

Электрические и электромагнитные каротажные зондирования в реалистичных моделях нефтегазовых коллекторов: численное моделирование и интерпретация

© М. И. Эпов, К. В. Сухорукова, 2012

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

Поступила 7 мая 2012 г.

Представлено членом регколлегии В. И. Старостенко

Статтю присвячено проблемам чисельної інтерпретації даних електричних і електромагнітних каротажних зондувань. Розглянуто питання впливу діелектричної проникності, анізотропії електропровідності, ексцентриситету зондів на достовірність визначення радіального розподілу питомого електричного опору. Показано, що застосування дво- і тривимірних чисельних моделювань підвищує вірогідність відновлюваних просторових розподілів питомого електричного опору за практичними даними, які виміряно на інтервалах складнобудованих колекторів як у вертикальних, так і похилих свердловинах. Коректне врахування впливу геометричних особливостей свердловини та ексцентриситету зонда ВЭМКЗ за високої електропровідності бурового розчину полегшує візуальну інтерпретацію діаграм і підвищує точність оцінки параметрів зони проникнення за чисельної інверсії даних.

The paper is devoted to the problems of numerical interpretation of the data of electric and electromagnetic logging soundings. Problems of influence of dielectric permeability, anisotropy of electroconductivity, probes eccentricity on reliability of determination of resistivity radial distribution have been considered. It has been shown that application of two-dimensional and three-dimensional modeling increases reliability of recoverable spatial distributions of resistivity by practical data measured within the intervals of collectors with complex form both in vertical and inclined holes. Correct accounting of the influence of geometric special features of the borehole and eccentricity of a probe ВЭМКЗ in case of high electroconductivity of drilling mud facilitates visual interpretation of diagrams and increases the accuracy of estimation of parameters of permeability zone with numerical inversion of data.

Введение. Методы электрметрии в нефтегазовых скважинах используются для оценки удельного электрического сопротивления коллекторов, зависящего от их флюидонасыщения. В последние десятилетия в центральных районах Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции вскрываются глубоко залегающие юрские коллекторы небольшой мощности. Уплотнение и преобразование пород коллекторов с увеличением глубины сопровождаются их глинизацией и пиритизацией, а также сменой типа пористости с межзерновой на трещинную. Широко применяются технологии вскрытия наклонно-направленными и горизонтальными стволами. Компонентный состав применяемых буровых растворов ставит ограничения на применение отдельных методов электрокаротажа, что

приводит к невозможности их комплексирования. Все большие объемы исследований проводятся в тонкослоистых коллекторах, вскрытых наклонно направленным бурением. В этих условиях понижается эффективность традиционных методик интерпретации, предназначенных для исследования мощных однородных терригенных коллекторов. Становится необходимым разрабатывать новые приемы и методики численной интерпретации данных электрокаротажа и создавать новые алгоритмы и программы расчета и инверсии сигналов.

Для вертикальных скважин к настоящему времени разработаны новые методики оценки фильтрационно-емкостных параметров коллектора по распределению удельного электрического сопротивления (УЭС) в зоне

проникновения, обусловленному фильтрацией бурового раствора [Кашеваров и др., 2003]. Радиальный профиль УЭС в зоне проникновения определяется путем инверсии сигналов высокочастотного электромагнитного каротажного зондирования (ВЭМКЗ, ВИКИЗ) и бокового каротажного зондирования (БКЗ). При отдельной инверсии сигналов этих методов могут получаться не только эквивалентные, но иногда и противоречащие друг другу геоэлектрические модели. При совместной инверсии области эквивалентности параметров обычно удается существенно уменьшить. Когда между измерениями БКЗ и ВЭМКЗ проходит значительное время, зона проникновения может существенно измениться. Совместная инверсия одновременно измеренных данных БКЗ и ВЭМКЗ снимает эту проблему и позволяет получить согласованный профиль УЭС. Использование набора методов устраняет неоднозначность интерпретации в областях с высоким электрическим контрастом. Такие измерения реализованы, например, в аппаратном комплексе СКЛ (разработка ИНГГ СО РАН и НПП ГА «Луч» [Эпов и др., 2010]), для численной же инверсии данных комплекса на базе цилиндрически-слоистой геоэлектрической модели в ИНГГ разработана автоматизированная система EMF Pro.

Радиальный профиль УЭС по одномерной цилиндрически-слоистой модели среды (измененная зона и пласт) надежно определяется в однородных по глубине пластах достаточной мощности [Технология..., 2000]. В пластах с мощностью около или меньше длины самого длинного вовлеченного в интерпретацию зонда требуется применение аппарата двумерного численного моделирования и инверсии. Для этого в Институте созданы программы расчета сигналов БКЗ и ВЭМКЗ, реализующие численно-аналитический [Эпов, Никитенко, 1993; Эпов, Глинских, 2005; Эпов и др., 2006], конечно-разностный подход [Эпов, Мартаков, 1999; Дашевский и др., 2002; Суродина, 2012] и векторный метод конечных элементов [Эпов и др., 2007; Нечаев и др., 2008]. На основе быстрого алгоритма с учетом приближенно-аналитического подхода разработана программа численной инверсии сигналов ВЭМКЗ. С использованием других алгоритмов проводится численный анализ сложных геоэлектрических ситуаций и влияния разных осложняющих инверсию факторов, а также успешно подбираются модели многих интервалов коллекторов.

Практические материалы, использованные в статье, измерены в нефтегазовых скважинах Западной Сибири и предоставлены трестом «Сургутнефтегеофизика», в том числе сигналы аппаратного комплекса СКЛ.

