



ИЗУЧЕНИЕ ТОНКОСЛОИСТЫХ КОЛЛЕКТОРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТОРОИДАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ И ПРИЕМНИКОВ (НА ПРИМЕРЕ ПРИОБСКОГО НЕФТЯНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ)

И.В. Михайлов¹, Д.В. Велесов², В.Н. Глинских¹

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

²Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,
e-mail: MikhaylovIV@ipgg.sbras.ru

На примере Приобского нефтяного месторождения Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции показана актуальность изучения тонкослоистых нефтенасыщенных коллекторов, рассмотрен мировой опыт их изучения. Описан принцип работы зондовой системы с тороидальными источниками и приемниками, выполнены двумерное конечно-разностное моделирование и анализ ее сигналов в типичных геоэлектрических моделях коллекторов, показана зависимость сигналов от коэффициента электрической анизотропии. В реалистичных геоэлектрических разрезах Приобского месторождения, полученных численной инверсией практических данных БКЗ, выполнено двумерное конечно-разностное моделирование сигналов системы с тороидами. Из него следует принципиальная возможность изучения тонкослоистых электрически анизотропных отложений Приобского месторождения по данным системы с тороидальными источниками и приемниками.

Приобское месторождение; тонкослоистый коллектор; электрическая анизотропия; каротаж; тороидальные катушки; численное моделирование и инверсия; геоэлектрический разрез

STUDY OF THIN-LAYERED RESERVOIRS WITH TOROIDAL SOURCES AND RECEIVERS (ON THE EXAMPLE OF THE PRIOBSCOYE OIL FIELD)

I.V. Mikhaylov¹, D.V. Velesov², V.N. Glinskikh¹

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

²Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: MikhaylovIV@ipgg.sbras.ru

On the example of the Priobskoye oil field of the West Siberian oil and gas province, we show the relevance of studying thin-layered oil-saturated reservoirs, as well as consider the corresponding world experience. The operating principle of a probe system with toroidal sources and receivers is described, after which we perform 2D finite-difference simulation and analysis of its signals in typical geoelectric reservoir models. The dependence of the signals on the resistivity anisotropy coefficient is demonstrated. In realistic geoelectric sections of the Priobskoye field, obtained by numerical inversion of BKZ field data, 2D finite-difference simulation for the system with toroids is conducted. It implies the fundamental possibility of investigating thin-layered electrically anisotropic deposits of the Priobskoye field by means of the system with toroidal sources and receivers.

Priobskoye oil field; thin-layered reservoir; resistivity anisotropy; logging; toroidal coils; numerical simulation and inversion; resistivity section

ВВЕДЕНИЕ

Все большее изучение и вовлечение в разработку тонкослоистых нефтенасыщенных коллекторов требует расширения круга задач нефтепромысловой геофизики. Проблемы возникают, прежде всего, при выделении и количественной оценке параметров таких пластов. Кроме того, разные условия осадконакопления и вид осадочного материала обуславливают наличие тонкой слоистости как в сантиметровом, так и в метровом масштабах.

Сигналы, регистрируемые стандартными методами каротажа в вертикальной скважине, определяются только горизонтальным удельным электрическим сопротивлением (УЭС) и фактически не зависят от вертикального. Поэтому полученные при стандартной интерпретации данных значения УЭС в тонкослоистых коллекторах будут заметно занижены по сравнению со значениями в нефтенасыщенных прослоях, соответствуя водонасыщенным песчаным коллекторам. Таким образом, неучтенные стандартными приборами каротажа глинистые прослои увеличивают ошибку определения запасов углеводородов [Эпов и др., 2018б].

Целью исследования является обобщение существующих подходов к оценке петрофизических параметров тонкослоистых коллекторов, а также анализ возможности изучения этих объектов с Приобского нефтяного месторождения Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции с применением каротажного зонда с тороидальными катушками ЗЭТ.

МИРОВОЙ ОПЫТ В ИЗУЧЕНИИ ТОНКОСЛОИСТЫХ КОЛЛЕКТОРОВ

Изучение тонкослоистых коллекторов началось еще в 1950-60-х годах, когда продуктивные песчаные коллекторы характеризовались аномально низкими значениями УЭС по данным геофизических каротажных методов того времени. Определение УЭС таких коллекторов представляло собой большую трудность, так как разрешающей способности методов было недостаточно для установления истинных свойств тонких нефтенасыщенных прослоев песчаника.

Одним из подходов к учету тонкой слоистости коллекторов было комплексное применение нескольких методов каротажа, например, индукционного и плотностного с гамма-методом. По последнему определялись границы слоев песчаника и их эффективная пористость. С помощью данных индукционного каротажа для проницаемых пластов вычислялись УЭС пластовой воды и водонасыщенность коллекторов [Glanville, 1970]. В исследовании [Ruhovets et al., 1992] показана эффективность оценки свойств тонкослоистых коллекторов с помощью каротажных приборов с высоким вертикальным разрешением: наклономер или высокочастотный диэлектрический каротаж совместно с нейтронным и гамма-каротажем. Методика интерпретации учитывает зависимость эффективной пористости от объема глины и формы ее нахождения.

