

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МЕЛОВЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ И СИГНАЛЫ ЭЛЕКТРОКАРОТАЖА

Карина Владимировна Сухорукова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, ведущий научный сотрудник; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, доктор технических наук, доцент, старший преподаватель, phone: (383)330-49-52, e-mail: SuhorukovaKV@ipgg.sbras.ru

Алексей Михайлович Петров

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник; Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, аспирант, e-mail: PetrovAM@ipgg.sbras.ru

Илья Алексеевич Москаев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, инженер; Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, магистрант, e-mail: MoskaevIA@ipgg.sbras.ru

Олег Валентинович Нечаев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, e-mail: NechayevOV@ipgg.sbras.ru

Марина Николаевна Никитенко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: NikitenkoMN@ipgg.nsc.ru

Геоэлектрические модели описывают пласты основных пород меловых отложений Западной Сибири. Проницаемые пласты могут быть изотропными или анизотропными и включают измененные при бурении зоны. По диаграммам гальванического и электромагнитного каротажа в моделях, составленных из тонких электрически контрастных пластов, часто нельзя точно оценить УЭС пластов. Частичным решением проблемы является применение особых трансформаций, более точное определение модельных параметров обеспечивает 2D инверсия.

Ключевые слова: геоэлектрические модели, численное моделирование, боковое каротажное зондирование, высокочастотное электромагнитное каротажное зондирование, боковой каротаж.

GALVANIC AND ELECTROMAGNETIC LOGS IN MODELS OF WEST-SIBERIAN CRETACEOUS FORMATIONS

Carina V. Sukhorukova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Leading Researcher; Novosibirsk National Research State University, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630073, Russia, D. Sc., Associate Professor, Senior Lecturer, phone: (383)330-49-52, e-mail: SuhorukovaKV@ipgg.sbras.ru

Aleksey M. Petrov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher, Novosibirsk State University, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D. Student, e-mail: PetrovAM@ipgg.sbras.ru

Ilya A. Moskaev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Engineer; Novosibirsk National Research State University, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630073, Russia, Graduate, e-mail: MoskaevIA@ipgg.sbras.ru

Oleg V. Nechaev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, e-mail: oleg.v.nechaev@gmail.com

Marina N. Nikitenko

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, e-mail: NikitenkoMN@ipgg.nsc.ru

Geoelectric models describe the main types of the Cretaceous sediments of Western Siberia. Permeable layers in thin-layered model may be isotropic or anisotropic and include invaded and annulus zones formed during drilling. Galvanic and electromagnetic logs do not provide an accurate resistivity evaluation for thin electrically contrasting layers. The use of special signal transformations partially solves this problem, but 2D inversion provides a more reliable estimation of model parameters.

Key words: geoelectric model, computational simulation, lateral logging, Russian lateral logging, electromagnetic logging.

Одно из перспективных направлений практического развития количественной интерпретации данных электрометрии в вертикальных скважинах – совместная численная инверсия сигналов бокового каротажного зондирования (БКЗ) и высокочастотного электромагнитного каротажа (ВЭМКЗ). Этот подход показал хорошие результаты в одномерных моделях песчаных коллекторов, обеспечив надежное восстановление радиального распределения УЭС при решении задач фильтрации глинистого бурового раствора [1]. Создание и внедрение комплексной каротажной аппаратуры серии СКЛ [2] обеспечивает геофизиков сигналами зондов БКЗ, ВЭМКЗ и бокового каротажа фокусированными зондами (БК), измеренными практически одновременно, что делает возможным определение по их комплексу параметров двумерной геоэлектрической модели [3, 4]. Параметры модели: положение горизонтальных и радиальных границ, удельное электрическое сопротивление (УЭС) для изотропных областей, горизонтальное и вертикальное УЭС для анизотропных областей, диэлектрическая проницаемость и диаметр корпуса аппаратуры.