Особенности радиального профиля УЭС при вскрытии на буровых растворах разного состава по данным ВЭМКЗ и БКЗ. Традиционно при численной интерпретации данных электрокаротажного зондирования применяется резистивная модель геологической среды — пространственное распределение удельного электрического сопротивления, формирующееся при вскрытии пластов в результате фильтрации пресного глинистого бурового раствора и затем изменяющееся со временем [Кашеваров и др., 2003]. Обычно при вертикальном бурении на глинистом растворе мощного однородного изотропного песчаного пласта, насыщенного нефтью, водой или их смесью, результат восстановления распределения УЭС по комплексу качественно измеренных сигналов ВЭМКЗ и БКЗ вполне соответствует основным представлениям о процессе фильтрации. В радиальном направлении при наличии в пласте свободной нефти и свободной пластовой воды обычно выделяется зона проникновения повышающего сопротивления, насыщение в которой слагается из остаточной нефти, фильтрата бурового раствора и остаточной пластовой воды. Далее формируется зона пониженного УЭС — окаймляющая, в которой скапливается отесненная фильтратом пластовая вода, затем следует неизменная часть пласта [Пирсон, 1966]; зона не формируется, если в пласте нет свободной воды или свободной нефти. Окаймляющая зона как относительно проводящий объект лучше всего определяется по сигналам ВЭМКЗ, а сигналы БКЗ чувствительны к повышающей зоне, поэтому в результате инверсии комплекса сигналов повышается достоверность определения УЭС и толщин этих зон. При наличии в пласте только свободной нефти по кривым зондирования восстанавливается зона проникновения пониженного относительно высокоомного пласта УЭС, при наличии только пластовой воды — зона проникновения повышенного сопротивления. При восстановлении по комплексу ВЭМКЗ+БКЗ зона проникновения часто получается не однородной, а включающей тонкую прискважинную высокоомную зону, которую приходится вводить для того, чтобы подобрать сигналы коротких зондов БКЗ. Эта

зона может быть объяснена особенностями процесса фильтрации, а частично — влиянием анизотропии.

Кривые зондирования ВЭМКЗ и БКЗ и модели радиального распределения УЭС, подобранные по ним, показаны на рис. 1. Измерения проведены одновременно аппаратурой СКЛ. Практические измерения показаны точками, погрешности измерения сигналов — вертикальными отрезками, сигналы, рассчитанные в подобранной модели, — пунктирной линией. Подобранные модели изображены в виде зависимости УЭС зоны от ее радиуса, значения параметров также приведены в подрисуночной подписи. Левая часть рисунка иллюстрирует типичную картину для водонасыщенного песчаника (повышающая зона проникновения с высокоомной прискважинной частью), правая — для нефтеводонасыщенного (зона проникновения и окаймляющая зона).

Намного меньше известно про формирование измененной зоны при вскрытии коллекторов на биополимерном солевом растворе и растворе на нефтяной основе. Раствор с высокой электропроводностью снижает чувствительность метода БКЗ, в растворе с низ-

кой электропроводностью применение этого метода практически невозможно. Отсутствие возможности комплексирования заставляет строить геоэлектрическую модель только по сигналам ВЭМКЗ, для которых характерна широкая эквивалентность параметров зоны проникновения. Тем не менее, при повторных каротажах в скважинах с высокоминерализованным раствором фиксируются изменения сигналов во времени, соответствующие развитию зоны пониженного УЭС. То же наблюдается и в скважинах, пробуренных на растворе на нефтяной основе (РНО) — по данным ВЭМКЗ строится резистивная модель с зоной пониженного УЭС, толщина которой достигает десятков сантиметров.

Типичные кривые зондирований и модели УЭС для этих случаев приведены на рис. 2. Слева — данные аппаратуры СКЛ на интервале песчаников, измеренные в тонкой скважине с проводящим раствором, по которым восстанавливается неглубокая понижающая зона проникновения. Справа — по данным ВИКИЗ на интервале карбонатов в скважине с высокоомным раствором на нефтяной основе восстанавливается понижающая зона проникновения толщиной около 0,5 м.

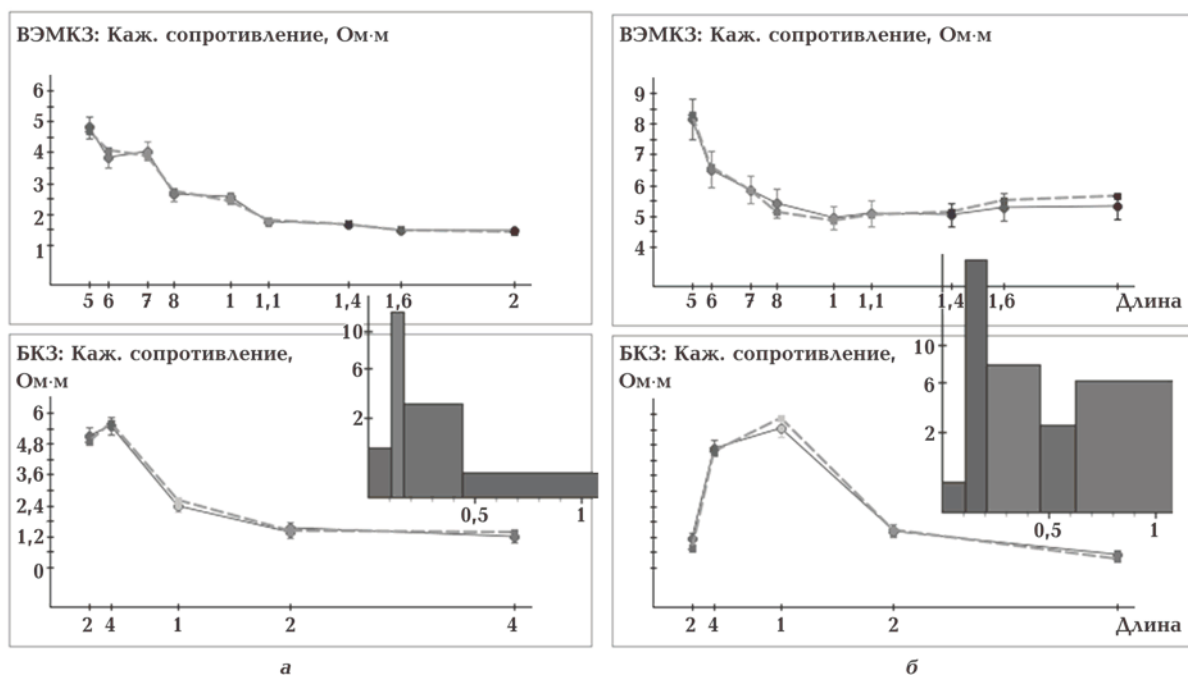


Рис. 1. Сигналы ВЭМКЗ и БКЗ (СКЛ-А) в зависимости от длины зонда в глинистом растворе. Параметры скважины: радиус 0,108 м, УЭС раствора 2 (а) и 1,3 Ом-м (б). Параметры моделей: а — первая зона проникновения — толщина 0,06 м, УЭС 13 Ом-м, вторая зона проникновения — толщина 0,27 м, УЭС 3,6 Ом-м, пласт УЭС 1,4 Ом-м; б — первая зона проникновения — толщина 0,1 м, УЭС 32 Ом-м, вторая зона проникновения — толщина 0,25 м, УЭС 7,5 Ом-м, окаймляющая зона — толщина 0,17 м УЭС 3,3 Ом-м, пласт УЭС 6 Ом-м.