Другой подход – описание электрической анизотропии тонкослоистых коллекторов посредством упрощенных статистических моделей, описываемых соответствующими уравнениями [Runge, Hill, 1971]. Использовались эффективные горизонтальное и вертикальное УЭС, получаемые усреднением УЭС на определенном интервале разреза. В работе [Gonzalez et al., 2019] предложена оценка петрофизических свойств тонкослоистых коллекторов через вероятностное распределение, с использованием метода Монте-Карло по схеме марковских цепей. Сначала определяются границы пластов по имиджам высокого разрешения, далее по каротажным данным послойно генерируются гистограммы для каждого свойства.

На заключительном шаге оцениваются вероятные значения общей и эффективной пористости, водонасыщенности и песчанистости отложений.

Отметим разработанную в ИНГГ СО РАН методику изучения тонкослоистых песчано-глинистых анизотропных коллекторов с помощью совместной двумерной инверсии данных высокочастотного электромагнитного (ВИКИЗ, ВЭМКЗ) и бокового каротажного (БКЗ) зондирования в вертикальных скважинах. Вертикальное УЭС определяется благодаря высокоточному численному двумерному моделированию и построению геоэлектрических моделей прискважинного пространства, одновременно удовлетворяющих данным двух разных по физическим принципам методов [Петров и др., 2019].

Также существуют специальные приборы для исследования тонкослоистых электрически анизотропных коллекторов – многокомпонентные зонды зарубежных нефтесервисных компаний с ортогональными катушками. Из них можно отметить 3D eXplorer (Baker Hughes Company) и Rt Scanner (Schlumberger), наиболее широко используемые для выделения и оценки нефтенасыщенности анизотропных коллекторов [Эпов и др., 2019].

Таким образом, к настоящему моменту исследователями предложены различные подходы к изучению тонкослоистых коллекторов. Из-за значительного влияния на электрокаротажные сигналы в тонкослоистых коллекторах, стала учитываться электрическая анизотропия. Поскольку она отражает флюидонасыщение коллекторов, достоверное определение этого параметра имеет первостепенную важность.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД

В исследовании [Рытов, 1955] показано, что электромагнитное поле в тонкослоистой среде эквивалентно его значению в однородной анизотропной с условием, что расстояние между источником и точкой измерения значительно превосходит толщину прослоев. Такая среда является трансверсально-изотропной, то есть ее УЭС в горизонтальном и вертикальном направлениях различаются.

В силу большого числа и малой мощности прослоев тонкослоистого коллектора, оценка их УЭС по отдельности не представляется возможной. Поэтому разделение пластов по типу насыщения осуществляют, определяя значения горизонтального (ρ_h) и вертикального (ρ_v) УЭС или коэффициента электрической анизотропии [Kunz, Moran, 1958]:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_v}{\rho_h}}.$$

ТОНКОСЛОИСТЫЕ КОЛЛЕКТОРЫ ПРИОБСКОГО НЕФТЯНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Ярким примером тонкослоистых коллекторов являются продуктивные пласты АС₇-АС₁₂ Приобского нефтяного месторождения, расположенного на территории Ханты-Мансийского административного района Ханты-Мансийского автономного округа – Югры, в 60 км к востоку от города Ханты-Мансийск. Месторождение по геологическому строению – очень сложное, многопластовое, по величине извлекаемых запасов – уникальное. Коллекторы характеризуются выраженной тонкой слоистостью, обусловленной условиями седиментации [Атлас месторождений..., 2013].

Пласты AC_{7-12} неомского комплекса относятся к черкашинской свите, которой в стратиграфическом объеме соответствуют подъярусы от нижнеготеривского до верхнебарремского. Свита подразделяется на нижнюю и верхнюю подсвиты. Обе подсвиты представлены чередованием песчаников, алевролитов и глин. К нижней подсвите, мощностью 120–390 м, приурочены основные продуктивные пласты Приобского месторождения, индексируемые как AC_{7-12} . Мощность – 70–290 м. Между пластами AC_9 и AC_{10} выделяется приобская глинистая пачка. В кровле нижней подсвиты выделяется быстринская глинистая пачка мощностью 7–15 м. Толщина верхней подсвиты 50–80 м, песчаные пласты индексируются как AC_{4-6} [Региональные стратиграфические..., 2005].

В соответствии со схемой нефтегазогеологического районирования Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции [Схема нефтегазогеологического..., 2003], Приобское нефтяное месторождение входит в состав Приобского нефтегазоносного района Фроловской нефтегазоносной области.