Сигналы зондов БК, БКЗ и ВЭМКЗ при нормальном пересечении пластов в разной степени чувствительны к их параметрам и отражают несимметричное строение зондов. Наиболее сложная для визуального анализа форма характерна для диаграмм значений кажущегося УЭС (ρ_k), определенного по сигналам БКЗ.

Чтобы исследовать сигналы в условиях типичных разрезов Западной Сибири, проведено их численное моделирование для основных типов геоэлектрических моделей и набора зондов аппаратуры СКЛ-76 (диаметр корпуса 0.076 м).

Для моделирования сигналов БК, ВЭМКЗ и БКЗ в двухмерных моделях сред использовались программы комплекса AlondraWL [5–6], основанные на конечно-элементных алгоритмах. Во всех используемых программах модель состоит из горизонтальных анизотропных пластов, в каждом из которых можно задать сложное радиальное строение прискважинной области, а также диаметр скважины и УЭС бурового раствора. Один из важных параметров модели – диаметр непроводящего корпуса прибора, потому что вытеснение им бурового раствора изменяет сигналы зондов постоянного тока.

Сигналы представлены в виде диаграмм кажущегося УЭС. Для градиент-зондов значения ρ_k традиционно рассчитаны по однородной среде. Для зондов БК и ВЭМКЗ проведена коррекция влияния скважины (ρ_{k2l} – трансформация по двуслойной цилиндрически-слоистой среде). Для каждого зонда ВЭМКЗ после коррекции влияния скважины также построена трансформация по горизонтально-слоистой среде (ρ_{khl}) путем инверсии сигнала в глубины горизонтальных границ и УЭС пластов [7–8].

Геоэлектрические модели

Основные типы геоэлектрических моделей терригенных отложений Западной Сибири выявлены по комплексу данных ГИС, включающему методы радиоактивного каротажа, потенциала самополяризации и электрометрии на постоянном и переменном токе.

Модель глинистых отложений – это непроницаемый однородный пласт, характеризуемый горизонтальным и вертикальным сопротивлениями (ρ_h , ρ_v) и эффективной относительной диэлектрической проницаемостью (ϵ). Характерная для глинистых отложений микроанизотропия влияет на сигналы коротких зондов БКЗ, если УЭС бурового раствора отличается от ρ_h (обычно УЭС раствора 0.5–2 Ом·м, ρ_h глин 4–8 Ом·м). Соотношение ρ_h и ρ_v меловых глинистых отложений оценено по данным разных методов из вертикальных и горизонтальных скважин [9–11].

Модель проницаемых песчаных и песчано-глинистых отложений включает прискважинные зоны, заполненные фильтратом бурового раствора и оттесненной пластовой водой. При бурении в осадочных отложениях Западной Сибири на пресном глинистом растворе без активных добавок, если давление бурового раствора превышает пластовое, по данным ВЭМКЗ+БКЗ в водонасыщенном песчанике определяется повышающая зона проникновения (ЗП), в нефтенасыщенном песчанике – понижающая ЗП, в песчанике с насыщением нефтью и пластовой водой – ЗП и окаймляющая зона (ОЗ). УЭС ОЗ ниже, чем УЭС ЗП и пласта. Диэлектрическая проницаемость не определяется при невысоких УЭС песчаных пластов. Влияние измененных зон на сигналы БКЗ не позволяет оце-

нить слабую анизотропию песчаных коллекторов, поэтому пласты такого состава рассматриваются как изотропные. Слоистые песчано-глинистые коллекторы анизотропны при контрасте УЭС прослоев разного состава.

Непроницаемые неглинистые отложения, обычно небольшой толщины, хорошо выделяются по большим значениям сигнала нейтронного каротажа и кажущегося УЭС. По данным ГИС корректно определяются их границы, а УЭС оценивается по наибольшему значению ρ_k (включая микрозонды). При высоких значениях УЭС по данным ВЭМКЗ определяется значение ε .

