



ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МЕЛОВЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОМПЛЕКСНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОКАРОТАЖА

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

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия

Представлены результаты опробования нового программно-методического комплекса численной инверсии на данных электрокаротажа, измеренных в вертикальных скважинах на интервалах меловых коллекторов Западной Сибири. Для них характерны сложный радиальный профиль удельного электрического сопротивления, электрическая анизотропия и поляризуемость. В результате количественной интерпретации совокупности данных электрического и электромагнитного каротажных зондирований построены реалистичные геоэлектрические модели осадочных отложений Широкого Приобья, а также установлены связи электрической анизотропии и диэлектрической проницаемости с тонкослоистой структурой и глинистостью пород. В ИНГГ СО РАН разработаны методика количественной интерпретации сигналов указанных зондирований и программное обеспечение для их совместной численной инверсии. Это обеспечивает построение детальной геоэлектрической модели осадочных отложений, в которой учитываются влияние вмещающих пород, прискважинных зон, измененных фильтрацией бурового раствора, скважины, заполненной буровым раствором, и размеров каротажной аппаратуры. В результате уточняется удельное электрическое сопротивление тонких пластов-коллекторов в окружении контрастных вмещающих пород, выявляется электрическая анизотропия и оценивается диэлектрическая проницаемость.

Ключевые слова: электрокаротажное зондирование, совместная численная инверсия, двумерная геоэлектрическая модель, удельное электрическое сопротивление, диэлектрическая проницаемость, терригенный разрез.

GEOELECTRIC MODELS OF CRETACEOUS RESERVOIRS OF WEST SIBERIA BY THE RESULTS OF INTEGRATED INTERPRETATION OF ELECTRIC LOG DATA

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

A.A.Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

The results of testing a new software-methodological complex of numerical inversion on the data of electrical logging, measured in vertical wells in the intervals of Cretaceous reservoirs in West Siberia. They are characterized by a complex radial profile of electrical resistivity, electrical anisotropy and polarizability. As a result of the quantitative interpretation of a set of electrical (LLS) and electromagnetic (VEMLS) logging data, realistic geoelectric models of sedimentary deposits of the Latitudinal Ob Region were constructed, and the relationships between electrical anisotropy and dielectric constant with a thin-layered structure and clayiness of rocks were established. The software developed at IPGG SB RAS for the joint numerical inversion of the LLS and VEMLS signals, as well as the method for the quantitative interpretation of the data of these methods, provide the construction of a detailed geoelectric model of sedimentary deposits, which takes into account the influence of host rocks, zones changed by the filtration of the drilling mud, wells with mud and sizes of logging equipment. As a result, the electrical resistivity of thin reservoir layers surrounded by contrasting host rocks is specified, the electrical anisotropy is revealed, and the dielectric constant is estimated.

Keywords: electric logging sounding, joint numerical inversion, two-dimensional geoelectric model, electrical resistivity, dielectric constant, terrigenous section.

DOI 10.20403/2078-0575-2020-3-77-86

Типичный набор каротажных методов исследования в открытом стволе эксплуатационных скважин включает интегральный гамма-каротаж (ГК), нейтронный каротаж (НКТ), каротаж потенциала самополяризации (ПС), низкочастотный и высокочастотный индукционный каротаж (ИК и ВЭМКЗ), каротаж на постоянном токе градиент-зондами (БКЗ) и фокусированными зондами (БК). По этим диаграммам проводят литологическое расчленение и оценивают физические свойства пород. В соответствии с традиционными подходами по данным электрокаротажа определяется удельное электрическое сопротивление (УЭС) пород, окружающих скважину. По этому

значению расчленяется разрез и оценивается соотношение нефтяной и водной фазы в порах пластов-коллекторов.

Электрический каротаж обычно включает больше одного метода и чаще всего хотя бы один метод зондирования. Вместе с тем традиционно применяемая оценка УЭС пласта по значениям кажущегося сопротивления (КС) часто приводит к ошибкам оценки насыщения из-за того, что за значение УЭС часто принимается КС по одному из зондов БК, ИК, БКЗ или ВЭМКЗ. Зонды электрокаротажа в разной степени чувствительны к УЭС вмещающих пластов, к измененной прискважинной зоне, к буровому рас-

твору и диаметру скважины, а также к электрической анизотропии и поляризационным эффектам. Совместная инверсия в радиально-вертикальной слоистой модели дает гораздо более разрешенное по скважине распределение УЭС, соответствующее всему набору сигналов различных зондов.

Как известно, немагнитные горные породы характеризуются двумя параметрами: удельной электропроводностью и диэлектрической проницаемостью. Очень часто вместо удельной электропроводности используется обратная величина – УЭС. Традиционно предполагается, что УЭС является скалярной величиной. Вместе с тем микроструктура твердой матрицы, сформированная под значительным давлением вышележащих толщ, и тонкая слоистость песчано-глинистых пород, образованная в квазипериодически менявшихся условиях осаждения, определяют разницу физических свойств в плоскости наслоения и в перпендикулярном к ней направлении. В этом случае среда становится трансверсально изотропной и удельная электропроводность описывается диагональным тензором. Для его исследования разработаны новые приборы и методики интерпретации [3, 15, 16, 18]. Флюидонасыщенная порода со сложной геометрией порового пространства формирует отклики на электромагнитное воздействие, в которых проявляется частотная дисперсия электропроводности и относительной диэлектрической проницаемости. Последняя все чаще рассматривается при интерпретации сигналов индукционного каротажа, в том числе и низкочастотного [1, 6, 17].

Электрофизические свойства слабопроницаемых осадочных отложений определяются их минеральным составом, а коллекторов – проводящим ток флюидом (минерализованной пластовой водой), составом твердой матрицы (например, структурной глинистостью, при которой зерна частично представлены глинистыми минералами) и цемента, а также связанной или дисперсной пиритизацией. Упаковка зерен приводит к электрической анизотропии, которая отражена в сигналах БКЗ. Ионный характер электропроводности горных пород и наличие границ твердой фазы и пластового флюида обуславливают большие значения диэлектрической проницаемости и частотную дисперсию свойств (вследствие поляризации Максвелла – Вагнера и влияния двойного электрического слоя) [2]. Повышенные значения и частотная дисперсия диэлектрической проницаемости наблюдаются большей частью в глинистых породах в диапазоне частот ВЭМКЗ примерно 1–14 МГц.

Каждый из методов электрокаротажа оптимален для решения только части задач, а не всей их совокупности: БКЗ – для определения положения границ и УЭС нефтенасыщенного коллектора большой толщины, ИК – для выделения пластов низкого УЭС, БК – для исследования тонких пластов с высоким УЭС, ВЭМКЗ – для выявления коллекторов со смешанным насыщением по наличию окаймляющей

зоны. Длиной зондов и частотой электромагнитного поля определяются диапазоны толщины пластов и контраста УЭС, при которых КС может быть использовано для оценки нефтесодержания. За пределами этих диапазонов УЭС коллектора можно достоверно определить с помощью численной инверсии, т.е. подбора сигналов нескольких зондов разной глубинности на интервале скважины, рассчитывая их в модели, соответствующей по сложности исследуемым отложениям. Такая постановка позволяет устанавливать УЭС в тонких коллекторах, а также строение измененной зоны в случае небольшого времени между бурением и каротажом (когда зона проникновения еще не попала в зону чувствительности зондов ВЭМКЗ).

