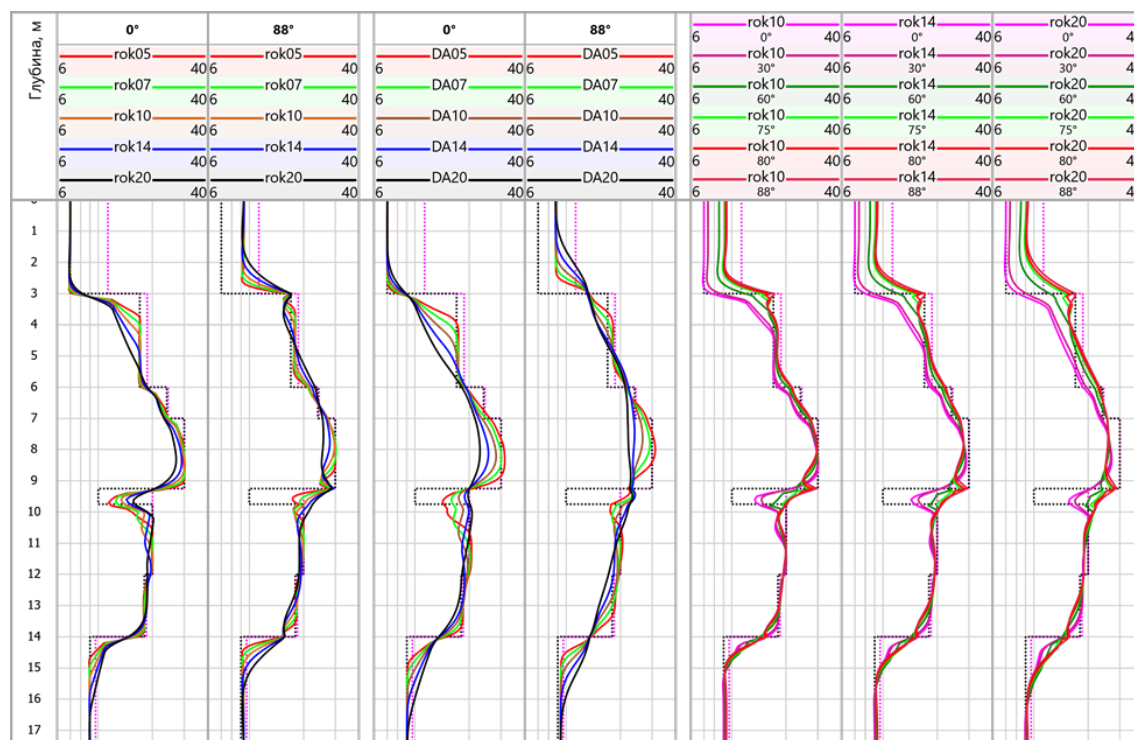


Рис. 5. Сигналы ВЭМКЗ, рассчитанные в наклонной скважине, пересекающей модель сложнопостроенного юрского коллектора с низкоомным прослоем. УЭС пластов геоэлектрической модели на каждом треке: горизонтальное – черный пунктир, вертикальное – розовый пунктир.

Рисунок 5 иллюстрирует изменение диаграмм в пласте с УЭС от 17 до 30 Ом·м, соответствующим переменному и смешанному насыщению, со сниженным УЭС верхней части коллектора (интервал 3–6 м) за счет повышенной глинистости и с глинистым прослоем. В такой модели заметны потеря в сильнонаклонной скважине чувствительности зондов к низкоомному пласту и сглаживание перехода между пластами с постепенным снижением УЭС (интервал 3–9 м) для зондов кроме самых коротких высокочастотных. В среднем, при потере чувствительности к контрастному прослою, в модели такого типа

с постепенным изменением УЭС от пласта к пласту и средними его значениями, представляется возможным оценить УЭС каждого пласта коллектора по значениям ρ_k , но для частот прибора ВИК-ПБ УЭС коллектора необходимо уточнять инверсией измеряемых характеристик с учетом инклинометрии.