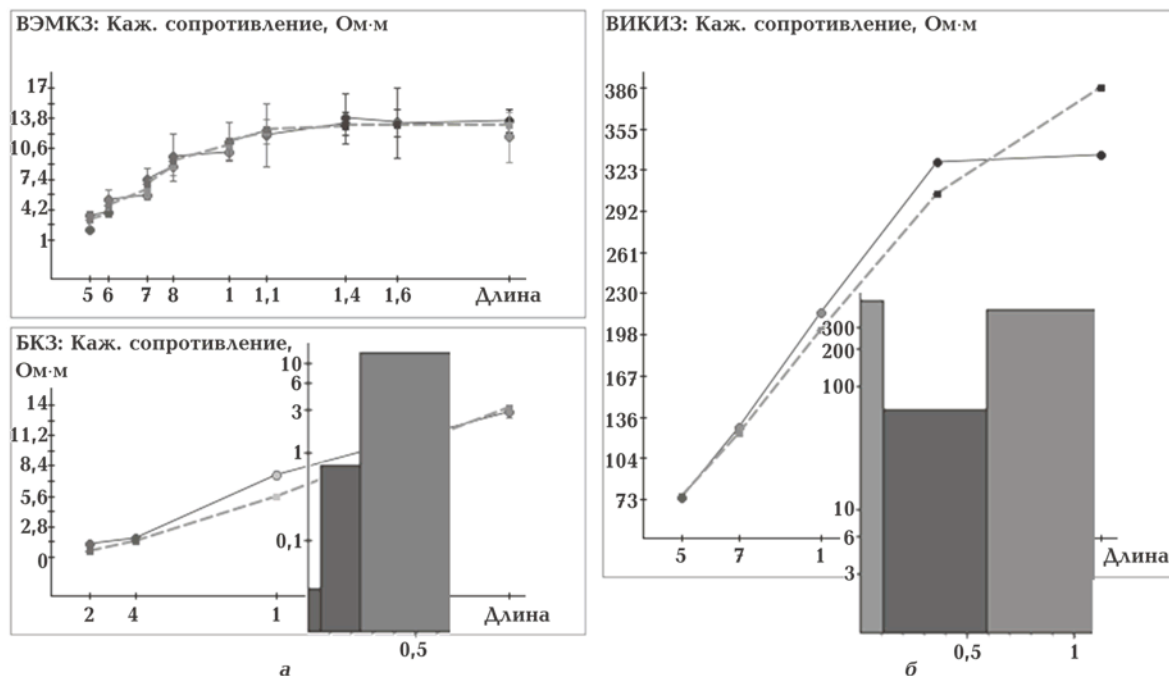


Рис. 2. Сигналы ВЭМКЗ и БКЗ (СКЛ-А) в биополимерном растворе и ВИКИЗ в РНО. Параметры скважины: радиус 0,062 м, УЭС раствора 0,03 Ом-м (а) и 0,108 м и 500 Ом-м (б). Параметры моделей: а — зона проникновения — толщина 0,18 м, УЭС 0,7 Ом-м, пласт УЭС 12,7 Ом-м; б — зона проникновения — толщина 0,5 м, УЭС 64 Ом-м, пласт УЭС 425 Ом-м.

Электрофизические параметры геоэлектрической модели. За десятилетия численной интерпретации данных электрокаротажа во многих случаях замечено несовпадение оценок ρ пласта по сигналам электромагнитного зондирования и зондирования на постоянном токе. Сравнение измеренных разными методами сигналов прежде всего проводится для оценки кондиционности на интервалах реперных пластов — в мощных однородных глинистых отложениях. Сигналы зондов ВЭМКЗ, работающих на частотах от 0,875 до 14 МГц, в таких пластах обычно соответствуют модели с понижающей зоной проникновения, а сигналы БКЗ — модели без зоны проникновения или с узкой прискважинной повышающей зоной. Это кажущееся противоречие снимается расширением комплекса параметров геоэлектрической модели — введение диэлектрической проницаемости пород позволяет отказать от зоны проникновения при интерпретации данных ВЭМКЗ. На рис. 3, а представлен результат подбора резистивной модели и модели с параметрами (ρ , ϵ) по данным ВЭМКЗ и БКЗ в глинистом пласте, вскрытом на пресном глинистом растворе (рис. 3, б).

Поскольку при данном типе параметризации на счет влияния диэлектрической проницаемости относятся все отклонения изме-

ренных сигналов ВЭМКЗ от рассчитанных в резистивной модели, в результате определяется некоторое эффективное значение ϵ , в котором отражены все процессы поляризации в гетерогенной среде. Поэтому при таком подходе оценка ϵ часто оказывается выше, чем значения для составляющих поро-ду компонентов по отдельности. Разные исследователи приводят оценки ϵ в несколько сотен и тысяч единиц, полученные как при исследовании образцов (песчаник, суглинки, глины [Талалов, Даев, 1996]), так и при интерпретации данных каротажа во время бурения (частоты 0,4 и 2 МГц, пиритизированные глинистые сланцы [Anderson et al., 2007]), а также отмечают частотную дисперсию ϵ . По данным ВЭМКЗ также выявляется частотная дисперсия диэлектрической проницаемости в некоторых глинистых пластах, когда сигнал, измеренный на каждой рабочей частоте, соответствует своему значению ϵ . Оценки ϵ и их зависимость от частоты, полученные на нескольких глинистых пластах, соответствуют значениям, полученным на глинистых образцах [Талалов, Даев, 1996].