Неомский нефтегазоносный комплекс, содержащий в себе более 90 % разведанных запасов Приобского месторождения, представляет из себя систему проградационных клиноформ, сформировавшихся в регрессивную фазу крупного юрско-неомского цикла. Различные нефтяные залежи приурочены к разным палеогеоморфологическим элементам: дельтовой платформе, склону дельты, ее фронту и глубоководному основанию. Каждому из них соответствуют песчаные тела – коллекторы определенного типа, формы, размеров, ориентировки, различающиеся фильтрационно-емкостными свойствами. На Приобском месторождении выделяются два типа коллекторов: микронеоднородный коллектор, представленный тонким переслаиванием нефтенасыщенных песчаников или алевролитов с глинистыми прослоями, и коллектор с рассеянной глинистостью [Карогодин и др., 1996].

КАРОТАЖНЫЙ ЗОНД С ТОРОИДАЛЬНЫМИ КАТУШКАМИ ЗЭТ

Для изучения анизотропных коллекторов спроектирован и разработан многокатушечный многочастотный мультирежимный зонд индукционно-гальванического каротажа ЗЭТ, в основе которого лежит использование тороидальных катушек на цилиндрическом немагнитном металлическом корпусе [Эпов и др., 2018б]. Зонд ЗЭТ содержит две генераторные катушки и несколько расположенных между ними измерительных. Катушки симметричны относительно центра зондовой части. Диапазон операционных частот – 50–250 кГц, длина зондовой части – 2 м, расстояние между генераторными катушками составляет 1 м, между генераторными и измерительными – 0.25, 0.5 и 0.75 м.

Измеряемыми характеристиками являются реальные и мнимые части плотности тока на корпусе прибора. Вследствие высокой удельной электропроводности металла, плотность поверхностного тока значительная даже при небольших моментах генераторных катушек. За счет использования тороидальных катушек, регистрируемые сигналы зависят не только от горизонтального, но и от вертикального УЭС пласта. Это обусловлено тем, что в геологической среде возбуждается переменное электрическое поле, которое проникает на достаточную глубину и складывается как из горизонтальной (E_r), так и вертикальной (E_z) компоненты (рис. 1) [Эпов и др., 2018а].

В ЗЭТ используется генераторно-измерительная система в двух режимах. Первый – суммарный, в котором токи в генераторных катушках равны и одного направления. Режим предназначен, главным образом, для изучения распределения УЭС и электрической анизотропии разреза. Во втором режиме – дифференциальном – токи в генераторных катушках равны, но противоположны по знаку. Он направлен на выделение границ пластов, тонкослоистых интервалов и зон трещиноватости [Эпов и др., 2019].

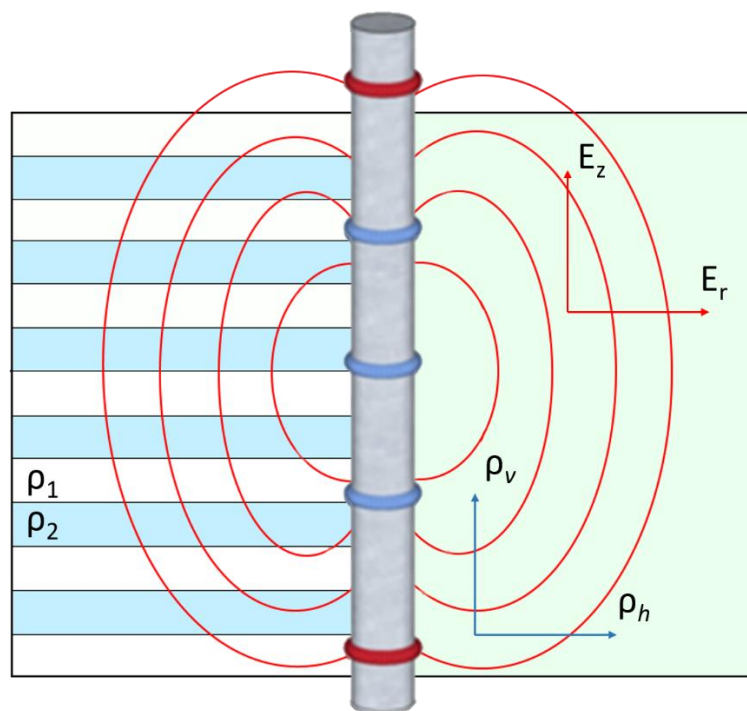


Рис. 1. Электромагнитный зонд с тороидальными катушками ЗЭТ в тонкослоистой среде с изотропными прослоями (слева) и эквивалентной макроанизотропной среде (справа)

Таким образом, ЗЭТ является альтернативой многокомпонентным каротажным зондам с ортогональными катушками для исследования электрической анизотропии тонкослоистых коллекторов.

ДВУМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ ЗЭТ В ТИПИЧНЫХ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ

Для понимания особенностей сигналов ЗЭТ в типичных геоэлектрических моделях нефтяных коллекторов, выполнено их двумерное конечно-разностное моделирование с помощью программы к.ф.-м.н. И.В. Суроидиной [Суроидина, 2018; Суроидина, Михайлов, 2019]. Получены диаграммы для моделей однородного изотропного, тонкослоистого с прослоями 10 и 20 см и однородного анизотропного коллектора.

Проводится анализ сигналов мнимой составляющей вертикальной компоненты электрического поля $\text{Im}E_z$ в модели тонкослоистого нефтенасыщенного коллектора (рис. 2). Нефтенасыщенные пласты представлены песчаником с УЭС 15 Ом·м, а вмещающие породы и низкоомные тонкие прослой – глинами с УЭС 4 Ом·м. Мощность коллектора – 4 м. Скважина, радиус которой 0.108 м, пробурена на глинистом растворе с УЭС 1 Ом·м. Приведены диаграммы суммарного (а, б) и дифференциального (в, г) режимов при фиксированной частоте 100 кГц (а, в) и выбранной длине зонда 0.5 м (б, г). Во втором случае, для большей наглядности, значения сигналов нормированы на квадрат частоты.

В первую очередь, отметим, что на диаграммах суммарного и дифференциального режимов отчетливо видна тонкая слоистость; каждому прослою соответствует свой экстремум.

Для суммарного режима центральная часть пласта отмечается близкими минимальными значениями сигналов всех трех зондов (около $1.95 \cdot 10^{-4}$ В/м). Асимптотические значения во вмещающих отложениях при частоте 100 кГц составляют $3.0 \cdot 10^{-4}$ В/м для зонда 0.5 м и $3.1 \cdot 10^{-4}$ В/м для зондов 0.25 и 20

0.75 м. При фиксированной длине зонда, значения сигналов для набора частот схожи, но характеризуются разным уровнем, что говорит о выраженном частотном зондировании.