В ИНГГ СО РАН разработан программно-методический комплекс для совместной численной инверсии сигналов БКЗ и ВЭМКЗ. Его применение иллюстрируется результатом обработки данных, измеренных на интервале мелового коллектора БС₁₀ в скважинах Широтного Приобья. Полученная модель осадочных отложений сопоставлена с их составом и структурными особенностями.

Геоэлектрические модели коллектора БС₁₀

Рассмотрим набор каротажных данных, измеренных на интервале коллектора БС₁₀ в вертикальной скважине Федоровского месторождения. Данные представляют интерес по двум причинам. Во-первых, весь комплекс каротажа проведен прибором СКЛ-76 за одну спуско-подъемную операцию [5]. Именно при одновременном измерении можно наиболее точно восстановить параметры модели среды с помощью совместной инверсии ВЭМКЗ и БКЗ. Это связано с тем, что изменение во времени параметров зоны проникновения может существенно влиять на сигналы БКЗ и ВЭМКЗ [19], что негативно сказывается на самой возможности точной инверсии данных, так как данные измеряются фактически в разных средах. Во-вторых, визуальные признаки проникновения в данных ВЭМКЗ выражены слабо, за исключением нижней части коллектора, где характерное расхождение значений кажущегося УЭС (ρ_k) для зондов ВЭМКЗ соответствует понижающей зоне проникновения, что при бурении на глинистом буровом растворе отвечает влиянию развитой окаймляющей зоны [4] при небольшой толщине зоны проникновения.

По данным радиометрического и бокового каротажа верхняя часть коллектора сложена переслаиванием проницаемых песчаных и уплотненных (возможно карбонатизированных) прослоев (рис. 1). Из-за небольшой толщины прослоев по диаграммам ρ_k как ВЭМКЗ, так и БКЗ не представляется возможным выявить проницаемые интервалы и оценить параметры пластов. В таких условиях построить реалистичную геоэлектрическую модель прискважинного пространства можно только с применением совместной двумерной инверсии.

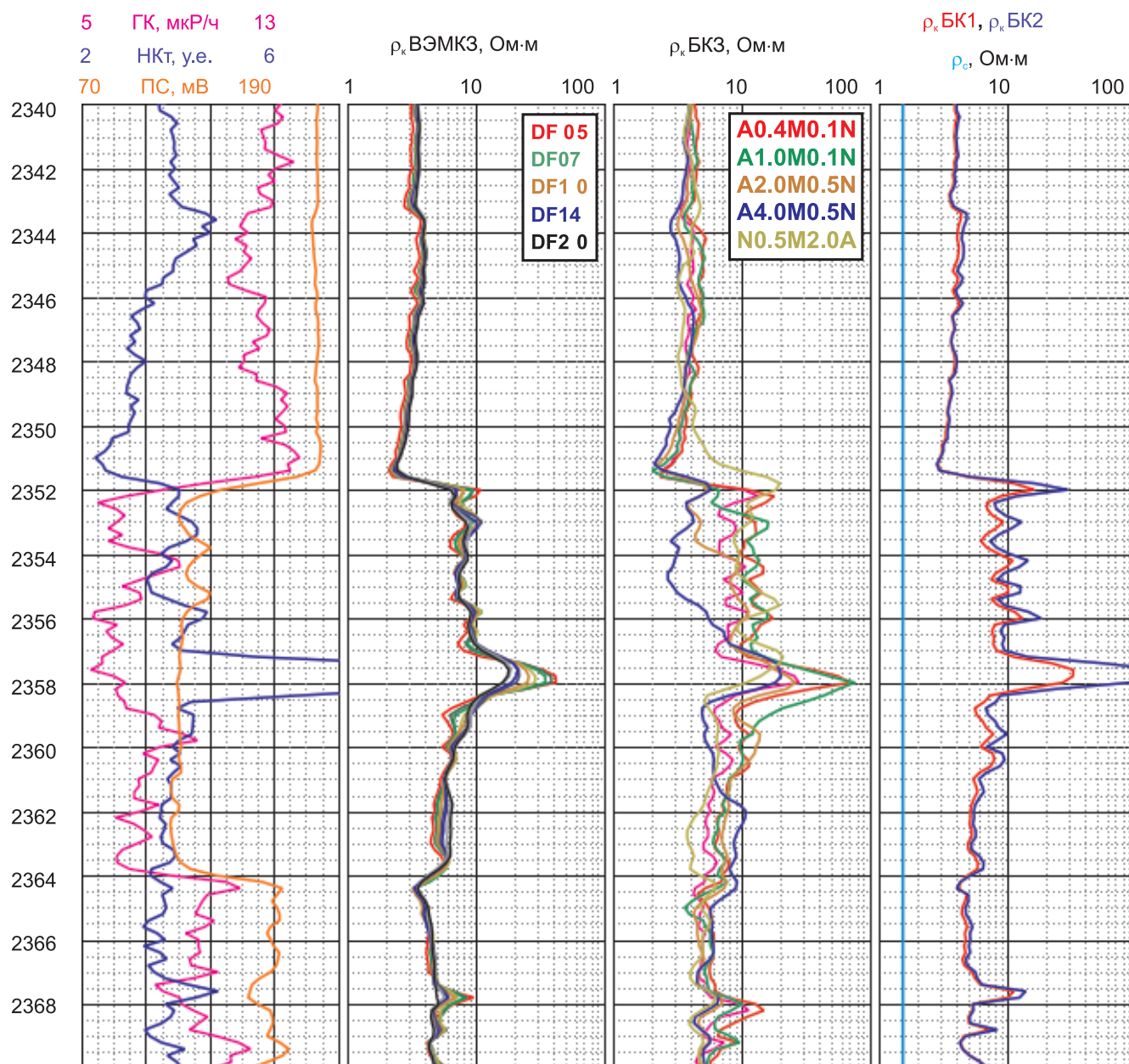


Рис. 1. Диаграммы ГИС, интервал коллектора БС₁₀ и глинистой покрышки. Вертикальная скважина, глинистый буровой раствор. Сигналы слева направо: ГК, НКт, ПС; кажущееся УЭС по данным ВЭМКЗ; кажущееся УЭС по данным БКЗ; кажущееся УЭС по данным БК и УЭС бурового раствора

Стартовая модель для инверсии строится в программной системе EMF Pro [8] на базе цилиндрически-слоистой модели с учетом данных ПС, ГК и НКт.

Количественная интерпретация включает несколько этапов. На первом этапе подбираются значения только УЭС пластов, на втором – УЭС и положения горизонтальных границ, на третьем добавляется вариация толщин измененных зон (при необходимости) и диэлектрической проницаемости. При анализе промежуточных результатов выявляется необходимость коррекции числа пластов, дополнительной увязки по глубине сигналов отдельных зондов с остальными, а также уточнения УЭС бурового раствора.