Основой методики оценки эффективной относительной диэлектрической проницаемости является возможность определения резистивной модели по данным БКЗ. Затем

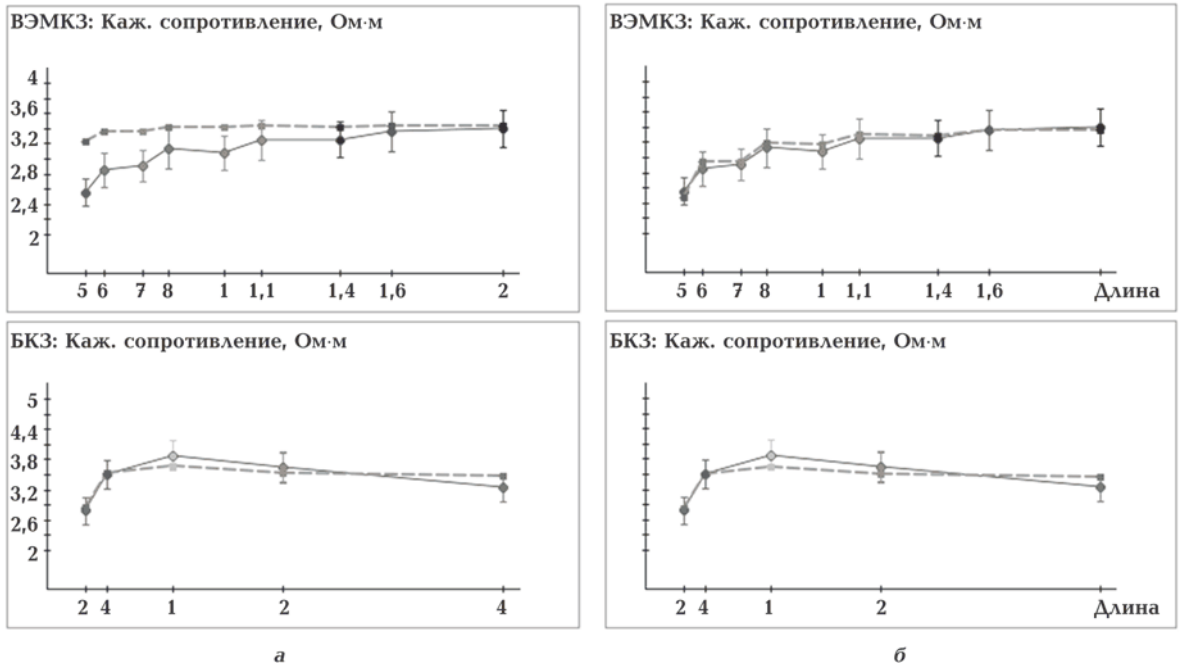


Рис. 3. Сигналы ВЭМКЗ и БКЗ для пласта $\rho=3,4$ Ом-м: а — $\epsilon = 20$, б — $\epsilon = 133$.

для полученных значений ρ подбираются такие значения ϵ , чтобы рассчитанные сигналы ВЭМКЗ совпали с измеренными. Пример такого подбора приведен на рис. 3 (а — подбор резистивной модели в пласте глин по сигналам БКЗ, б — подбор эффективного значения ϵ по сигналам ВЭМКЗ). Измерения одновременные, скважина пробурена на пресном глинистом растворе. Подобраны значения $\rho=3,4$ Ом-м, $\epsilon = 133$ ед.

Зависимость сигналов ВЭМКЗ от диэлектрической проницаемости среды была подтверждена экспериментально при измерениях в пресной воде Телецкого озера [Сухокурова и др., 2007]. При численной инверсии сигналов, записанных в воде и при профилировании границы воздух—вода, были получены значения УЭС и относительной диэлектрической проницаемости воды (170—190 Ом-м и 62—67 ед.). Значение УЭС подтверждено независимыми измерениями, оценка ϵ соответствует ожидаемому значению для воды такой минерализации.

Как известно, в вертикальных скважинах сигналы ВЭМКЗ зависят только от горизонтального электрического сопротивления, но на сигналы БКЗ анизотропия УЭС оказывает влияние. При этом изменение кривой зондирования при повышении УЭС в вертикальном направлении существенно зависит от контра-

ста УЭС пласта и бурового раствора. На рис. 4 показаны сигналы БКЗ для двух типичных параметров скважины и коэффициента анизотропии УЭС, равного 2. При небольших контрастах УЭС раствора и пласта (2 и 4 Ом-м) наблюдается известный эффект завышения сигналов коротких зондов в анизотропной среде. При усилении контраста (УЭС раствора 0,1 и горизонтальное УЭС пласта 4 и 10 Ом-м) за-

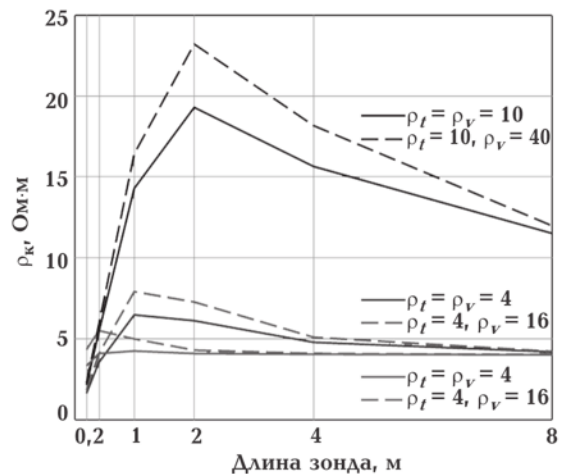


Рис. 4. Сигналы БКЗ в изотропных и анизотропных пластах. Нижняя пара кривых — УЭС раствора 2 Ом-м, радиус 0,108 м, средняя и верхняя пара — УЭС раствора 0,1 Ом-м, радиус 0,062 м.

вышение в большей степени проявляется в сигналах зондов длиной от 1 до 4 м. Очевидно, что анизотропия УЭС является еще одним параметром геоэлектрической модели, который следует учитывать при численной инверсии комплекса данных ВЭМКЗ и БКЗ.

Численная интерпретация в тонкослоистых коллекторах. Как уже было отмечено, численная интерпретация данных электрокаротажных зондирований, базирующаяся на цилиндрически-слоистой модели, разработана для мощных однородных пластов. С увеличением глубины исследуемых отложений мощность однородных интервалов коллекторов становится сопоставима или меньше длин зондов. В коллекторах появляются контрастные по УЭС карбонатные и глинистые пропластки или зоны частичного заполнения пористого пространства этими минералами.