Типичные геоэлектрические модели разрезов Западной Сибири обычно представляют собой нефтенасыщенный или нефтеводонасыщенный песчаный коллектор, часто водонасыщенный в нижней части, перекрываемый и подстилаемый глинистыми толщами и осложненный глинистыми или карбонатизированными прослоями. Пласты часто относительно однородны по свойствам, поэтому можно считать УЭС между их кровлей и подошвой одинаковым.

Рассчитаны сигналы для набора моделей, составленных из глинистых и неглинистых непроницаемых пластов и проницаемых пластов-коллекторов с разным УЭС. Толщина пластов от 0.5 до 2.0 м. УЭС глинистых пластов 4 и 7 Ом·м (ρ_h), неглинистых непроницаемых пластов от 30 до 70 Ом·м, проницаемых пластов: 5 Ом·м при насыщении пластовой водой, 9 и 12 Ом·м при смешанном насыщении, 30 Ом·м при насыщении нефтью. УЭС глинистого бурового раствора 1.0 Ом·м. Диаметр скважины 0.216 м, соосного скважине прибора СКЛ – 0.076 м. Максимальная близость параметров пластов, измененных зон, скважины с буровым раствором и прибора к характерным условиям меловых разрезов и технологий вертикального бурения делает рассмотренные модели вполне реалистичными. Далее приведены примеры моделей, в которых диаграммы ρ_k достаточно трудно анализировать из-за их специфической формы.

Сигналы и трансформации

Относительно простой формой характеризуются сигналы в моделях с непроницаемыми пластами. Например, в модели 1, составленной из пластов со средним УЭС (толщиной по 2 м) и высокоомных тонких пластов (толщиной по 0.5 м), по диаграммам ρ_k однозначно определяется количество пластов и соотношение УЭС в них (рис. 1). Положение границ легко оценить по диаграммам всех методов. Значение УЭС пластов наиболее близко к модельному на диаграммах ρ_{k2l} длинного зонда БК (LLd) и средних зондов ВЭМКЗ (DF07, DF10), при этом УЭС тонких пластов существенно занижается: до 40 Ом·м зондом LLd и до 25–27 Ом·м зондом DF05. Инверсия сигналов ВЭМКЗ с коррекцией влияния скважины на базе горизонтально-слоистой модели восстанавливает модельные значения УЭС во всех пластах, включая высокоомные (сверху вниз: 41–46, 42–47 и 40–50 Ом·м), для всех частот. Сложный тип трансформаций не может быть применен для сигналов гради-

ент-зондов, поэтому диаграммы БКЗ трудно анализировать без палеток или применения инверсии на базе 2D модели [12–13], при которой модельные параметры восстанавливаются наиболее точно.