Полученная геоэлектрическая модель и сравнение рассчитанных в ней сигналов БКЗ и ВЭМКЗ

с измеренными приведены на рис. 2. Результат инверсии характеризуется высокой точностью подбора практических данных: рассчитанные по всем точкам интервала средние относительные невязки подбора сигналов БКЗ $\delta_{\text{avg}} = 5,22 \%$, разности фаз ВЭМКЗ – $\Delta_{\text{avg}} = 0,52^\circ$.

Наибольшим коэффициентом анизотропии УЭС характеризуются глинистые отложения ($\lambda \sim 1,3-1,7$), большая часть песчаных пластов – более низким коэффициентом ($\lambda \sim 1,0-1,3$). В двух пластах в нижней части разреза $\lambda > 1,5$. В обоих случаях рядом находятся контрастные границы, поэтому это повышение может быть обусловлено нелокальностью откликов градиент-зондов и небольшой неувязкой сигналов. В рассматриваемом примере подбирается одно эффективное значение относительной диэлек-

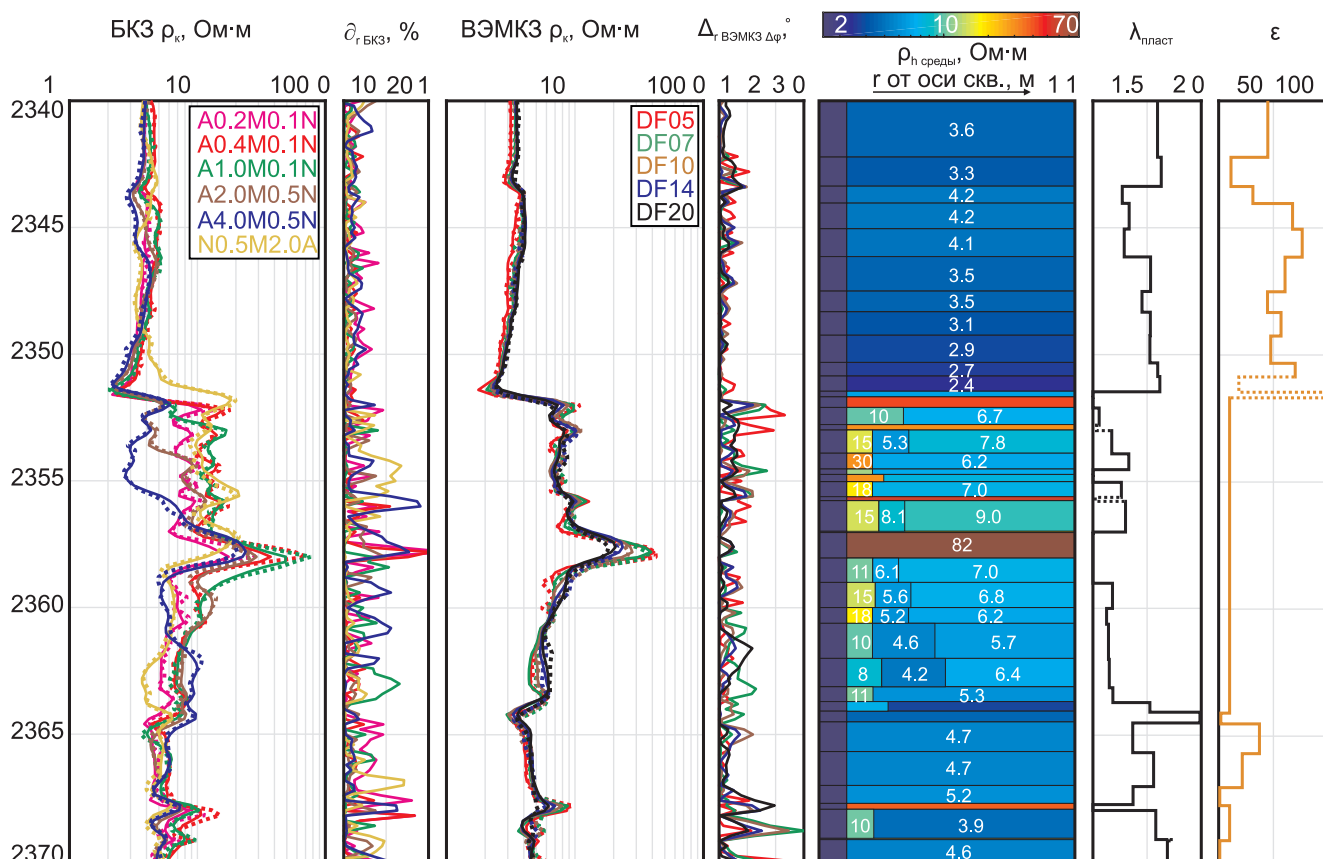


Рис. 2. Геоэлектрическая модель 2D коллектора БС₁₀ (пример 2). Слева направо: диаграммы измеренных (пунктир) и рассчитанных (сплошная линия) в результирующей геоэлектрической модели сигналов БКЗ (кажущееся УЭС); поточечные невязки измеренных и рассчитанных сигналов БКЗ; диаграммы ρ_k ВЭМКЗ (измерение и расчет); поточечные невязки для ВЭМКЗ; распределение горизонтального УЭС в пластах модели; коэффициент электрической анизотропии $\lambda = \sqrt{\rho_v / \rho_h}$; относительная диэлектрическая проницаемость ε . Пунктиром на диаграммах $\lambda_{\text{пласт}}$ и ε отмечены слои, для которых чувствительность сигналов к параметрам недостаточна для их определения с допустимой погрешностью

трической проницаемости (ε), определяемое самой высокой частотой ВЭМКЗ. В проницаемых пластах значения ε зафиксированы на характерном для этих песчаников значении ($\varepsilon = 10$), так как широкая модельная эквивалентность и невысокая чувствительность не позволяют корректно восстановить значения при наличии зон проникновения.

Совместная инверсия дает возможность восстановить детальную модель среды со сложным профилем изменения УЭС от стенки скважины вглубь пласта. При инверсии только данных ВЭМКЗ область эквивалентности значений ширины УЭС и окаймляющей зоны слишком широка для их точного определения, но дает возможность выявить эту зону как качественный признак наличия в пласте подвижной нефти. При совместной с БКЗ инверсии эта область эквивалентности значительно сужается, параметры зоны проникновения определяются намного точнее, что позволяет с использованием дополнительной априорной информации о разрезе и процессе бурения судить также и о проницаемости пластов-коллекторов [14]. При двумерной инверсии сигналов БКЗ и ВЭМКЗ учитывается существенное влияние вышележащего высокоомного уплотненного прослоя на сигналы, измеренные

ниже по разрезу, и восстанавливаются параметры измененных фильтрацией бурового раствора зон в проницаемых пластах.