Карбонатизированные прослои, хорошо выделяющиеся по данным нейтронного каротажа, существенно усложняют вид диаграмм БКЗ, а также завышают значения кажущихся сопротивлений ВЭМКЗ на интервалах около длины зонда под прослоями. Вблизи низкоомных глинистых прослоев или покрышек

оценка УЭС коллектора по сигналам ВЭМКЗ обычно является заниженной вследствие большей чувствительности метода к проводящим областям среды. Влияние этих объектов на сигналы БКЗ приводит к более сложному виду диаграмм, что также ограничивает их использование при интерпретации.

Тонкое переслаивание песчаных и карбонатных или глинистых прослоев является причиной сильной макроанизотропии УЭС коллекторов. Также глинистый компонент приводит к понижению кажущегося сопротивления на высоких частотах ВЭМКЗ из-за влияния повышенной диэлектрической проницаемости глинистых минералов [Эпов и др., 2010].

Наличие карбонатных и глинистых пластов на интервале коллектора приводит к распределению УЭС по глубине, отличающегося от распределения в мощном однородном коллекторе, в котором высокие значения УЭС в кровельной части, обусловленные высоким содержанием нефти, плавно снижаются с глубиной и в подошвенной части соответствуют насыщению пластовой водой. Чаще всего интервалы однородного песчаника меньше или

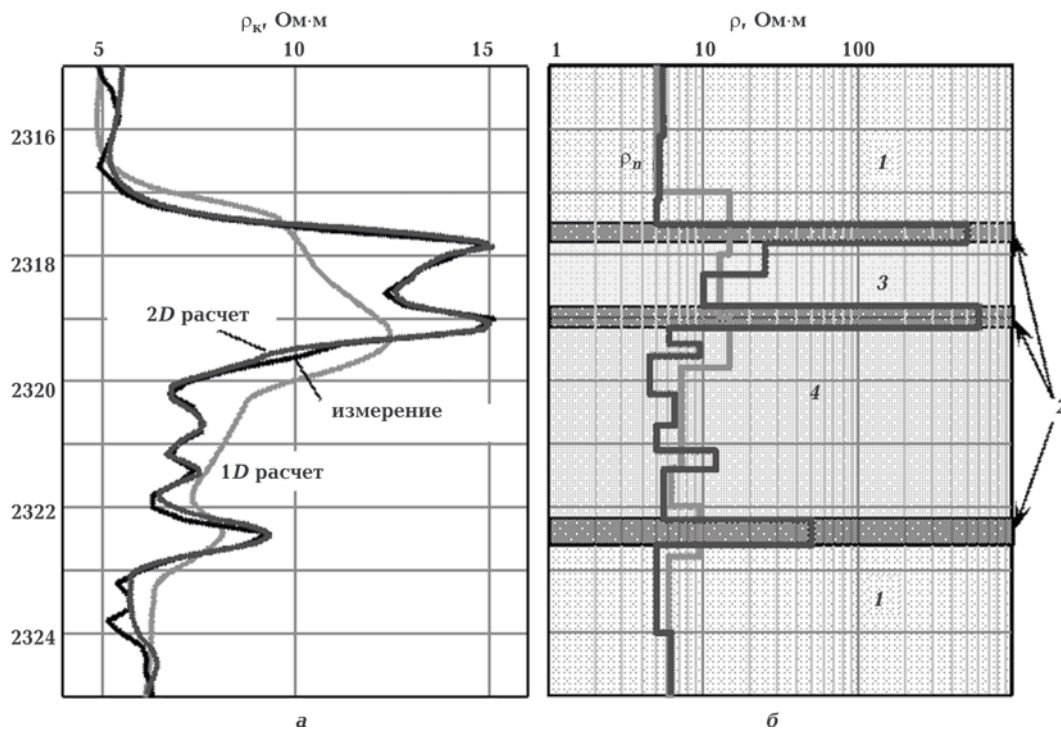


Рис. 5. Уточнение УЭС пласта в результате двумерной инверсии данных ВЭМКЗ: а — сигналы зонда DF20, б — УЭС неизменной части пласта в тех же обозначениях (1 — глина, 2 — плотные прослои, 3 — карбонатизированный песчаник, 4 — глинистый песчаник).

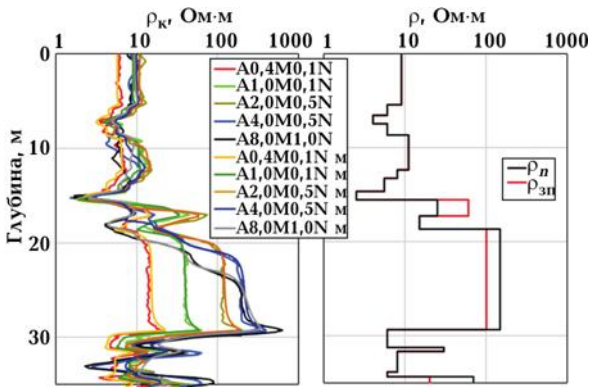


Рис. 6. Результат подбора двумерной модели слабопроницаемых коллекторов высокого сопротивления (15,5–17,2 и 18,6–29,3 м) по данным БКЗ.

сравнимы с длинами зондов БКЗ и ВЭМКЗ, а в таком случае численная интерпретация на основе традиционной цилиндрически-слоистой модели приводит к недостоверным геоэлектрическим моделям. Уточнение этих моделей требует привлечения численного моделирования и инверсии в двумерных постапонках [Эпов, Глинских, 2005].

На рис. 5 приведен пример уточнения УЭС пласта в процессе инверсии в рамках тонко-

слоистой модели. В процессе подбора изменены положения горизонтальных границ и значения УЭС. Контрастность модели значительно усилилась, выявлены три высокоомных карбонатных прослоя и уточнено строение карбонатизированного и глинистого песчаных пластов. Хорошее совпадение измеренного и рассчитанного сигналов доказывает высокую достоверность полученной модели.