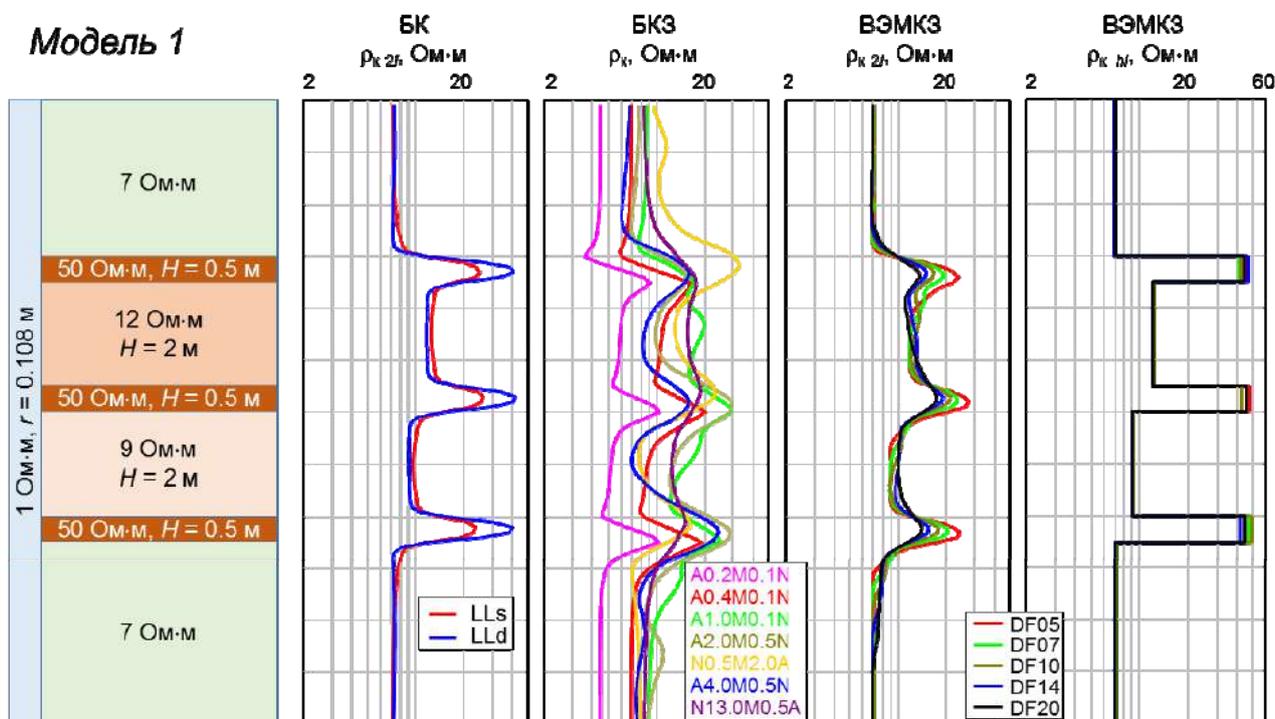


Рис. 1. Диаграммы кажущегося сопротивления БК, БКЗ, ВЭМКЗ в модели 1

Усложнение модели – введение измененных зон в проницаемые пласты и анизотропии УЭС во вмещающие пласты – приводит и к усложнению поведения сигналов (рис. 2). Диаграммы БКЗ в той же степени трудно анализируемы, как и в предыдущем случае, по ним можно только локализовать границы пластов. Диаграммы ρ_{k2l} длинного зонда БК (LLd) и короткого зонда ВЭМКЗ (DF05) отражают соотношение УЭС высокоомных прослоев, но показывают в них меньшие значения: на 10–15% (LLd) и на 55% (DF05). Разброс ρ_{khl} ВЭМКЗ: 30–55 Ом·м для верхнего пласта, 35–50 – для среднего (для DF20 – больше 100 Ом·м), 30–60 Ом·м – для нижнего. УЭС вмещающих пластов не искажается, влияние $\rho_v = 14$ Ом·м проявляется в небольшом повышении значений ρ_{k2l} короткого пятиэлектродного зонда БК (LLs) по сравнению с зондом LLd.

Радиальное распределение УЭС в проницаемых пластах проявляется в большем, чем в модели 1, расхождении значений ρ_{k2l} зондов БК: зонд LLs отражает высокое УЭС ЗП. Значение для LLd равно около 12–13 Ом·м в верхнем пласте, что соответствует УЭС неизменной части пласта, но около 11–12 Ом·м – в нижнем, что на 30% больше модельного значения. Это

говорит о том, что ни один из зондов БК не показывает УЭС пластов при наличии измененных зон, а совпадение значения с УЭС верхнего пласта всего лишь результат "удачного" сочетания параметров измененных зон и неизменной части.