По радиальному профилю УЭС коллектор делится на две части: 2352,2–2355,7 м и 2355,9–2363,8 м. В первом интервале породы уплотненные глинистые. Под ними находится высокоомный карбонатизированный пласт, ниже – нефтеводонасыщенные песчаные породы, УЭС которых снижается с глубиной, отражая гравитационное распределение нефти и пластовой воды. Почти во всех нефтеводонасыщенных пластах определяются выдержанные по ширине зоны проникновения и окаймляющие зоны. УЭС окаймляющих зон уменьшается с глубиной, а ширина увеличивается. Последнее также соответствует гравитационному распределению флюидов: явно выраженная окаймляющая зона формируется в пласте с подвижной нефтью, и чем больше содержание нефти, тем выше УЭС и меньше толщина этой зоны.

Наибольший интерес представляет часть коллектора в интервале 2358–2364 м. В этом проницаемом интервале по данным ВЭМКЗ с длиной зонда кажущееся УЭС увеличивается с 4,6 до 6,4 Ом·м. Иными словами, не наблюдается повышающей зоны проникновения, характерной для вскрытия

на глинистом растворе, а монотонно возрастающая кривая зондирования типична для однофазного флюидонасыщения. При этом кажущееся УЭС 4,6 Ом·м соответствует насыщению преимущественно пластовой водой, а 6,4 Ом·м – смешанному. По этой причине оценить нефтесодержание по значению ρ_k и его радиальному распределению невозможно. По результатам совместной инверсии окаймляющая зона выявляется во всех пластах этого интервала, что подтверждает наличие подвижной нефти.

Для совместной инверсии с некоторыми допущениями можно использовать и комплекс разновременных измерений БКЗ и ВЭМКЗ, если между измерениями прошло не очень большое время и в скважине не проводились операции, связанные с дополнительной фильтрацией в проницаемые пласты. Пример диаграмм таких данных в меловом разрезе показан на рис. 3. Верхняя часть интервала (до 2528 м) – глинистые отложения, в которых наблюдается достаточно большая вариация КС и сигналов радиоактивных методов. Ниже следует пачка пластов песчаников. Оценка их УЭС осложняется влиянием тонких высокоомных прослоев кар-

бонатов и глинистых отложений, УЭС которых такое же, что и в нефтеводонасыщенных пластах. По виду диаграмм кажущегося сопротивления в инт. 2534–2542 м можно предположить, что песчаники насыщены смесью нефти и пластовой воды, ниже – преимущественно водой. В кровельной части между карбонатными прослоями возможно высокое нефтесодержание, которое трудно оценить из-за влияния высокоомных пород.

В рассматриваемом примере совместная инверсия приводит к довольно контрастной по УЭС и тонкослоистой двумерной геоэлектрической модели (рис. 4). В интервале глинистой покрышки снизу вверх усиливается анизотропия УЭС при примерно одинаковых значениях горизонтального УЭС ρ_h и в среднем уменьшаются значения относительной диэлектрической проницаемости ε на всех частотах. Такие изменения могут быть связаны как с изменением микроструктуры глинистых отложений (снизу вверх растет упорядоченность более уплотненных глинистых частиц), так и с увеличением количества тонких более плотных прослоев. В самой глинистой толще наблюдаются локальные увеличения коэффициента анизотропии λ , что может быть связано с более выражен-

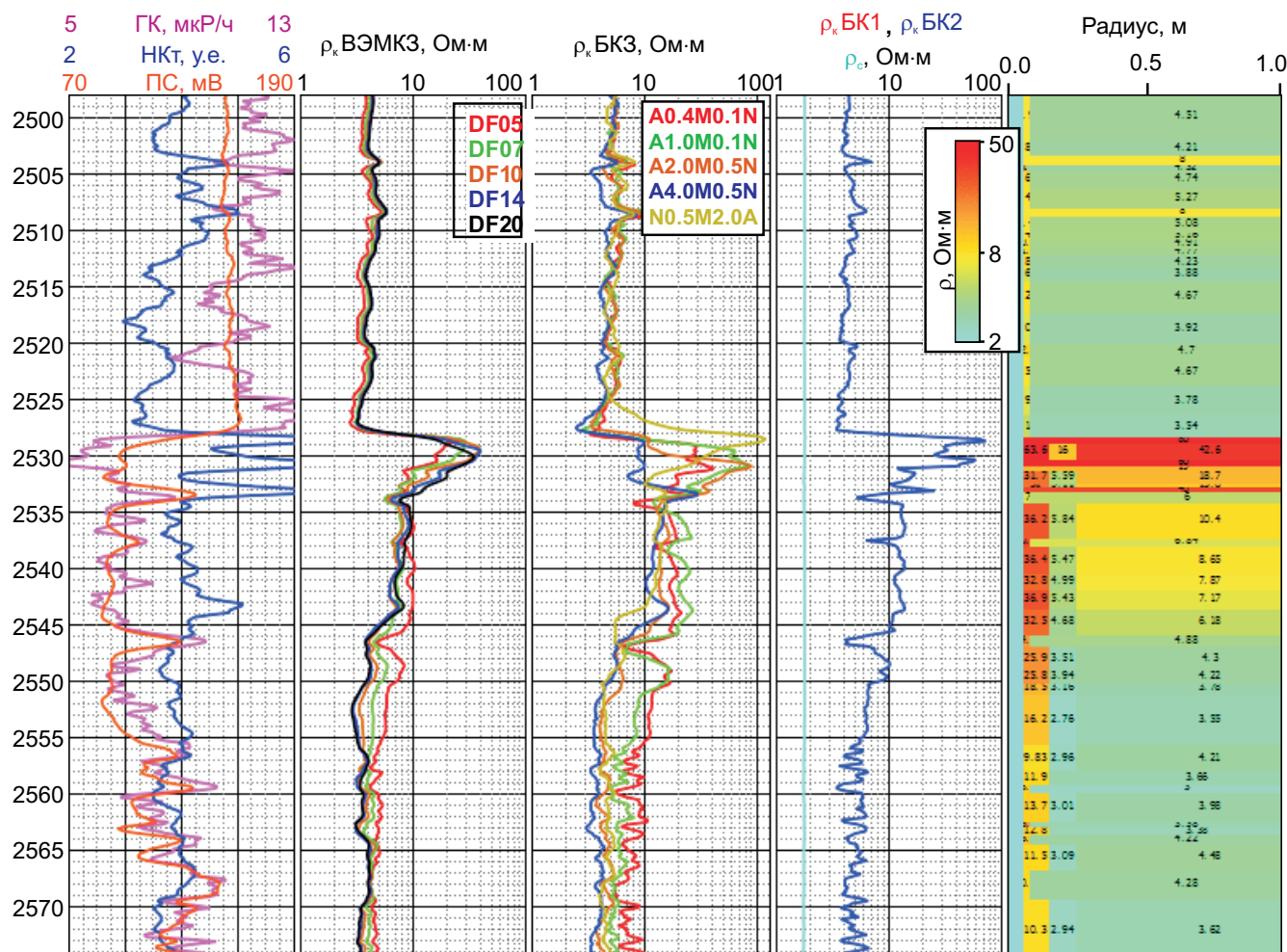


Рис. 3. Диаграммы ГИС, интервал коллектора БС₁₀ и глинистой покрышки. Вертикальная скважина, глинистый буровой раствор. Сигналы, слева направо: ГК, НКт, ПС; кажущееся УЭС ВЭМКЗ; кажущееся УЭС БКЗ; кажущееся УЭС БК и УЭС бурового раствора. Колонка справа – параметры пластов стартовой радиально-неоднородной геоэлектрической модели (радиус цилиндрических границ и УЭС пластов и измененных зон)

