

На правах рукописи



ПЕТРОВ Алексей Михайлович

**МЕТОДИКА КОЛИЧЕСТВЕННОЙ
ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ
ЭЛЕКТРОКАРОТАЖА В КЛАССЕ ДВУМЕРНЫХ
ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОСАДОЧНЫХ
ОТЛОЖЕНИЙ**

25.00.10 - геофизика, геофизические методы поисков
полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН).

Научный руководитель:

Сухорукова Карина Владимировна,
доктор технических наук, доцент.

Официальные оппоненты:

Табаровский Леонтий Абрамович,
доктор технических наук, профессор;

Филатов Владимир Викторович,
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, профессор Новосибирского государственного технического университета.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет» (г. Тюмень).

Защита состоится 20 мая 2021 года в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 003.068.03, созданного на базе ИНГГ СО РАН, в конференц-зале.

Отзывы в двух экземплярах, оформленные в соответствии с требованиями Минобрнауки России (см. вклейку), просим направлять по адресу:

630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3,

факс (8-383) 330-28-07,

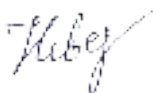
e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИНГГ СО РАН:

<http://www.ipgg.sbras.ru/ru/education/commettee/petrov2021>.

Автореферат разослан 26 марта 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.г.-м.н., доцент
8(383)3331629



Неведрова
Нина Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования – сигналы бокового каротажного (БКЗ) и высокочастотного электромагнитного (ВЭМКЗ, ВИКИЗ) каротажных зондирований в субвертикальных скважинах при исследовании нефтеносных коллекторов и покрышек Западной Сибири.

Актуальность. Удельное электрическое сопротивление (УЭС) – одна из важнейших характеристик коллектора, которая напрямую связана с нефтенасыщенностью. По данным большей части каротажных приборов в вертикальных скважинах определяется только горизонтальная компонента УЭС. Однако часто отложения представляют собой переслаивание разных по электрическим свойствам пород. Такие пласты являются электрически анизотропными образованиями и обычно характеризуются одинаковым УЭС в плоскости напластования – горизонтальным сопротивлением, и более высоким значением УЭС в нормальном к этой плоскости направлении – вертикальным сопротивлением. Интерпретация электрических измерений без должного внимания к вертикальному сопротивлению в таких отложениях может приводить к неправильному определению типа насыщения коллектора или даже пропускам продуктивных интервалов.

Информацию о вертикальном сопротивлении в вертикальных скважинах можно получить из данных многокомпонентного индукционного каротажа, однако из-за низких цен на нефть и экономических санкций этот сервис в России не доступен. В сложившейся ситуации необходимо развитие подходов к количественной интерпретации данных традиционных методов электрометрии, обеспечивающих получение информации о свойствах отложений с меньшими материальными затратами.

Из всех широко применяемых российских методов электрокаротажа в вертикальных скважинах чувствительностью к анизотропии обладают только сигналы зондов БКЗ, однако традиционного подхода к их количественной интерпретации при сложном строении и небольшой толщине электрически контрастных пластов недостаточно. Кроме того, изменения сигналов БКЗ, вызванные влиянием анизотропии УЭС, могут быть эквивалентны изменениям, вызванным проникновением фильтрата бурового раствора в коллектор, что делает невозможным определение компонент УЭС в проницаемых породах без комплексирования с другими методами.

Метод БКЗ входит в России в комплекс обязательного каротажа, а также широко применялся в СССР, что обуславливает наличие большого

количества доступных для обработки архивных материалов. Таким образом, на некоторых площадях интерпретация данных БКЗ является единственной возможностью для исследований анизотропии УЭС осадочных пород без проведения дорогостоящих измерений или бурения.

Разрабатываемое в последнее десятилетие в ИНГГ СО РАН программное обеспечение численного моделирования и инверсии данных электрокаротажа в двумерной геоэлектрической модели вскрытых вертикальной скважиной осадочных отложений предоставляет возможность провести как детальное исследование поведения сигналов зондов электрокаротажа, так и количественно интерпретировать измеренные данные.

Совокупностью этих причин обуславливается актуальность создания методики совместной интерпретации данных комплекса электрического и электромагнитного каротажей с возможностью определения горизонтальной и вертикальной компонент тензора УЭС в проницаемых породах при малых толщинах отдельных пропластков (~0.5 м) с применением современных вычислительных алгоритмов.

Цель исследования – повысить достоверность и информативность количественной интерпретации результатов измерения методом бокового каротажного зондирования в вертикальных скважинах в анизотропных осадочных разрезах за счет детального подбора изменения сигналов вдоль скважины, применения новых алгоритмов численного двумерного моделирования и инверсии сигналов, совместного анализа с данными высокочастотного электромагнитного каротажного зондирования.