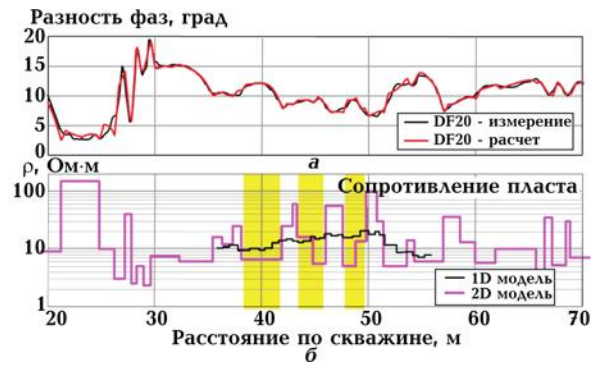


Рис. 7. Уточнение УЭС пласта по данным ВЭМКЗ в наклонной скважине: а — сигналы зонда DF20: измеренный (черная линия) и рассчитанный в 2D модели (красная линия); б — УЭС пласта в 1D и 2D моделях.

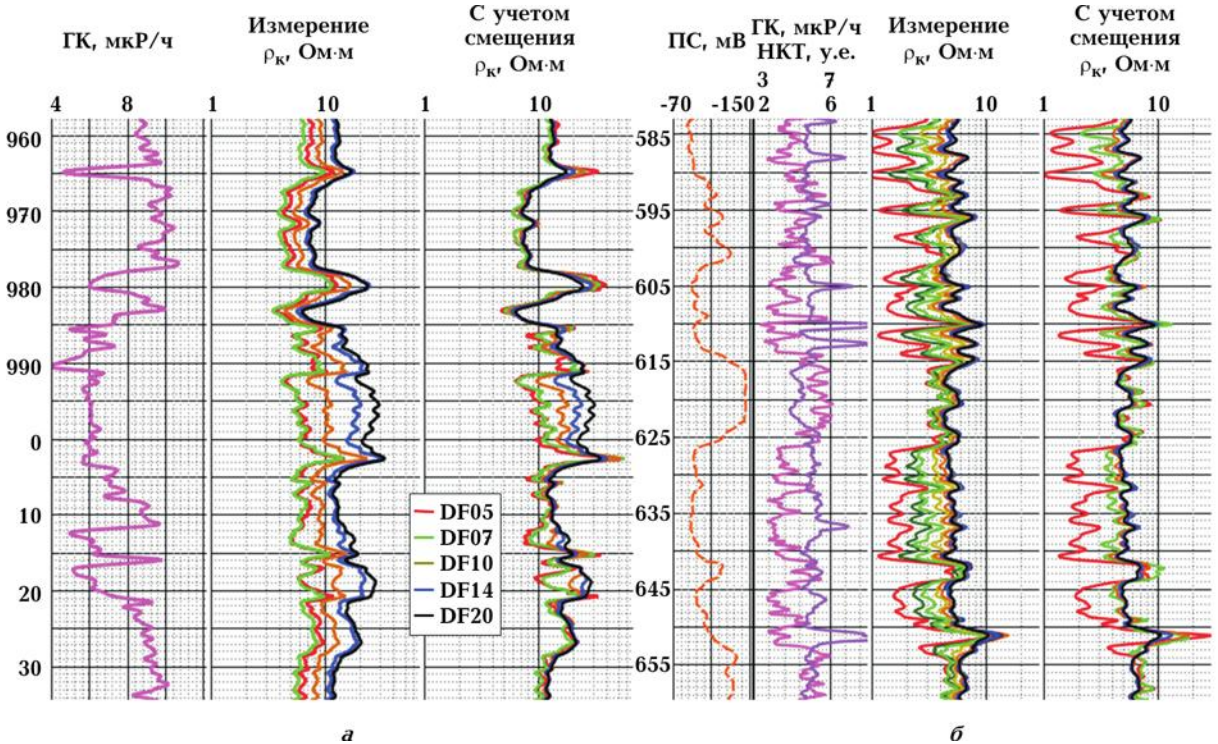


Рис. 8. Учет влияния эксцентриситета зондов ВЭМКЗ. Приведены кажущиеся сопротивления для измеренных сигналов и сигналов с учетом смещения и проводящей скважины: а — радиус скважины 0,108 м, УЭС бурового раствора 0,16 Ом-м, б — радиус скважины 0,062 м, УЭС бурового раствора 0,03 Ом-м.

Пример подбора двумерной модели распределения УЭС по данным БКЗ с использованием быстрой программы численного моделирования показан на рис. 6. В результате определены УЭС зоны проникновения и неизменной части тонкого пласта 15,5—17,2 м. Первое приближение модели строится по результатам одномерной инверсии. Далее осуществляется уточнение значений УЭС в пластах и зонах проникновения, а также положение горизонтальных и цилиндрических границ. Процесс подбора контролируется степенью расхождения измеренных и рассчитанных на очередном шаге сигналов и продолжается до совпадения сигналов в рамках погрешности измерения.

В наклонных скважинах для определения геоэлектрической модели по данным ВЭМКЗ используется программа расчета сигналов

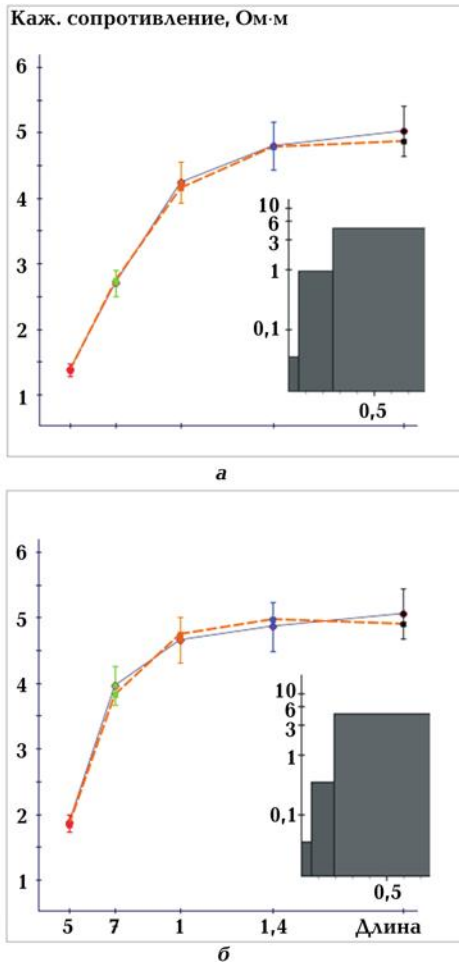


Рис. 9. Сигналы ВЭМКЗ в проницаемом интервале, измеренные в скважине с биополимерным раствором, измеренные (а) и после учета эксцентриситета (б). Радиус скважины 0,062 м, УЭС бурового раствора 0,03 Ом·м, УЭС пласта 4,8 Ом·м, толщина и УЭС зоны проникновения — 0,2 м и 0,9 Ом·м (а) и 0,14 м и 0,35 Ом·м (б).