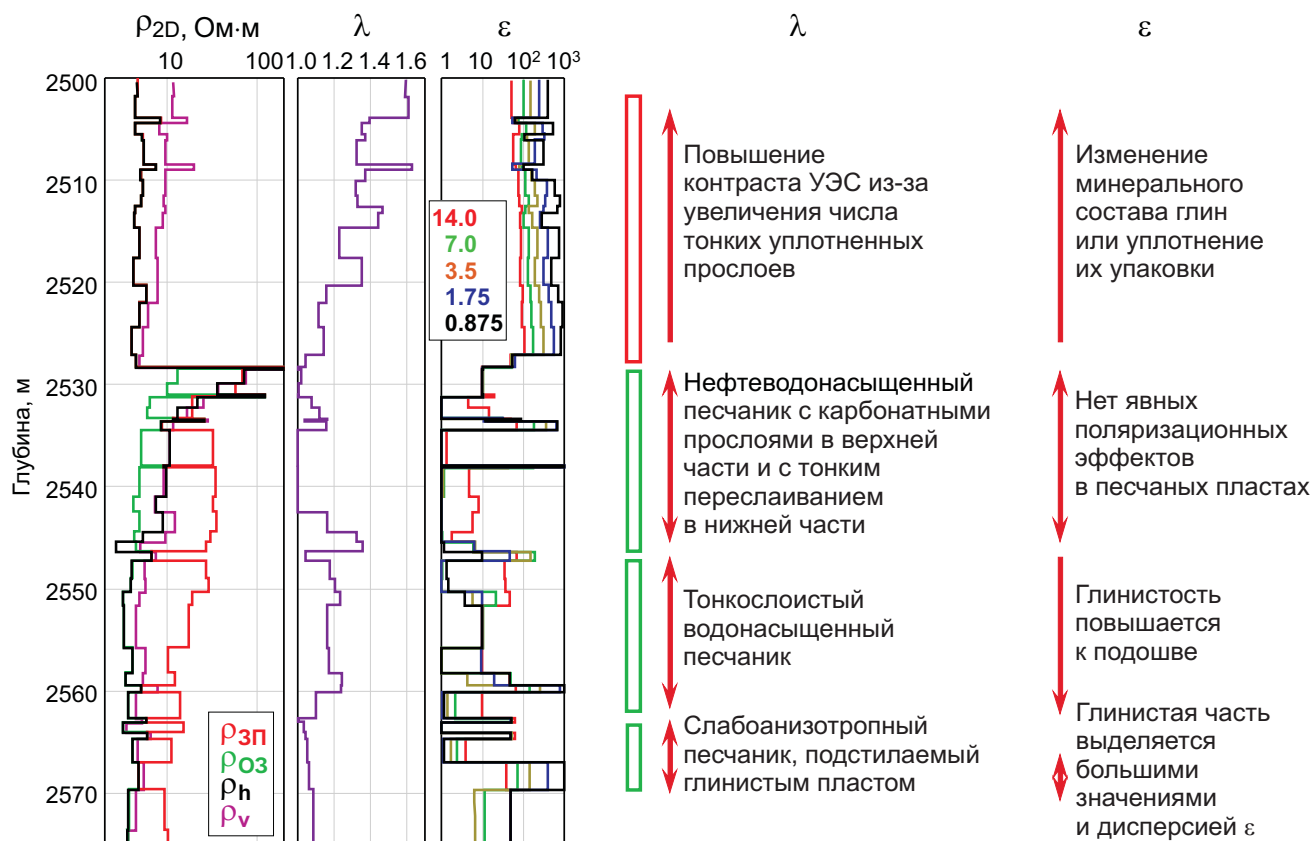


Рис. 4. Двумерная геоэлектрическая модель коллектора БС₁₀: значения УЭС ($\rho_{зп}$ – УЭС зоны проникновения, $\rho_{оз}$ – окаймляющей зоны, ρ_h и ρ_v – горизонтальное и вертикальное УЭС не измененной проникновением части пласта), коэффициент анизотропии $\lambda = \sqrt{\rho_v/\rho_h}$, относительная диэлектрическая проницаемость ε в зависимости от частоты зонда (легенда, в МГц)

ной слоистостью или с тем, что здесь преобладают глинистые частицы уплощенной формы. Последнее может также быть объяснением снижения значений ε в этих же пластах: уменьшается площадь квазивертикальных границ в твердой матрице, на которых может проявляться эффект Максвелла – Вагнера.

В верхней части коллектора (2528,5–2545,4 м) установлено наличие окаймляющей зоны, толщина которой в среднем составляет около 0,2 м, вверху (2528,5–2531,0 м) – около 0,1 м, а УЭС снижается приблизительно с 13,0 до 4,5 Ом·м. Это отражает увеличение содержания пластовой воды с глубиной и, возможно, меньшую пористость в верхнем интервале между двух карбонатных прослоев. Значение λ в инт. 2531,3–2534,5 м изменяется от 1,10 до 1,15, что, скорее всего, связано с влиянием тонких прослоев и линз карбонатизации, по отдельности неразличимых для методов ГИС. Возрастание λ с 1,2 до 1,3 к низу инт. 2542,5–2545,4 м может отражать тонкую слоистость, обусловленную сменой размера осаждавшихся частиц. Отсутствие анизотропии между этими интервалами – признак изометричности зерен матрицы и структуры порового пространства. Значение ε во всем интервале кроме глинистого прослоя 2533,6–2534,5 м определяется равным не более 10 для наибольшей частоты и 1–2 для остальных, что является признаком малого содержания глинистого вещества.

Ниже 2545,4 м окаймляющая зона не выявлена, поэтому можно говорить об отсутствии подвижной нефти. Инт. 2546,3–2560,0 м с повышенным коэффициентом анизотропии (около 1,2), вероятнее всего, тонкослоистый, что обусловлено отложением зерен разного размера; при этом увеличение ε до нескольких единиц к нижней границе интервала на всех частотах может быть признаком глинизации.

Нижний интервал (ниже 2560,0 м) сложен песчаными и глинистыми пластами; его слабая анизотропия обусловлена практически одинаковым УЭС водонасыщенных песчаных и глинистых прослоев. Повышенные значения и частотная дисперсия ε определяются в глинистых слоях.