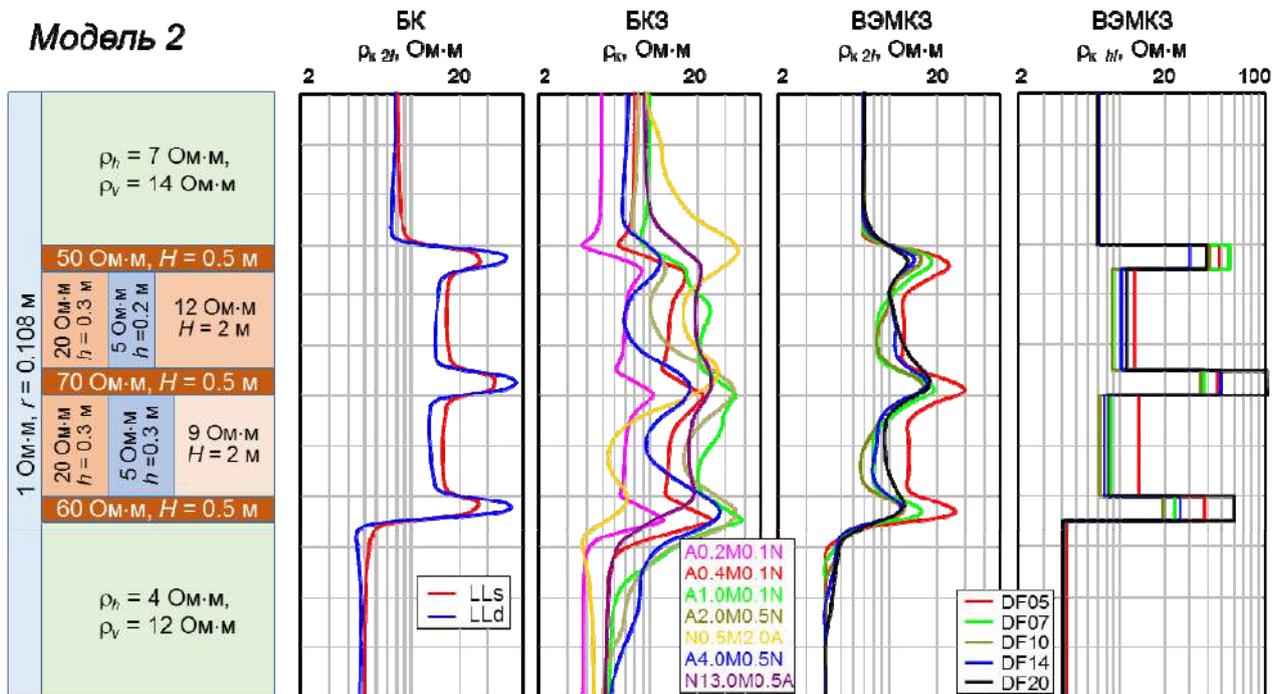


Рис. 2. Диаграммы кажущегося сопротивления БК, БК3, ВЭМК3 в модели 2

В диаграммах ВЭМК3 явным образом отражается наличие проводящей ОЗ в минимальных значениях для зонда DF10 и более высоких значениях короткого и длинного зондов (DF05 и DF20). При этом на УЭС ЗП и ОЗ не выходит ни один зонд: толщины зон не достаточны для того, чтобы какая-то из них определяла сигнал. Значение, близкое к УЭС неизменной части, принимает ρ_{k2l} зонда DF14 и ρ_{khl} – DF20.

Сильная зависимость сигналов БК от высокого УЭС ЗП хорошо заметна в модели 3 с водонасыщенным пластом: на модельное значение УЭС 4 Ом·м неизменной части не выходит даже зонд LLd (ρ_{k2l} больше 9 Ом·м; рис. 3). В то же время увеличение толщины ЗП до 0.4 м приводит к тому, что диаграммы ρ_{k2l} и ρ_{khl} зонда DF05 показывают практически модельное значение ее УЭС (16 Ом·м). В верхнем проницаемом пласте их значение не более 13 Ом·м, хотя УЭС ЗП при толщине 0.3 м больше (20 Ом·м), чем в нижнем пласте, и УЭС ОЗ выше, чем УЭС нижнего пласта. Наличие ОЗ проявляется в трансформациях ВЭМК3 обоих типов. Для зонда DF20 значения ρ_{k2l} и ρ_{khl} равны модельному в верхнем проницаемом пласте и на 10% выше – в ниж-

нем. Толщины 1 м достаточно для того, чтобы на УЭС высокоомного пласта выходили трансформации ρ_{k2l} зонда DF05 и ρ_{khl} всех зондов. По диаграммам БКЗ уверенно выделяются только верхняя и нижняя границы, остальные параметры модели отражаются общим снижением ρ_k от высокоомного пласта к нижнему проницаемому.