наклонного зонда в горизонтально-слоистой среде [Эпов и др., 2006]. Предпосылки такой постановки заключаются в том, что наклонные и горизонтальные скважины обычно бурятся на биополимерном растворе, в результате чего формируется неглубокая измененная зона, которая не влияет на длинные зонды. Кроме того, малый диаметр скважины и относительно большой диаметр аппаратуры (0,124 и 0,102 м) обеспечивают минимальный эксцентриситет и незначительное его влияние на сигналы длинных зондов.

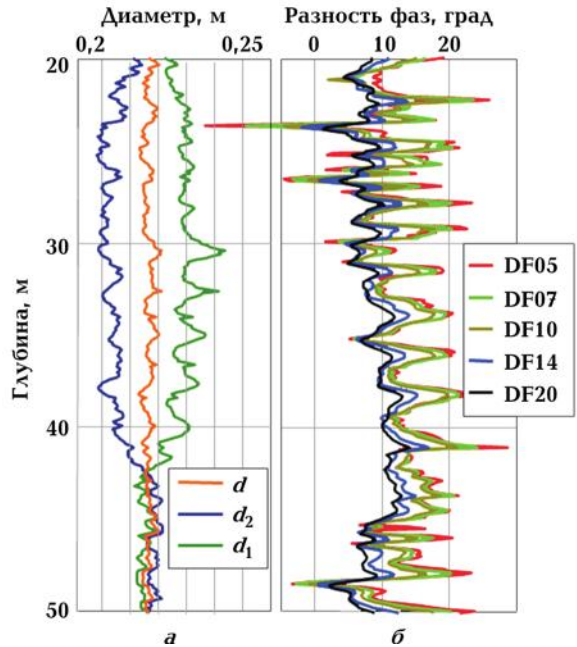


Рис. 10. Диаграммы кавернометрии (а) и ВЭМКЗ (б) в скважине с УЭС раствора 0,09 Ом·м.

Тонкослоистый коллектор на рис. 7 представлен чередованием проницаемых и непроницаемых пропластков. Зенитный угол около 60° . Проницаемые интервалы выделены темно-серыми прямоугольниками. Совпадение измеренного и расчетного сигналов хорошее. Очевидно, что даже при разбиении коллектора на тонкие слои, сопротивления в модели, построенной в рамках традиционного одномерного подхода, оказываются очень осредненными, заниженными в непроницаемых пропластках и завышенными — в проницаемых. Например, в проницаемом пропластке 38—42 м (мощность 1,9 м) сопротивление по одномерной инверсии около 10 Ом·м, что соответствует нефтенасыщению более 60 %, а уточненное значение составляет 6,5 Ом·м и соответствует в этом типе коллектора насыще-

нию с большим количеством воды, чем нефти. Во втором проницаемом пропластке по стандартной методике интерпретации получается повышение сопротивления от кровли пропластка (около 13 Ом·м) к подошве (17 Ом·м), а по уточненному сопротивлению выделяются уплотненная (16 Ом·м, 43,3—44,8 м) и водонасыщенная (5,5 Ом·м, 44,8—46,0 м) части. В третьем пропластке уточненное сопротивление также становится существенно ниже.

Уточнение строения слоистого коллектора с маломощными пропластками по модели наклонного зонда в горизонтально-слоистой среде приводит к существенному изменению оценок УЭС проницаемых и непроницаемых пропластков и уточнению положения горизонтальных границ, и поэтому необходимо для корректной оценки нефтесодержания.

Влияние формы стенки скважины и эксцентриситета. Все большие объемы геофизических исследований проводятся в коллекторах, вскрытых наклонно направленным бурением на биополимерных растворах. На территории Западной Сибири одним из наиболее распространенных методов изучения в таких ситуациях являются разновидности метода ВЭМКЗ (5-, 7-, 9-зондовые установки, аппаратура СКЛ) [Технология..., 2000]. Высокая электропроводность бурового раствора приводит к тому, что на сигнал влияет эксцентриситет аппаратуры в скважине, а также периодические и одиночные неровности стенки скважины — каверны и трещины, заполненные буровым раствором.

Численный анализ указанных факторов показал, что на сигналы БКЗ эксцентриситет практически не влияет, наличие каверн отражается в колебаниях сигнала в пределах погрешности, но средний уровень сигнала на кавернозном интервале соответствует большему радиусу скважины [Суродина, 2012]. На сигналы ВЭМКЗ смещение зондов с оси скважины влияет значительно [Игнатов, Сухорукова, 2009], это влияние тем больше, чем больше радиус скважины, контраст электропроводностей и рабочая частота зонда. Поэтому для повышения достоверности численной интерпретации материалов, измеренных в скважинах с высокой электропроводностью бурового раствора, необходим учет эксцентриситета аппаратуры в скважине, а иногда и формы ее ствола и стенки.

На рис. 8 представлен результат работы алгоритма учета влияния эксцентриситета на практических данных ВЭМКЗ. Когда диа-

метр скважины большой (*a*), больше эксцентриситет и его влияние — на диаграммах измеренных сигналов песчаные пласты мало отличаются от глинистых по расхождению кажущихся сопротивлений для зондов разной длины. В скважине малого диаметра (*b*) это расхождение в глинистых пластах меньше. После учета эксцентриситета в обеих скважинах на интервалах глин кажущиеся сопротивления для разных зондов становятся практически одинаковыми, а заметное расхождение остается только на интервалах проницаемых песчаников.

Отметим, что в результате учета влияния эксцентриситета изменяется кривая зондирования. На рис. 9 приведены типичные кривые зондирования проницаемого интервала, измеренные в скважине с биополимерным раствором, до и после учета смещения. После учета эксцентриситета сигналы изменяются обычно таким образом, что при инверсии становятся меньше толщина и УЭС понижающей прискважинной зоны. Такая закономерность является типичной для сигналов ВЭМКЗ в тонких скважинах с низким УЭС бурового раствора.