Модель на рис. 6 отличается от предыдущей тем, что низкоомный прослой заменен на тонкий высокоомный (с границами на 9.45 и 9.55 м и УЭС 70 Ом·м). В этом случае изменения, связанные с введением высокоомного прослоя, оказываются менее выраженными, чем в случае введения низкоомного прослоя. Значения ρ_k практически не искажаются влиянием этого прослоя в области перехода из пласта с УЭС 20 Ом·м в пласт с УЭС 30 Ом·м. Тонкий прослой отмечается лишь небольшим повышением на диаграммах ρ_k по разности фаз для высокочастотных зондов, которое может быть неразличимо на фоне помех в реальных данных.

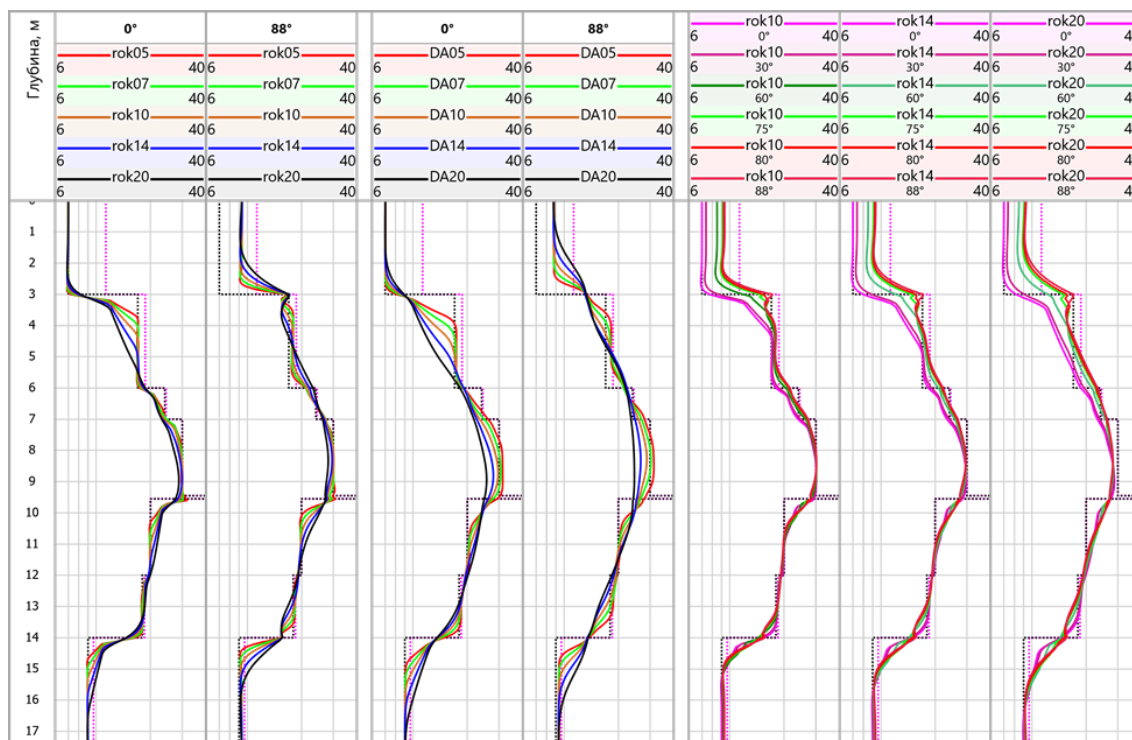


Рис. 6. Сигналы ВЭМКЗ, рассчитанные в наклонной скважине, пересекающей модель юрского коллектора с высокоомным прослоем. УЭС пластов геоэлектрической модели на каждой трек: горизонтальное – черный пунктир, вертикальное – розовый пунктир.

Стоит отметить поведение сигналов в верхнем анизотропном пласте, моделирующем глинистые отложения с небольшим коэффициентом анизотропии, равным 1.27. Если в вертикальной скважине значения ρ_k для всех сигналов равны горизонтальному УЭС, то с наклоном скважины они возрастают до 9.2 и 8.8 Ом·м по разности фаз и отношению амплитуд соответственно (среднее геометрическое ρ_h и ρ_v равно 8.9 Ом·м).