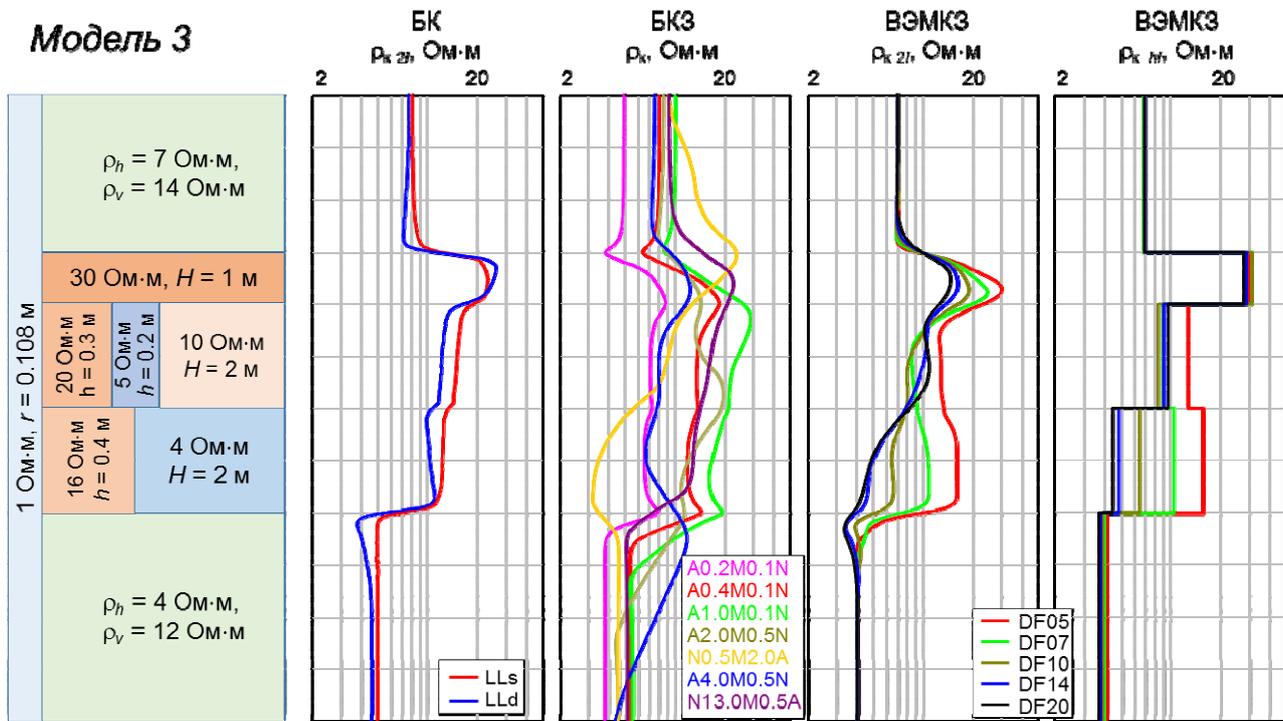


Рис. 3. Диаграммы кажущегося сопротивления БК, БКЗ, ВЭМКЗ в модели 3

Влияние электрической анизотропии вмещающих коллектор пород, обычно представленных глинистыми отложениями, может довольно значительно изменять сигналы градиент-зондов БКЗ на интервале коллектора. Например, при сравнении сигналов БКЗ в модели 4 с анизотропными вмещающими пластами можно отметить сильное изменение диаграмм ρ_k в области нижней границы по сравнению с изотропной моделью. Такое изменение можно интерпретировать как более низкое УЭС нижней части коллектора (рис. 4). Тот же вывод будет сделан и для верхнего проницаемого пласта на основании более низких в анизотропной модели значений для зонда A4.0M0.5N. Изменение сигналов подошвенных градиент-зондов при введении анизотропии максимально в верхней части подстилающего пласта и под границей с перекрывающим пластом. Интервал изменения составляет около длины зонда, амплитуда также увеличивается с длиной зонда. Такое изменение приведет к невозможности построить изотропную модель при совместной инверсии БКЗ и ВЭМКЗ.