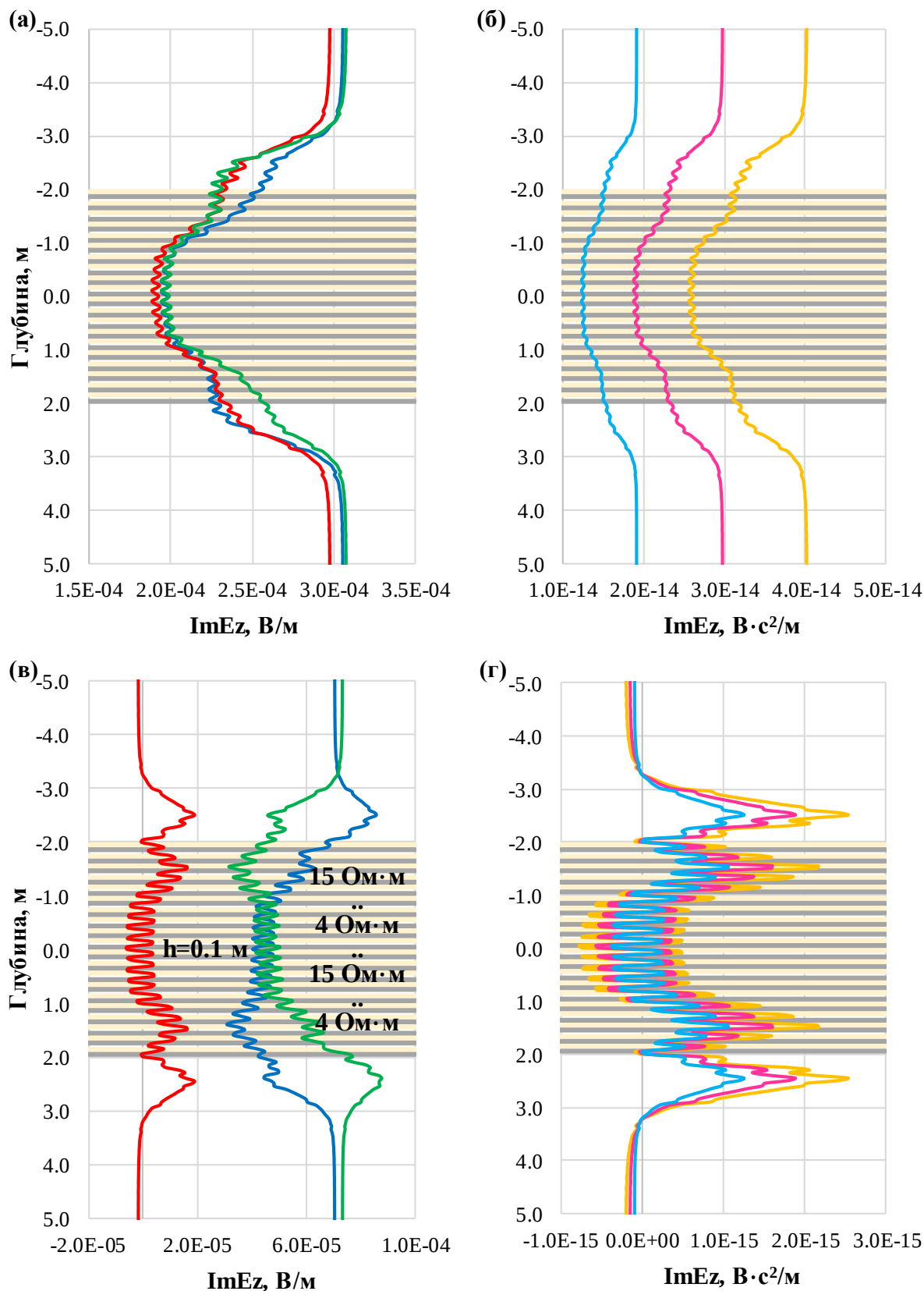


Рис. 2. Диаграммы ЗЭТ суммарного (а, б) и дифференциального (в, г) режимов в модели тонкослоистого песчано-глинистого коллектора с толщиной прослоев 10 см во вмещающих глинистых отложениях

При дифференциальном режиме верхняя граница коллектора идентифицируется экстремумами, отстоящими на 0.5 м от границы ($z = -2.5$ м): максимум для зондов 0.25 и 0.5 м и минимум для зонда 0.75 м. Подобным образом выделяется и нижняя граница, где максимальными значениями характеризуются сигналы зондов 0.5 и 0.75 м ($z = 2.5$ м). Середине коллектора соответствует пересечение диаграмм зондов 0.25 и 0.75 м, и меньшее значение для зонда 0.5 м. Асимптотическое значение сигнала зонда 0.5 м – 0 В/м, максимальное – 2.0×10^{-5} В/м. Аналогично для зондов 0.25 и 0.75 м: на асимптоте – 7.0×10^{-5} В/м, минимум – 3.0×10^{-5} В/м, максимум – 8.5×10^{-5} В/м. То есть проявлено геометрическое зондирование.

Далее анализируются сигналы ЗЭТ (зонд 0.5 м, частота 100 кГц) в суммарном (а) и дифференциальном (б) режимах для пяти моделей нефтенасыщенного коллектора с коэффициентом электрической анизотропии λ от 1 до 3 во вмещающих глинах (рис. 3). Горизонтальное УЭС пласта фиксировано и составляет 15 Ом·м. Вертикальное УЭС для разных λ : 15 Ом·м – 1; 34 Ом·м – 1.5; 60 Ом·м – 2; 94 Ом·м – 2.5; 135 Ом·м – 3.

Прежде всего, сигналы суммарного режима закономерно уменьшаются с ростом λ . Диаграммы для разных λ расходятся на расстоянии до 0.5 м от границ во вмещающих породах. Границы коллектора выделяются характерными минимумами; середине пласта соответствуют минимальные значения при всех λ . При увеличении λ от 1 до 3, относительное приращение сигналов суммарного режима ЗЭТ к однородной изотропной среде достигает 25 %, причем оно неравномерно. Так, относительное приращение составляет 11 % для $\lambda = 1.5$, 17.3 % ($\lambda = 2$), 21.5 % ($\lambda = 2.5$), 24.6 % ($\lambda = 3$). Таким образом, с увеличением λ скорость приращения анализируемых сигналов уменьшается.