Таким образом, по результатам моделирования сигналов электромагнитного каротажа в моделях юрских коллекторов, пересекаемых наклонной скважиной, можно сделать следующие выводы.

При средних значениях УЭС (15–30 Ом·м) и постепенном их изменении от пласта к пласту:

– по измеряемым сигналам ВЭМКЗ можно оценивать этот параметр при толщинах пластов около 2 м;

– УЭС более высокоомных пластов по значениям отношения амплитуд занижаются для зондов низкой частоты (длинные зонды приборов ВЭМКЗ и ВИК-ПБ), необходима их численная инверсия с учетом угла наклона скважины;

– прослой более низкого УЭС будет отражен в сигналах при зенитном угле до 75° , в субгоризонтальных скважинах его влияние не заметно на диаграммах, но может проявиться небольшим снижением ρ_k в окружающих пластах;

– тонкий прослой более высокого УЭС в подошве пласта при значениях УЭС 70 Ом·м в прослое и 30 Ом·м в пласте практически незаметен на диаграммах и разности фаз, и отношения амплитуд даже в сильнонаклонной скважине.

При значениях УЭС пятиметрового коллектора около 100 Ом·м, соответствующих большому нефтесодержанию:

– при однородности пласта по разности фаз можно оценивать его УЭС с хорошей точностью по всем зондам; значение будет занижено для зонда с частотой 0.875 МГц по разности фаз на 5–10 %;

– оценить УЭС однородного пласта можно по отношению амплитуд зондов с частотой более 3.5 МГц; значение будет занижено для зонда с частотой 0.875 МГц на 40 %;

– полуметровый прослой более низкого УЭС существенно изменяет сигналы и приводит к разному поведению диаграмм разности фаз и отношения амплитуд в области прослоя и границ коллектора, поэтому необходим совместный численный анализ обеих измеряемых характеристик для всех зондов с учетом угла наклона скважины.

ВЫВОДЫ

С применением созданного в лаборатории многомасштабной геофизики ИНГГ СО РАН программного обеспечения проведено численное моделирование сигналов электромагнитного каротажного зондирования в наклонных скважинах в геоэлектрических моделях, характерных для однопластового коллектора среднеюрских отложений на территории Среднего Приобья. На интервалах коллектора Ю₂ с применением численной инверсии в классе двумерных аксиально-симметричных моделей по практическим данным электрокаротажа в вертикальных скважинах определены геоэлектрические модели, характеризующиеся небольшими толщинами пластов и сильным контрастом электрических свойств, а также анизотропией УЭС в глинистых отложениях. Выполнены численные расчеты сигналов электромагнитного каротажного зондирования (ВЭМКЗ) в наклонных скважинах, пересекающих выявленные типичные геоэлектрические модели под разными углами, описаны основные изменения сигналов, обусловленные наклоном скважины, наличием электрически контрастных прослоев и электрической анизотропией.

Анализ результатов численного моделирования привел к выводу, что при отсутствии в модели высококонтрастных границ практически идентичны между собой сигналы ВЭМКЗ в диапазонах значений зенитного угла наклона скважины $0-30^\circ$ и $75-90^\circ$. Поэтому при значении до 30° может без ограничений применяться двумерная инверсия (спроецированных на вертикаль сигналов), а при значении более 75° в моделях среднего диапазона УЭС (до 50 Ом·м) можно моделировать сигналы для угла, например, 85° , а далее учитывать только изменение положения точек вдоль субгоризонтальной скважины с любым углом наклона в диапазоне $75-90^\circ$, что сократит время на моделирование. В пластах с электрической анизотропией влияние вертикального УЭС на сигналы также примерно одинаково в этом же диапазоне