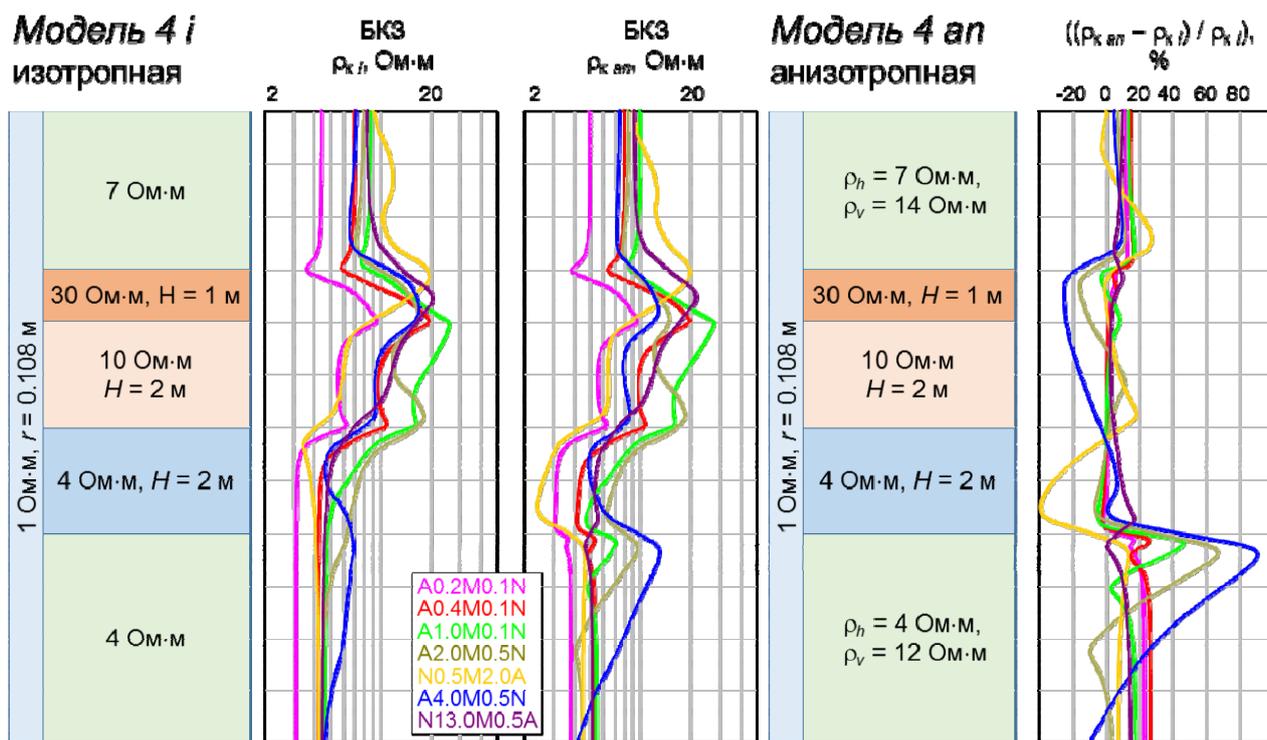


Рис. 4. Диаграммы кажущегося сопротивления БКЗ в модели 4

Выводы

Типичные геоэлектрические модели меловых разрезов Западной Сибири характеризуются большим контрастом УЭС, небольшой толщиной пластов и наличием измененных при бурении зон, что приводит к сложной форме сигналов широко используемых методов электротомии. Одно из возможных решений этой проблемы – применение сложных трансформаций сигналов, например, коррекции влияния скважины с буровым раствором и диаметра корпуса прибора, а также инверсии разности фаз ВЭМКЗ (после вышеуказанной коррекции) в параметры горизонтально-слоистой модели.