Проведен сопоставительный анализ полученных значений электрофизических параметров для пластов разного состава (рис. 5). Для построения зависимостей выбрана $\Delta\varepsilon$ – разница значений ε на нижней и верхней частотах (0,875 и 14,0 МГц) как величина, характеризующая одновременно и сами значения, и их частотную дисперсию. Таким образом отсекаются значения в несколько единиц, определяющиеся в песчаных пластах только на верхней частоте из-за возможного влияния неосесимметричного положения прибора ВЭМКЗ или изменения свойств породы у стенки скважины между каротажными БКЗ и ВЭМКЗ (на повышенные значения в глинах эти изменения не влияют). Четыре голубых треугольника

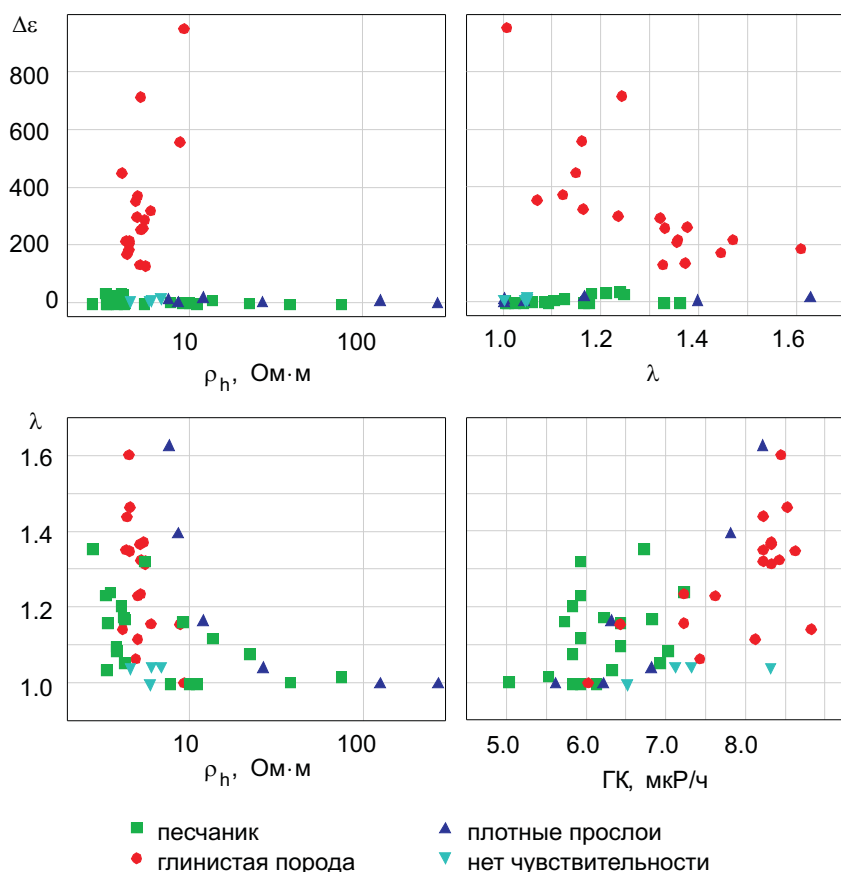


Рис. 5. Сопоставительный анализ параметров 2D геоэлектрической модели между собой и с данными интегрального ГК (ρ_h – горизонтальное УЭС неизменной части пласта, λ – коэффициент анизотропии УЭС, $\Delta\epsilon$ – разность значений относительной диэлектрической проницаемости на частотах 0,875 и 14 МГц)

показывают свойства пластов, для которых чувствительность сигналов каротажа оказывается слишком низкой для уверенного определения параметров.

В зависимости $\Delta\epsilon(\rho_h)$ все песчаные и карбонатные пласты характеризуются невысокими значениями $\Delta\epsilon$ независимо от значения ρ_h . Значения для глинистых пластов группируются в области невысоких ρ_h , но частотная дисперсия диэлектрической проницаемости значительна: для большей части пластов $\Delta\epsilon$ лежит в диапазоне от 130 до 500, а для трех пластов – от 500 до 1000.

В распределении $\Delta\epsilon(\lambda)$ для глинистых пород просматривается тенденция уменьшения дисперсии ϵ с увеличением коэффициента электрической анизотропии. Возможно, это обусловлено тем, что коэффициент анизотропии большой для отложений из более уплотненных частиц, ориентированных горизонтально, а в таком случае в среде меньше площадь вертикальных границ раздела матрица – пора, на которых скапливаются ионы в соответствии с механизмом поляризации Максвелла – Вагнера.

На кросс-плоте $\lambda(\rho_h)$ заметно, что анизотропия УЭС уменьшается с увеличением горизонтального УЭС пласта. Максимальные значения λ наблюдаются для пластов с низким ρ_h – до 10 Ом·м. В этот диапазон попадают все низкоомные глинистые и уплотненные пласты и пласты песчаников водонасыщенных (2–4 Ом·м) и со смешанным насыщением (5–6 Ом·м). Поскольку для песчаников не определяются высоких значений ϵ , повышенные значения λ могут быть обусловлены структурным фактором:

слоистостью, зависящей от смены размера зерен, или упаковкой зерен неизометричной формы.

График $\lambda(\text{ГК})$, в свою очередь, показывает тенденцию усиления электрической анизотропии с увеличением содержания глинистого компонента. Данная тенденция выражена для глинистых и плотных пластов, но не наблюдается для песчаных. Это подтверждает вывод о том, что в последних электрическая анизотропия отражает геометрические особенности твердой матрицы и порового пространства.

Программно-методический комплекс инверсии данных электрокаротажа

При традиционном подходе к интерпретации сигналов электрокаротажа их значения на интервале каждого пласта усредняются и полученные пластовые отсчеты рассматриваются как сигналы в пласте большой толщины [8, 19], т. е. не учитывается влияние соседних пластов. При небольшой толщине продуктивных пластов такой подход становится неэффективным. Расчет сигналов в модели с учетом влияния вмещающих пород позволяет оценивать свойства гораздо более тонких пластов. При этом подбирается не средний уровень сигналов, а их изменение при профилировании вдоль скважины [13].

Осесимметричная геоэлектрическая модель представляет собой комплекс горизонтальных и цилиндрических границ, делящих окружающее каротажный прибор пространство на горизонтальные пласты осадочных пород, измененные проникновением фильтрата бурового раствора зоны, и скважины.

ну. В каждом участке пласта задается горизонтальное и вертикальное УЭС (ρ_h и ρ_v), а также значение относительной диэлектрической проницаемости (ϵ). Алгоритмы численного моделирования и совместной инверсии данных БКЗ и ВЭМКЗ с оценкой анизотропии УЭС и диэлектрической проницаемости на частотах ВЭМКЗ подробно описаны в [7, 9, 10]. Методическое обеспечение количественной интерпретации [11] основано на итерационном подходе к инверсии данных с последовательным подбором параметров разных типов модели с учетом априорной информации.

Программное обеспечение и методические приемы тестировались на большом объеме реалистичных изотропных и анизотропных моделей песчано-глинистых отложений со сложным радиальным профилем УЭС. Тестирование показало хорошую точность определения практически значимых модельных параметров в диапазонах значений, типичных для Западно-Сибирского терригенного разреза. С применением численного моделирования сигналов в анизотропных средах с учетом скважины и корпуса прибора обосновано применение разработанной методики в терригенном разрезе при отклонении зенитного угла встречи скважины и границ пластов от нуля в пределах 15° [11].