угла наклона (75–90°) и незначительно в слабонаклонной скважине 0–30°. Разрешающая способность разности фаз выше, чем отношения амплитуд, как и чувствительность к повышенным значениям УЭС пластов небольшой толщины.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Аксельрод С.М.** Методы опережающей навигации при бурении горизонтальных скважин (по материалам зарубежной литературы) // Каротажник. 2012. № 9 (219). С. 87–122.
- Батурин А.Ю., Култышев А.К., Попов Д.А.** Геологическое моделирование фациально-изменчивых пластов на примере горизонта ЮС₂ Сургутского свода // Нефтяное хозяйство. 2007. № 8. С. 105–109.
- Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Даниловский К.Н., Еремин В.Н., Москаев И.А.** Телеметрические системы каротажа: программно-методическое обеспечение в процессе бурения наклонного-горизонтальных скважин // Деловой журнал Neftgaz.RU. 2017. № 10 (70). С. 42–49.
- Горбатенко А.А., Сухорукова К.В.** Особенности сигналов высокочастотного электромагнитного каротажа в наклонных и горизонтальных скважинах // Каротажник. 2014. № 11 (245). С. 42–55.
- Еремин В.Н., Волканин Ю.М., Тарасов А.В.** Аппаратурно-методическое обеспечение электромагнитного каротажа в процессе бурения // Каротажник. 2013. № 4 (226). С. 62–69.
- Казаненков В.А.** Геология, палеогеография и нефтегазоносность малышевского горизонта (верхний байос–бат) Западной Сибири: дисс. ... д.г.-м.н. (по спец. 1.6.11). Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2024. 586 с.
- Каринский А.Д.** Электромагнитное поле в моделях электрически анизотропной среды. М.: ГЕОС, 2018. 184 с.
- Копытов Е.В., Сухорукова К.В., Никитенко М.Н.** Инверсия данных высокочастотного электромагнитного каротажа в сильнонаклонных скважинах с определением электрической анизотропии // Каротажник. 2018. № 8 (290). С. 39–57.
- Михайлов И.В., Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Суродина И.В.** Совместная численная инверсия данных индукционных и гальванических каротажных зондирований в моделях геологических сред с осевой симметрией // Геология и геофизика. 2017. Т. 58, № 6. С. 935–947. doi:10.15372/GiG20170609.
- Нечаев О.В., Глинских В.Н.** Быстрый прямой метод решения обратной задачи электрического каротажа в нефтегазовых скважинах // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2017. Т. 15, № 4. С. 53–63. doi:10.25205/1818-7900-2017-15-4-53-63.
- Нечаев О.В., Глинских В.Н.** Трехмерное моделирование и инверсия данных комплекса методов электрокаротажа в моделях сред с наклоном главных осей тензора электрической анизотропии // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2018. Т. 16, № 4. С. 127–139. doi:10.25205/1818-7900-2018-16-4-127-139.
- Никитенко М.Н., Рабинович М.Б., Свиридов М.В.** Определение элементов залегания пластов по данным каротажа в процессе бурения методом переходных процессов // Геофизические технологии. 2021. № 2. С. 36–48. doi:10.18303/2619-1563-2021-2-36.
- 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. 2019. № 3 (297). С. 85–103.
- Петров А.М., Даниловский К.Н., Сухорукова К.В., Леоненко А.Р., Лапковская А.А.** Нейросетевой подход к экспресс-моделированию сигналов электрокаротажа в реалистичных моделях

сложнопостроенных терригенных отложений // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2021. Т. 48, № 4. С. 70–78. doi:10.20403/2078-0575-2021-4-70-78.

Севастьянов А.А., Коровин К.В., Зотова О.П., Зубарев Д.И. Геологические особенности и оценка добычного потенциала отложений тюменской свиты // Вестник Пермского университета. Геология. 2017. Т. 16, № 1. С. 61–67. doi:10.17072/psu.geol.16.1.1.61.

Сухорукова К.В. Определение электрофизических параметров терригенных отложений на основе совместной численной инверсии данных электрического и электромагнитного каротажа в вертикальных и наклонных скважинах: Дисс. ... д.т.н. (по спец. 25.00.10) Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2017. 357 с.

Сухорукова К.В., Копытов Е.В., Аржанцев В.С., Горбатенко А.А. Сигналы электрического и электромагнитного каротажа в наклонной скважине по данным численного моделирования // Каротажник. 2016. № 12 (270). С. 87–98.

Сухорукова К.В., Петров А.М., Нечаев О.В. Численная инверсия данных электрокаротажа в интервалах анизотропных глинистых отложений // Каротажник. 2017. № 4 (274). С. 34–48.