Сильное влияние анизотропии глинистых отложений на сигналы БКЗ ограничивает возможность их инверсии совместно с сигналами ВЭМКЗ на базе 1D или 2D изотропной модели. Учитывая небольшие толщины пластов осадочного разреза, необходимо проводить совместную инверсию данных этих методов на базе 2D осесимметричной модели, задавая горизонтальное и вертикальное УЭС в глинистых и тонкослоистых песчано-глинистых пластах.

Исследования выполнены 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" и проекта РФФИ № 18-35-00240.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Эволюция зоны проникновения по данным электромагнитного каротажа и гидродинамического моделирования / Эпов М.И., Ельцов И.Н., Кашеваров А.А., Соболев А.Ю., Ульянов В.Н. // Геология и геофизика, 2004. – № 8. – С. 1033–1044.
2. Аппаратурный комплекс СКЛ для каротажа в нефтегазовых скважинах и его интерпретационная база / Каюров К.Н., Еремин В.Н., Петров А.Н. и др. // Нефтяное хозяйство, 2015. – № 9. – С. 38–43.
3. Совместная численная инверсия данных индукционных и гальванических каротажных зондирований в моделях геологических сред с осевой симметрией / Михайлов И.В., Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Суродина И.В. // Геология и геофизика, 2017. – Т. 58. – № 6. – С. 935–947.
4. Практические приложения численного моделирования и инверсии в задачах электрокаротажа / Сухорукова К.В., Нечаев О.В., Суродина И.В., Петров А.М. // Труды Междунар. конф. "Вычислительная математика и математическая геофизика", посвященной 90-летию со дня рождения академика А.С. Алексеева. – Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2018. – С. 368–374.
5. Нечаев О.В., Глинских В.Н. Быстрый прямой метод решения обратной задачи электрического каротажа в нефтегазовых скважинах // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2017. – № 15. – С. 53–63.
6. 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.
7. Численное моделирование и анализ сигналов электромагнитного каротажа в процессе бурения / Эпов М.И., Никитенко М.Н., Глинских В.Н., Сухорукова К.В. // Каротажник, 2014. – № 11. – С. 29–42.
8. Численное моделирование и инверсия данных электромагнитного каротажа в процессе бурения и шаблонирования нефтегазовых скважин / Эпов М.И., Глинских В.Н., Сухорукова К.В., Никитенко М.Н., Еремин В.Н. // Геология и геофизика, 2015. – Т. 56, № 8. – С. 1520–1529.
9. 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.
10. Особенности количественной интерпретации данных электрического и электромагнитного каротажа / Сухорукова К.В., Никитенко М.Н., Нечаев О.В., Суродина И.В. // Четвертая научно-практ. конф. "Проблемы нефтегазового комплекса Западной Сибири и пути повышения его эффективности": сб. докл. – Тюмень: Тюменский дом печати, 2017. – С. 111–120.
11. Electromagnetic sounding in deviated and horizontal wells: mathematical modeling and real data interpretation / Eпов M.I., Suhorukova C.V., Nikitenko M.N., Gorbatenko A.A., Arzhantsev V.S. // SPE Russian Oil&Gas Exploration & Production Technical Conference & Exhibition, Moscow, Russia 16–18th October 2012. – 18 p. – URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-162034-MS>.
12. Петров А.М., Нечаев О.В., Сухорукова К.В. Быстрая совместная двумерная инверсия данных электромагнитных и гальванических каротажных зондирований с определением вертикального сопротивления // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. Т. 4. – С. 90–97.

13. Петров А.М., Сухорукова К.В., Нечаев О.В. Возможности и ограничения восстановления параметров анизотропных осесимметричных моделей среды путем инверсии данных БКЗ // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» : сб. материалов в 4 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. Т. 3. – С. 181–186.

*© К. В. Сухорукова, А. М. Петров, И. А. Москаев,
О. В. Нечаев, М. Н. Никитенко, 2019*