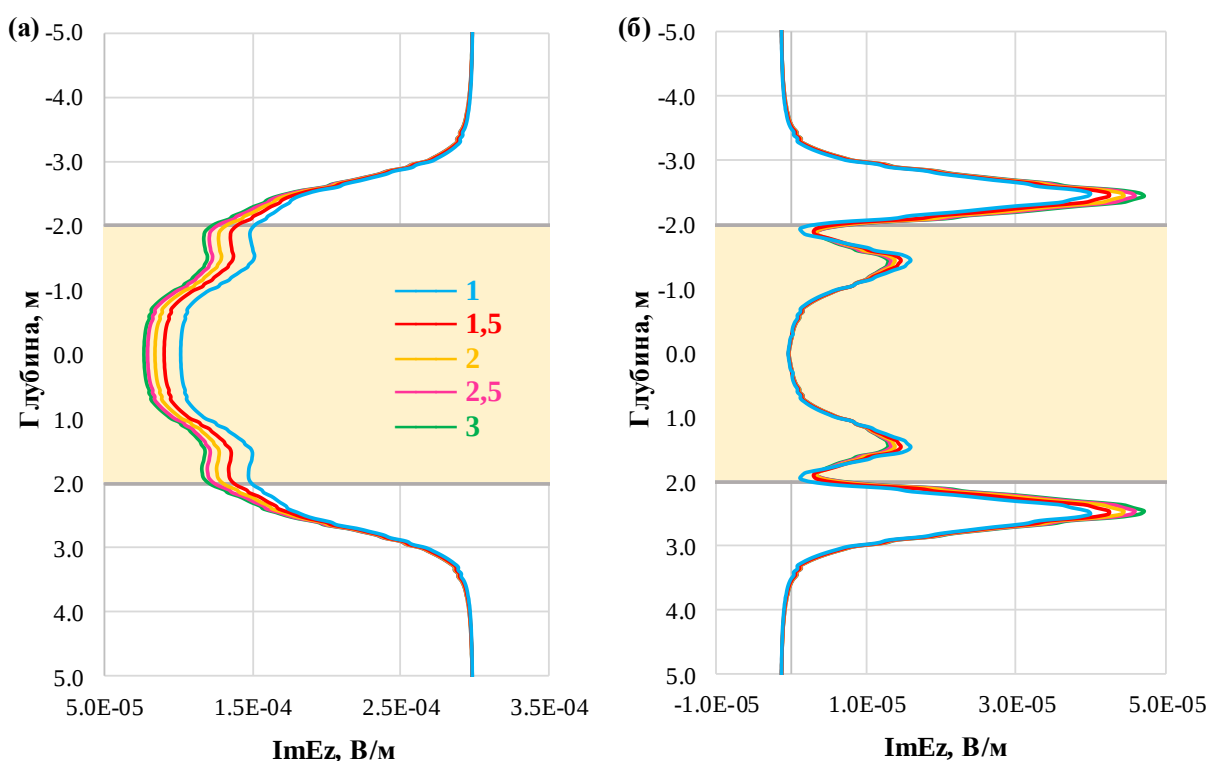


Рис. 3. Диаграммы ЗЭТ (зонд 0.5 м, частота 100 кГц) в суммарном (а) и дифференциальном (б) режимах для моделей нефтенасыщенного коллектора с коэффициентом электрической анизотропии от 1 до 3, расположенного во вмещающих глинистых отложениях