Темирбулатов О.П., Михайлов И.В., Суродина И.В. Обнаружение кровли коллектора по сигналам электрокаротажа в наклонно-горизонтальных скважинах: сравнительный анализ // Геофизические технологии. 2023. № 3. С. 46–57. doi:10.18303/2619-1563-2023-3-46.

Технология исследования нефтегазовых скважин на основе ВикиЗ: Методическое руководство / Под ред. М.И. Эпова, Ю.Н. Антонова. Новосибирск: НИЦ ОИГГМ СО РАН, Изд. 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., Никитенко М.Н., Глинских В.Н., Сухорукова К.В. Численное моделирование и анализ сигналов электромагнитного каротажа в процессе бурения // Каротажник. 2014. № 11 (245). С. 29–42.

Эпов М.И., Никитенко М.Н., Глинских В.Н., Еремин В.Н. Изучение электрической макроанизотропии интервалов наклонно-горизонтальных скважин по данным высокочастотного индукционного каротажа в процессе бурения // Каротажник. 2016а. № 11 (269). С. 94–109.

Эпов М.И., Никитенко М.Н., Сухорукова К.В., Глинских В.Н. Исследование возможностей электрического и электромагнитного каротажа в электрически макроанизотропных пластах, вскрытых наклонно-горизонтальными скважинами // Каротажник. 2016б. № 2 (260). С. 64–79.

REFERENCES

Akselrod S.M. Advance navigation in horizontal drilling (based on foreign publications) // Karotazhnik. 2012. Vol. 9 (219). P. 87–122. (In Russ.).

Baturin A.Yu., Kultyshev A.K., Popov D.A. Geological modelling of facies changeable layers on an example of US₂ horizon of the Surgut Arch // Oil Industry. 2007. No. 8. P. 105–109. (In Russ.).

Glinskikh V.N., Nikitenko M.N., Danilovskij K.N., Eremin V.N., Moskaev I.A. Telemetry logging systems: software and methodological support in the process of drilling inclined-horizontal wells // Neftegaz.RU. 2017. Vol. 10 (270). P. 42–49. (In Russ.).

Gorbatenko A.A., Sukhorukova K.V. Peculiarities of high-frequency electromagnetic logs in inclined and horizontal wells // Karotazhnik. 2014. Vol. 11 (245). P. 42–55. (In Russ.).

Eremin V.N., Volkanin Yu.M., Tarasov A.V. Tool-and-method support for electromagnetic logging while drilling // Karotazhnik. 2013. Vol. 4 (226). P. 62–69. (In Russ.).