Стандартной практикой оценки качества подбора сигналов является невязка между наблюдаемыми и рассчитанными кривыми. Для подбора на интервале скважины используются относительная

поточечная невязка $\partial = \left| \rho_{ij} - \rho_{ij}^a \right| / \rho_{ij} \cdot 100$ для БКЗ и аб-

солютная $\Delta = \left| \Delta\phi_{ij} - \Delta\phi_{ij}^a \right|$ для ВЭМКЗ, где ρ_{ij} – кажущееся УЭС в точке i по глубине для j -го зонда БКЗ по

данным каротажа; ρ_{ij}^a – кажущееся УЭС в точке i для j -го зонда, рассчитанное в модели; $\Delta\phi_{ij}$ – разность фаз в точке i , измеренная j -м зондом ВЭМКЗ; $\Delta\phi_{ij}^a$ – разность фаз, рассчитанная в модели.

При инверсии данных одного метода такая невязка подходит для оценки результата, так как сигналы измерены одним прибором за одну спуско-подъемную операцию и хорошо увязаны между собой. Но совместная инверсия данных двух и более методов осложняется недостаточной увязкой их данных по глубине. Точность увязки обычно ограничена шагом представления данных, чаще всего равным 0,2 м. При инверсии неточно увязанных данных алгоритм находит значения параметров, максимально отвечающие данным обоим методам. Однако в области контрастных границ резко возрастают значения поточечной невязки, так как она не учитывает погрешность позиционирования измерений по глубине (см. рис. 2). Поэтому для оценки качества инверсии предлагается использовать модифицированную поточечную невязку $\partial_r = \left| \rho_{ij}^* - \rho_{ij}^a \right| / \rho_{ij}^* \cdot 100$ для БКЗ и $\Delta_r = \left| \Delta\phi_{ij}^* - \Delta\phi_{ij}^a \right|$ для ВЭМКЗ, где ρ_{ij}^* и $\Delta\phi_{ij}^*$ – значения, полученные на основе линейной интерполяции измеренных сигна-

лов в пределах $\pm 0,5$ шага по глубине от точки i , такие, что значения $\left| \rho_{ij}^* - \rho_{ij}^a \right|$ для БКЗ и $\left| \Delta\phi_{ij}^* - \Delta\phi_{ij}^a \right|$ для ВЭМКЗ минимальны. Невязка, заданная таким образом, более точно отражает качество инверсии, чем обычная поточечная невязка. Например, результат инверсии на рис. 3 характеризуется средней модифицированной невязкой $\partial_{r\text{ avg}} = 2,38\%$, $\Delta_{r\text{ avg}} = 0,29^\circ$, а значения обычной невязки примерно в два раза больше ($\partial_{\text{avg}} = 5,22\%$, $\Delta_{\text{avg}} = 0,52^\circ$). Существенная разница невязок связана с наличием в разрезе границ между пластами, УЭС которых сильно различаются, и погрешностью увязки сигналов по глубине примерно на 0,5 шага.

Для подтверждения высокой достоверности результатов интерпретации проведено масштабное тестирование программного комплекса на синтетических и практических данных (более 700 м интервалов скважин), показавшее хорошую точность определения параметров моделей и соответствие электрических параметров отложений данным других методов исследования и геологической информации о породах разреза.

Выводы

Для меловых отложений Широтного Приобья Западной Сибири проведена количественная интерпретация данных высокочастотного электромагнитного и бокового каротажных зондирований. Построены детальные геоэлектрические модели мелового коллектора БС₁₀ с определением электрофизических параметров пластов и измененных фильтрацией бурового раствора зон и с выявлением нефтесодержащих интервалов. Показана связь определенных значений электрофизических параметров меловых отложений с их предполагаемой слоистостью, глинистостью и карбонатизацией. Для построения геоэлектрических моделей применена оригинальная методика количественной интерпретации данных БКЗ и ВЭМКЗ на основе совместной численной инверсии практических данных с оценкой вертикального УЭС проницаемых отложений.

Методическая часть исследования и интерпретация результатов инверсии практических данных выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-00240; модернизация и тестирование программного обеспечения – при финансовой поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0014 «Скважинная геофизика в электропроводящих анизотропных диспергирующих средах на основе высокопроизводительных решений трехмерных задач, высокоточных данных каротажа и лабораторных исследований керна».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксельрод С. М. Влияние частотной дисперсии электрических свойств горных пород на результаты определения удельного сопротивления пластов (по материалам зарубежной литературы) // Каротажник. – 2007. – Вып. 10. – С. 103–126.



2. Аксельрод С. М. Новые тенденции в диэлектрическом каротаже (по материалам зарубежной печати) // Каротажник. – 2012. – № 4. – С. 78–112.

3. Алгоритмы обработки и инверсии данных электромагнитного зонда с тороидальными катушками при изучении макроанизотропных свойств пластов-коллекторов / М. И. Эпов, И. В. Михайлов, В. Н. Глинских и др. // Изв. ТПУ. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 6. – С. 187–197.

4. Антонов Ю. Н., Сметанина Л. В., Михайлов И. В. Окаймляющая зона как признак подвижной нефти в терригенных коллекторах // Каротажник. – 2012. – № 6. – С. 16–40.

5. Аппаратурный комплекс СКЛ для каротажа в нефтегазовых скважинах и его интерпретационная база / К. Н. Каюров, В. Н. Еремин, А. Н. Петров и др. // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 9. – С. 38–43.

6. Глинских В. Н., Федосеев А. А. Новый подход к литолого-электрофизической интерпретации данных электромагнитных зондирований в интервалах баженовской свиты // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2019. – № 4 (40). – С. 80–88.

7. Нечаев О. В., Глинских В. Н. Трехмерное моделирование и инверсия данных комплекса методов электрокаротажа в моделях сред с наклоном главных осей тензора электрической анизотропии // Вестн. НГУ. Сер. Информационные технологии. – 2018. – Т. 16, № 4. – С. 127–139.

8. Новый аппаратный комплекс геофизического каротажа СКЛ и программно-методические средства интерпретации EMF PRO / М. И. Эпов, К. Н. Каюров, И. Н. Ельцов и др. // Бурение и нефть. – 2010. – № 2. – С. 16–19.

9. Петров А. М., Нечаев О. В., Сухорукова К. В. Двумерная инверсия сигналов российского электрокаротажа, измеренных на интервалах сложнопостроенных отложений // Геомодель-2019: матер. конф. – 2019. – 4 с. – URL: <https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.201950044>.

10. Петров А. М., Сухорукова К. В., Нечаев О. В. Геоэлектрическая модель отложений баженовской свиты по данным бокового и электромагнитного каротажных зондирований // Совместный семинар EAGE/SPE «Наука о сланцах: проблемы разведки и разработки». – 2017. – 4 с. – URL: <http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=87776>.

11. 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.

12. Суродина И. В. Параллельные алгоритмы для решения прямых задач электрического каротажа на графических процессорах // Математические заметки СВФУ. – 2015. – Т. 22, № 2. – С. 51–61.