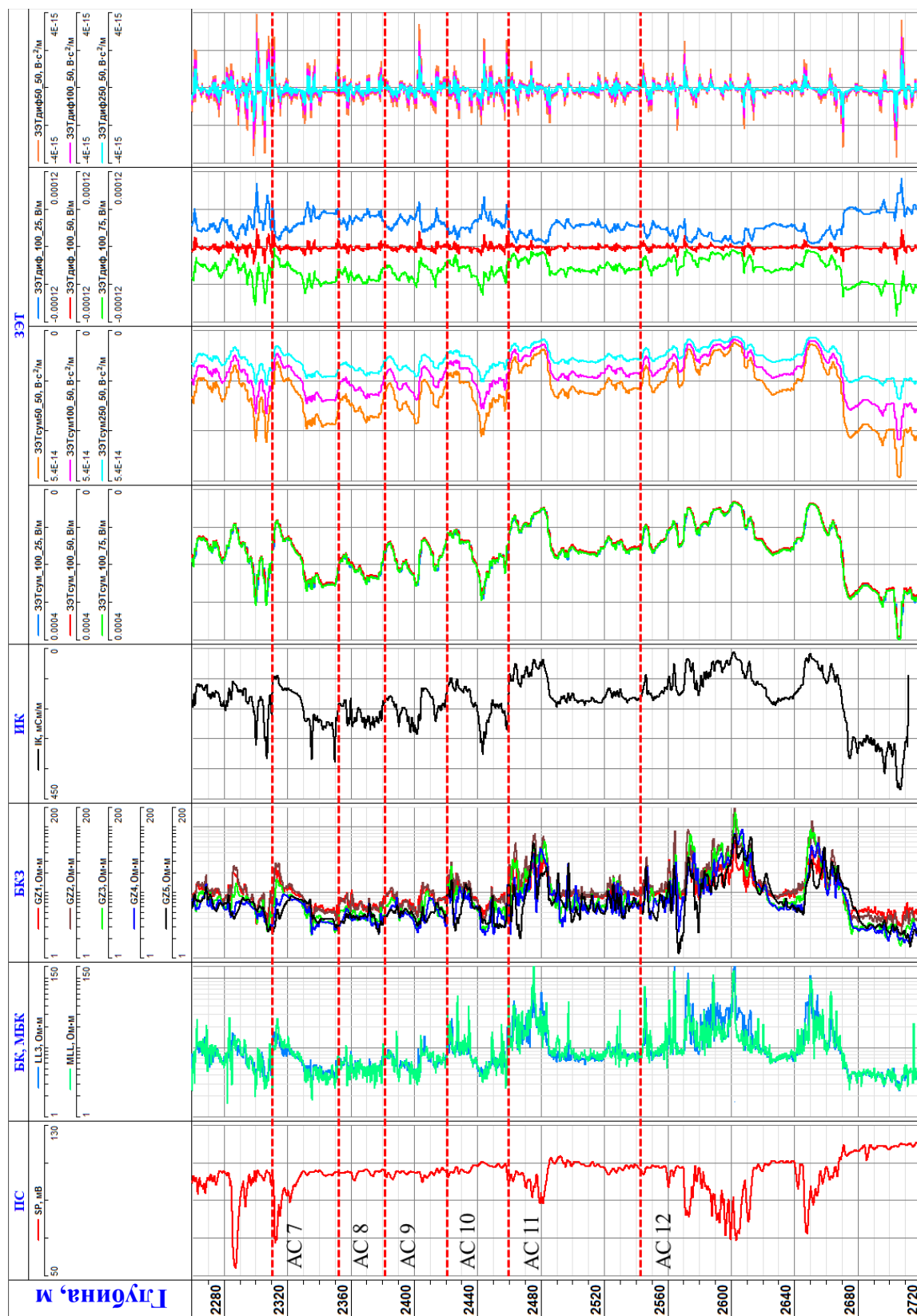


Рис. 4. Практические диаграммы стандартных методов электроротажа и смоделированные данные ЗТ для пластов АС₇₋₁₂ скважины № X Приобского нефтяного месторождения

В дифференциальном режиме расхождение сигналов при изменении λ наиболее проявлено во вмещающих глинах на максимумах, отстоящих от границ пласта на 0.5 м, а сами границы отбиваются близкими к нулю минимумами. Это вызвано особенностью перехода конфигурации ЗЭТ между электрически контрастными средами. В центре коллектора значения сигналов для всех λ составляют 0 В/м.

ДВУМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ ЗЭТ В РЕАЛИСТИЧНЫХ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ ПРИОБСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

С целью выяснения возможностей ЗЭТ для выделения и изучения пластов в реальных геологических разрезах, смоделированы и проанализированы сигналы $\text{Im}E_z$ с привлечением данных стандартных методов электрокаротажа по двум скважинам Приобского нефтяного месторождения. Для этого, с помощью программы EMF Pro [Эпов и др., 2010], построены геоэлектрические модели двух скважин по результатам численной инверсии практических данных БКЗ. В полученных геоэлектрических разрезах выполнено двумерное конечно-разностное моделирование сигналов ЗЭТ [Суродина, 2018; Суродина, Михайлов, 2019].

Сравнение практических диаграмм стандартных методов электрокаротажа и рассчитанных данных ЗЭТ приводится на примере скважины № X (рис. 4). Последовательно представлены диаграммы потенциала самополяризации (ПС, трек 1), бокового (БК) и микробокового (МБК) каротажей (трек 2), бокового каротажного зондирования (БКЗ, трек 3), индукционного каротажа (ИК, трек 4) и ЗЭТ (треки 5-8). Для ЗЭТ рассматриваются сигналы $\text{Im}E_z$:

- трек 5 – суммарный режим, частота 100 кГц, зонды 0.25, 0.5 и 0.75 м;
- трек 6 – суммарный режим, зонд 0.5 м, частоты 50, 100 и 250 кГц;
- трек 7 – дифференциальный режим, частота 100 кГц, зонды 0.25, 0.5 и 0.75 м;
- трек 8 – дифференциальный режим, зонд 0.5 м, частоты 50, 100 и 250 кГц.

На диаграммах ЗЭТ наблюдаются все основные особенности разреза: как в представлении по длинам, так и по частотам. В суммарном режиме флюидонасыщенные пласты выделяются характерными повышенными значениями сигналов. Диаграммы суммарного режима воспроизводят особенности диаграмм БК, МБК, БКЗ и особенно близки к диаграммам ИК. Диаграммы дифференциального режима обладают большой детальностью, по ним отчетливо прослеживаются электрически контрастные границы разных отложений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе аналитического обзора мирового опыта изучения тонкослоистых нефтенасыщенных коллекторов обобщены существующие подходы к оценке их петрофизических параметров, важнейшим из которых является коэффициент электрической анизотропии, тесно связанный с нефтенасыщением.

Проанализированы геологическое строение и особенности тонкослоистых коллекторов Приобского нефтяного месторождения Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. С целью оценки электрической анизотропии этих объектов рассмотрен многокатушечный многочастотный мультирежимный зонд с тороидальными катушками ЗЭТ, как альтернатива многокомпонентным каротажным зондам с ортогональными катушками зарубежных нефтесервисных компаний.

Выполнено двумерное конечно-разностное моделирование сигналов ЗЭТ в типичных геоэлектрических моделях изотропных и анизотропных нефтенасыщенных коллекторов Приобского месторождения. Анализ результатов моделирования указывает на выраженное частотное и геометрическое зондирование с применением ЗЭТ. Показана закономерная зависимость сигналов ЗЭТ от коэффициента электрической анизотропии, что немаловажно для исследования тонкослоистых коллекторов.