- Kazanenkov V.A.** Geology, paleogeography and petroleum potential of the Malyshev horizon (upper Bajocian–Bathonian) of West Siberia (In Russ.). IPGG SB RAS, Novosibirsk, 2024. 586 p.
- Karinsky A.D.** Electromagnetic field in models of an electrically anisotropic medium (In Russ.). GEOS, Moscow, 2018. 184 p.
- Kopytov E.V., Sukhorukova K.V., Nikitenko M.N.** Inversion of high-frequency electromagnetic logs in subhorizontal wells with electrical anisotropy evaluation // *Karotazhnik*. 2018. Vol. 8 (290). P. 39–57. (In Russ.).
- Mikhaylov I.V., Glinskikh V.N., Nikitenko M.N., Surodina I.V.** Joint inversion of induction and galvanic logging data in axisymmetric geological models // *Russian Geology and Geophysics*. 2017. Vol. 58 (6). P. 752–762. doi:10.1016/j.rgg.2016.09.032.
- 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. (In Russ.). doi:10.25205/1818-7900-2017-15-4-53-63.
- Nechaev O.V., Glinskikh V.N.** Three-dimensional simulation and inversion of lateral logging sounding and lateral logging data in media with tilt of the main axes of the dielectric anisotropy tensor // *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*. 2018. Vol. 16 (4). P. 127–139. (In Russ.). doi:10.25205/1818-7900-2018-16-4-127-139.
- Nikitenko M.N., Rabinovich M.B., Sviridov M.V.** Determination of formation dip and strike from transient LWD electromagnetic measurements // *Russian Journal of Geophysical Technologies*. 2021. No. 2. P. 36–48. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2021-2-36.
- 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*. 2019. Vol. 3 (297). P. 85–103. (In Russ.).
- Petrov A.M., Danilovskiy K.N., Sukhorukova K.V., Leonenko A.R., Lapkovskaya A.A.** Neural network-based approach to resistivity logs express simulation in realistic models of complex terrigenous sediments // *Geology and Mineral Resources of Siberia*. 2021. Vol. 48 (4). P. 70–78. (In Russ.). doi:10.20403/2078-0575-2021-4-70-78.
- Sevastyanov A.A., Korovin K.V., Zotova O.P., Zubarev D.I.** Geological characteristics and assessment of the potential production of the Tyumen suite deposits // *Bulletin of Perm University. Geology*. 2017. Vol. 16 (1). P. 61–67. (In Russ.). doi:10.17072/psu.geol.16.1.1.61.
- Sukhorukova K.V.** Determination of electrophysical parameters of terrigenous deposits based on joint numerical inversion of electrical and electromagnetic logging data in vertical and inclined wells (In Russ.). IPGG SB RAS: Novosibirsk, 2017. 357 p.
- Sukhorukova K.V., Kopytov E.V., Arzhantsev V.S., Gorbatenko A.A.** Inclined-well electric and electromagnetic logging responses calculated by numerical simulation // *Karotazhnik*. 2016. Vol. 12 (270). P. 87–98. (In Russ.).
- Sukhorukova K.V., Petrov A.M., Nechaev O.V.** Numerical inversion of electric logs in anisotropic clay sediment intervals // *Karotazhnik*. 2017. Vol. 4 (274). P. 34–48. (In Russ.).
- Temirbulatov O.P., Mikhaylov I.V., Surodina I.V.** Reservoir top detection by resistivity logging signals in deviated and horizontal wells: comparative analysis // *Russian Journal of Geophysical Technologies*. 2023. No. 3. P. 46–57. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2023-3-46.
- 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 Russ.). Novosibirsk: Geo, 2002. 112 p.

Епов М., Kayurov K., Yeltsov I., Petrov A., Sukhorukova K., Sobolev A., Vlasov A. New apparatus complex SKL of geophysical logging and program-method means of EMF Pro interpretation // *Burenie i Neft'*. 2010. No. 2. P. 16–19. (In Russ.).

Епов М.И., Nikitenko M.N., Glinskikh V.N., Sukhorukova K.V. Numerical simulation and analysis of electromagnetic log responses while drilling // *Karotazhnik*. 2014. Vol. 11 (245). P. 29–42. (In Russ.).

Епов М.И., Nikitenko M.N., Glinskikh V.N., Eremin V.N. The study of an electrical macroanisotropy in the inclined-and-horizontal wells from the data of the high-frequency induction logging while drilling // *Karotazhnik*. 2016a. Vol. 11 (269). P. 94–109. (In Russ.).

Епов М.И., Nikitenko M.N., Sukhorukova K.V., Glinskikh V.N. Studies on capabilities of electric and electromagnetic logs in electrically macroanisotropic formations exposed by inclined horizontal boreholes // *Karotazhnik*. 2016b. Vol. 2 (260). P. 64–79. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

СУХОРИУКОВА Карина Владимировна – доктор технических наук, доцент, заведующая лабораторией многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: методика количественной интерпретации комплекса данных скважинной электрометрии в вертикальных и субгоризонтальных скважинах при разных условиях вскрытия нефтегазовых коллекторов, исследование влияния на измеряемые сигналы радиального профиля УЭС, определяемого технологией бурения и типом бурового раствора.

ПРИМАКОВ Сергей Алексеевич – аспирант, младший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: численная инверсия практических данных электрокаротажа, исследование особенностей синтетических сигналов высокочастотного индукционного каротажа в вертикальных и субгоризонтальных скважинах.

*Статья поступила в редакцию 29 декабря 2024 г.,
одобрена после рецензирования 14 января 2025 г.,
принята к публикации 15 января 2025 г.*