13. 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.

14. Эволюция зоны проникновения по данным электромагнитного каротажа и гидродинамического моделирования / М. И. Эпов, И. Н. Ельцов, А. А. Кашеваров и др. // Геология и геофизика. – 2004. – № 8. – С. 1033–1044.

15. Anderson B., Barber T., Habashy T. The interpretation and inversion of fully triaxial induction data: a sensitivity study. Transactions of the SPWLA 43rd Annual Logging Symposium. – Oiso, Japan. – 2002. – June 2–5. – Paper O.

16. Joint inversion of induction and galvanic logging data in axisymmetric geological models / I. V. Mikhaylov, V. N. Glinskikh, M. N. Nikitenko, et al. // Russian Geology and Geophysics. – 2017. – Vol. 58, no. 6. – P. 752–762.

17. Observations of large dielectric effects on LWD propagation-resistivity logs / B. I. Anderson, T. D. Barber, M. G. Luling, et al. // SPWLA 48th Annual Logging Symposium. – 2007. – June 3–6. – Paper BB.

18. Using multicomponent induction log data to enhance formation evaluation in deepwater reservoirs from Campos Basin, Offshore Brasil / R. Gomes, P. Denicol, A. da Cunha, et al. // Transactions of the SPWLA 43rd Annual Logging Symposium. – Oiso, Japan. – 2000. – June 2–5. – Paper N.

19. Yeltsov I. N., Nesterova G. V., Kashevarov A. A. Petrophysical interpretation of time-lapse electromagnetic sounding in wells // Russian Geology and Geophysics. – 2011. – Vol. 52, no. 6. – P. 668–675.

REFERENCES

1. Akselrod S.M. [Influence of frequency dispersion of electrical properties of rocks on the results of determining the resistivity of formations (based on materials from foreign literature)]. *Karotazhnik*, 2007, issue 10, pp. 103–126. (In Russ.).

2. Akselrod S.M. [New trends in dielectric logging (based on materials from foreign press)]. *Karotazhnik*, 2012, no. 4, pp. 78–112. (In Russ.).

3. Epov M.I., Mikhailov I.V., Glinskikh V.N., et al. [Algorithms for data processing and inversion from an electromagnetic probe with toroidal coils in the study of macroanisotropic properties of reservoirs]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets engineering*, 2019, vol. 330, no. 6, pp. 187–197. (In Russ.).

4. Antonov Yu.N., Smetanina L.V., Mikhaylov I.V. *Okaymlyayushchaya zona kak priznak podvizhnoy nefiti v terrigennykh kolektorakh* [The annulus as a sign of mobile oil in terrigenous reservoirs]. *Karotazhnik*, 2012, no. 6, pp. 16–40. (In Russ.).

5. Kayurov K.N., Eremin V.N., Petrov A.N., et al. [SKL hardware system for logging in oil-gas wells and

its interpretation base]. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2015, no. 9, pp. 38–43. (In Russ.).

6. Glinskikh V.N., Fedoseev A.A. [A new approach to lithological-electrophysical interpretation of electromagnetic sounding data in the intervals of the Bazhenovskaya Formation interval]. *Geologiya i mineralno-syryevye resursy Sibiri – Geology and mineral resources of Siberia*, 2019, no. 4 (40), pp. 80–88. (In Russ.).

7. 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 NGU. Seriya: Informatsionnye tekhnologii*, 2018, vol. 16, no. 4, pp. 127–139. (In Russ.).

8. Epov M.I., Kayurov K.N., Eltsov I.N., et al. [New apparatus complex for SKL geophysical logging and program-method means for EMF PRO interpretation]. *Burenie i neft*, 2010, no. 2, pp. 16–19. (In Russ.).

9. 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: 21-ya konferentsiya po voprosam geologorazvedki i razrabotki mestorozhdeniy nefti i gaza (Gelendzhik, 9–13 sentyabrya 2019 g.): Tezisy dokladov* [Geomodel-2019: 21st conference on geological exploration and development of oil and gas fields. Abstracts]. Gelendzhik, 2019, p. 4. Available at: <https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.201950044>. (In Russ.).

10. Petrov A.M., Sukhorukova K.V., Nechaev O.V. [Gеоelectric Model of the Bazhenov Formation Deposits According to Electrical and Electromagnetic Logging Sounding Data]. *Sovmestnyy seminar EAGE/SPE «Nauka o slantsakh: problemy razvedki i razrabotki»* [EAGE/SPE Joint Workshop 2017. Shale Science: Prospecting Development. 10–11 April 2017, Moscow, Russia]. Moscow, 2017, p. 4. Available at: <http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=87776>. (In Russ.).

11. Petrov A.M., Sukhorukova K.V., Nechaev O.V. [Joint 2D inversion of electrical and electromagnetic

logging data in anisotropic models of sandy-argillaceous deposits]. *Karotazhnik*, 2019, no. 3 (297), pp. 85–103. (In Russ.).

12. Surodina I.V. [Parallel algorithms for solving direct problems of electrical logging on graphic processors]. *Matematicheskie zametki SVFU*, 2015, vol. 22, no. 2, pp. 51–61. (In Russ.).

13. Sukhorukova K.V., Petrov A.M., Nechaev O.V. [Numerical inversion of electric logs in anisotropic clay sediment intervals]. *Karotazhnik*, 2017, no. 4(274), pp. 34–48. (In Russ.).

14. Epov M.I., Eltsov I.N., Kashevarov A.A., et al. [Evolution of the invaded zone inferred from electromagnetic logging and hydrodynamic modeling]. *Geologiya i geofizika*, 2004, no. 8, pp. 1033–1044. (In Russ.).

15. Anderson B., Barber T., Habashy T. The interpretation and inversion of fully triaxial induction data: a sensitivity study. *Transactions of the SPWLA 43rd Annual Logging Symposium*. Oiso, Japan, 2002, June 2–5, paper O.

16. Mikhaylov I.V., Glinskikh V.N., Nikitenko M.N., et al. Joint inversion of induction and galvanic logging data in axisymmetric geological models. *Russian Geology and Geophysics*, 2017, vol. 58, no. 6, pp. 752–762.

17. Anderson B.I., Barber T.D., Luling M.G., et al. Observations of large dielectric effects on LWD propagation-resistivity logs. *SPWLA 48th Annual Logging Symposium*, 2007, June 3–6, paper BB.

18. Gomes R., Denicol P., da Cunha A., et al. Using multicomponent induction log data to enhance formation evaluation in deepwater reservoirs from Campos Basin, Offshore Brasil. *Transactions of the SPWLA 43rd Annual Logging Symposium*, Oiso, Japan, 2000, June 2–5, paper N.

19. Yeltsov I.N., Nesterova G.V., Kashevarov A.A. Petrophysical interpretation of time-lapse electromagnetic sounding in wells. *Russian Geology and Geophysics*, 2011, vol. 52, no. 6, pp. 668–675.

© К. В. Сухорукова, А. М. Петров, О. В. Нечаев, 2020