По результатам численной инверсии практических данных БКЗ построены геоэлектрические модели продуктивных горизонтов Приобского месторождения. В полученных моделях выполнено двумерное конечно-разностное моделирование сигналов ЗЭТ, из которого вытекает принципиальная возможность изучения тонкослоистых электрически анизотропных разрезов Приобского месторождения по данным рассматриваемого зонда с тороидальными источниками и приемниками.

В продолжение исследований, проводится всестороннее трехмерное моделирование сигналов тороидального электромагнитного источника в разрезах широко применяемых наклонно-горизонтальных нефтегазовых скважин.

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

ЛИТЕРАТУРА

Атлас месторождений нефти и газа Ханты-Мансийского автономного округа – Югры / Под ред. В.А. Волкова, А.В. Шпильмана. – Тюмень, Ханты-Мансийск: ИздатНаукаСервис, 2013. – 236 с.

Карогодин Ю.Н., Ершов С.В., Сафонов В.С., Ефремов И.Ф., Манугян П., Овердал Ф., Валасек Д., Потапов А.М, Конышев А.И., Кузнецов В.И., Разяпов Р.К. Приобская нефтеносная зона Западной Сибири: системно-литмологический аспект. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1996. – 252 с.

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.

Региональные стратиграфические схемы мезозойских и кайнозойских отложений Западно-Сибирской равнины. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 2005. – 19 л.

Рытов С.М. Электромагнитные свойства мелкослоистой среды // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1955. – Т. 29, № 5. – С. 605–616.

Суродин И.В. Математическое моделирование сигналов электромагнитного зонда с тороидальными катушками в двумерных изотропных моделях геологических сред // Интерэкспо Гео-Сибирь-2018: Сб. материалов XIV Междунар. науч. конгр. в 6 т. – Новосибирск: СГУГиТ, 2018. – Т. 4. – С. 162–170.

Суродин И.В., Михайлов И.В. Математическое моделирование электромагнитных полей тороидального источника в двумерных анизотропных моделях геологических сред // Геодинамика. Геомеханика и геофизика: Материалы XIX Всеросс. конфер. – Новосибирск, 2019. – С. 137–139.

Схема нефтегазогеологического районирования Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции / Ред. А.Э. Конторович. – Новосибирск, 2003. – Приложение 10, Лист 1.

Эпов М.И., Каюров К.Н., Ельцов И.Н., Сухорукова К.В., Петров А.Н., 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., Глинских В.Н., Еремин В.Н., Михайлов И.В., Никитенко М.Н., Осипов С.В., Петров А.Н., Суролина И.В., Яценко В.М. Новый электромагнитный зонд для высокоразрешающего каротажа: от теоретического обоснования до скважинных испытаний // Нефтяное хозяйство. – 2018а. – № 11. – С. 23–27.

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

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

Glanville C.R. Log interpretation of thinly-bedded, oil-productive sands with unusually low resistivities // Proc. SPWLA 11th Annual Logging Symposium, Los Angeles, California, May 3–6, 1970. – Document ID: SPWLA-1970-M.

Gonzalez D., Ambia J., Torres-Verdin C. Petrophysical evaluation of thinly-laminated depositional sequences using statistical matching procedures // Proc. SPWLA 60th Annual Logging Symposium, The Woodlands, Texas, June 15–19, 2019. – Document ID: SPWLA-2019-CCCCC.

Kunz K.S., Moran J.H. Some effects of formation anisotropy on resistivity measurements in boreholes // Geophysics. – 1958. – Vol. 23, No. 4. – P. 770–794.

Ruhovets N., Rau R., Samuel M., Smith H., Smith M. Laminated reservoir evaluation using logs with different vertical resolution // Proc. SPWLA 33rd Annual Logging Symposium, Oklahoma City, Oklahoma, June 14–17, 1992. – Document ID: SPWLA-1992-CC.

Runge R.J., Hill D.G. The role of anisotropy in ULSEL // Proc. SPWLA 12th Annual Logging Symposium, Dallas, Texas, May 2–5, 1971. – Document ID: SPWLA-1971-J.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

МИХАЙЛОВ Игорь Владиславович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики ИНГГ СО РАН. Область научных интересов: численное моделирование и инверсия данных электрокаротажа, нефтепромысловая геофизика, петрофизика.

ВЕЛЕСОВ Даниил Владимирович – бакалавр геологии геолого-геофизического факультета НГУ. Область научных интересов: тонкослоистые коллекторы, электрическая анизотропия, численное моделирование и интерпретация данных электрокаротажа.

ГЛИНСКИХ Вячеслав Николаевич – доктор физико-математических наук, чл.-корр. РАН, заведующий лабораторией многомасштабной геофизики ИНГГ СО РАН. Область научных интересов: численные методы решений прямых и обратных задач электродинамики.