Ввиду высокой чувствительности зондов ВЭМКЗ к проводящим областям среды сильным искажающим сигналы фактором является наличие каверн и трещин на стенке скважины. Влияние таких объектов обычно приводит к высокоамплитудной помехе, периодической в случае повторяющихся каверн и хаотичной в трещиноватых карбонатных породах. Повторяющиеся симметричные каверны характерны для наклонных и горизонтальных скважин, бурящихся с отклонителями [Зыкина, Мамяшев, 2007].

Связь изменений сигналов ВЭМКЗ и каверн на стенке скважины подтверждается корреляцией данных кавернометрии и ВЭМКЗ (рис. 10). УЭС пласта 9—11 Ом·м, УЭС раствора 0,09 Ом·м. Скважина вертикальная, по изменению диаметров можно предположить спиральную нарезку на стенке. Период изменения среднего диаметра (*d*) соответствует периоду изменения разности фаз.

В результате численного анализа было установлено, что помеха, обусловленная как повторяющимися, так и одиночными кавернами, не изменяет среднего уровня сигнала зондов ВЭМКЗ. По значениям и форме пиков помехи может быть оценена форма и глубина каверн. Перед визуальной и численной интерпретацией помеха может быть удалена

осреднением сигнала, но при этом могут сгладиться изменения сигнала напротив тонких пластов.

Заключение. Методы электрического и электромагнитного каротажных зондирования обеспечивают измерения, необходимые для детального восстановления радиального распределения удельного электрического сопротивления, оценки таких дополнительных электрофизических параметров, как относительная диэлектрическая проницаемость и анизотропия электропроводности.

Применение двумерного и трехмерного численного моделирования повышает достоверность восстанавливаемых пространственных распределений удельного электрического сопротивления по практическим данным, измеренным на интервалах сложнопостроен-

ных коллекторов как в вертикальных, так и в наклонных скважинах.

Корректный учет влияния геометрических особенностей скважины и эксцентриситета зонда ВЭМКЗ при высокой электропроводности бурового раствора облегчает визуальную интерпретацию диаграмм и повышает точность оценки параметров зоны проникновения при численной инверсии данных.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИНГГ СО РАН М. Н. Никитенко, О. В. Нечаеву, И. В. Суроудиной за предоставленные программы численного моделирования, коллективу под руководством А. Ю. Соболева за возможность работы в автоматизированной системе численной интерпретации EMF Pro, а также тресту «Сургутнефтегеофизика» за предоставленные практические материалы.

Список литературы

- Дашевский Ю.А., Суродина И. В., Эпов М. И. Квазитрехмерное математическое моделирование диаграмм неосесимметричных зондов постоянного тока в анизотропных разрезах // Сибирский журнал индустриальной математики. — 2002. — 5, № 3(11). — С. 76—91.
- Зыкина М. Г., Мамяшев В. Г. Особенности кривых метода ВИКИЗ в горизонтальных скважинах // Матер. Междунар. конф. геофизиков и геологов (3—7 декабря 2007 г., Тюмень). — Тюмень, 2007. — [Электронный ресурс].
- Игнатов В. С., Сухорукова К. В. Влияние эксцентриситета зонда на сигналы высокочастотного электромагнитного каротажа // НТВ «Каротажник». — Тверь: Изд. АИС, 2009. — Вып. 182. — С. 101—110.
- Кашеваров А. А., Ельцов И. Н., Эпов М. И. Гидродинамическая модель формирования зоны проникновения при бурении скважин // Прикл. механика и техн. физика. — 2003. — 44, № 6. — С. 148—157.
- Нечаев О. В., Шурина Э. П. Вычислительные схемы решения трехмерного векторного уравнения Гельмгольца // Тр. Пятой всерос. науч. конф. с междунар. участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (29—31 мая, 2008 г., Самара). — Самара: Изд-во Сам. ун-та, 2008 — Ч. 3. — С. 139—142.
- Пирсон С. Дж. Справочник по интерпретации данных каротажа — Москва: Недра, 1966. — 416 с.
- Суродина И. В. Моделирование диаграмм БКЗ в скважинах с биополимерным раствором // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр., (10—20 апреля 2012 г., Новосибирск). В 2 т.— Новосибирск: СГГА, 2012. — Т. 1. — С. 220—224.
- Сухорукова К. В., Никитенко М. Н., Петров А. Н. Численный анализ измерений ВИКИЗ и ВЭМКЗ на Телецком озере // Каротажник. — 2007. — № 5. — С. 30—38.
- Талалов А. Д., Даев Д. С. О структурном механизме частотной дисперсии электрических свойств гетерогенных горных пород // Физика Земли. — 1996. — № 8. — С. 56—66.
- Технология исследования нефтегазовых скважин на основе ВИКИЗ / Под ред. М. И. Эпова, Ю. Н. Антонова. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. — 112 с.
- Эпов М. И., Глинских В. Н. Электромагнитный каротаж: моделирование и инверсия. — Новосибирск: Гео, 2005. — 98 с.
- 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., Мартаков С. В. Прямые двумерные задачи электромагнитного каротажа // Геология и геофизика. — 1999. — 40, № 2. — С. 249—254.
- Эпов М. И., Никитенко М. Н. Система одномерной интерпретации данных высокочастотных индукционных каротажных зондирований // Геология и геофизика. — 1993. — 34, № 2. — С. 124—130.

Эпов М. И., Никитенко М. Н., Сухорукова К. В. Об инверсии диаграмм ВИКИЗ в контрастных тонкослоистых коллекторах, вскрытых полугими скважинами // Каротажник. — 2006. — № 6 (147). — С. 84—100.

Эпов М. И., Шурина Э. П., Нечаев О. В. Прямое трехмерное моделирование векторного поля для за-

дач электромагнитного каротажа // Геология и геофизика. — 2007. — 48, № 9. — С. 989—995.

Anderson B. I., Barber T. D., Luling M. G., Rasmus J., Sen P. N., Tabanou J. R., Haugland S. M. Observations of large dielectric effects on LWD propagation-resistivity Logs // SPWLA 48th Annual Logging Symposium (June 3—6, Austin, 2007) TX. Paper BB.