Научная задача – разработать методику обработки и количественной интерпретации сигналов бокового каротажного зондирования в субвертикальных скважинах на основе численной инверсии, в том числе совместной с данными высокочастотного электромагнитного зондирования, и построения реалистичных двумерных геоэлектрических моделей сложнопостроенных анизотропных осадочных отложений.

Фактический материал, методы и программные средства

Основной метод исследования – анализ результатов численного моделирования сигналов БКЗ и ВЭМКЗ (значений кажущегося сопротивления для градиент-зондов, разности фаз и их трансформаций для зондов ВЭМКЗ) в сравнении с практическими данными из субвертикальных скважин месторождений Западной Сибири.

Численное моделирование и инверсия выполнялись с использованием верифицированных программ, разработанных сотрудниками Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (О.В. Нечаев, В.Н. Глинских, М.Н. Никитенко и др.). При численном моделировании прискважинное пространство характеризуется геометрическими и электрофизическими параметрами, описывающими условия измерения в субвертикальных скважинах в Западной Сибири: диаметром прибора, УЭС бурового раствора, диаметром скважины напротив каждого пласта, УЭС и диэлектрической проницаемостью (ДП) блоков модели, углом пересечения оси скважины и границ напластования.

Выводы базируются на результатах сравнительного анализа рассчитанных и практических данных, полученных ОАО «Сургутнефтегаз» в 19 скважинах на территории Западной Сибири, включающих данные ВЭМКЗ, БКЗ, бокового каротажа (БК), гамма-каротажа, потенциала самопроизвольной поляризации, нейтронного каротажа, кавернометрии и др. Практические данные БКЗ и ВЭМКЗ измерены калиброванной и сертифицированной аппаратурой К1А-723М (ООО НПО "ГЕОПРОМ", г. Уфа); ВИКИЗ, СКЛ-76 (ООО НПП ГА "Луч", г. Новосибирск).

Защищаемые научные результаты:

1. На основе анализа результатов численного моделирования сигналов бокового каротажного зондирования в двух- и трехмерных моделях прискважинного пространства, типичных для осадочных разрезов Западной Сибири, обоснована применимость численной инверсии данных БКЗ на базе двумерных кусочно-постоянных моделей и при отклонении зенитного угла встречи скважины и границ напластования до 15 градусов.

2. Разработана методика количественной интерпретации сигналов БКЗ, в том числе совместной с сигналами ВЭМКЗ, основанная на применении программного комплекса AlondraWL для инверсии сигналов в параметры двумерной анизотропной геоэлектрической модели, включающая приемы и алгоритмы построения стартовой модели с расстановкой границ пластов и учетом априорной информации, оценки невязки измеренных и рассчитанных сигналов с учетом неувязки по глубине, оценки распределения возможных значений параметров, а также последовательность вовлечения в инверсию параметров модели.

Научная новизна

1. По результатам анализа результатов численного моделирования сигналов БКЗ в двух- и трехмерных геоэлектрических моделях анизотропного прискважинного пространства установлено, что в характерных для Западной Сибири условиях:

- наклон скважины до 15 градусов не приводит к существенному увеличению погрешностей определения параметров пластов при инверсии измеренных данных на базе двумерной осесимметричной модели;

- непрерывному радиальному и вертикальному изменению УЭС можно найти соответствующее кусочно-постоянное представление, удовлетворяющее данным БКЗ и ВЭМКЗ с практически значимой точностью.

2. При интерпретации данных по разработанной методике подбираются изменения сигналов зондов БКЗ вдоль скважины, что повышает точность определения параметров тонких пластов по сравнению с методиками, основанными на обработке пластовых отсчетов, и позволяет оценивать значение вертикального УЭС пластов.

3. Совместная инверсия данных БКЗ и ВЭМКЗ с построением согласованной двумерной геоэлектрической модели увеличивает достоверность и сужает диапазон неоднозначности параметров измененных фильтрацией бурового раствора зон и значений горизонтального УЭС пластов-коллекторов, позволяя оценивать вертикальное УЭС проницаемых отложений.

4. Предложенный подход к оценке погрешности восстановления параметров модели среды при двумерной инверсии сигналов БКЗ и ВЭМКЗ основан на анализе результатов при различных стартовых моделях. Программно реализованный алгоритм учитывает одновременное изменение нескольких параметров модели и априорную информацию о свойствах пластов, а также более точно оценивает погрешности, чем подход на основе анализа производных сигналов по параметрам модели.

5. Совместно с сотрудником ИНГГ СО РАН Г.Н. Логиновым разработан алгоритм для автоматической расстановки границ по данным БКЗ на основе искусственной нейронной сети. Алгоритм обучен на синтетических сигналах БКЗ, рассчитанных в типичных геоэлектрических моделях осадочных отложений Западной Сибири для условий их вскрытия на глинистом буровом растворе (УЭС бурового раствора 0.3-3.5 Ом·м, диаметр скважины 0.18-0.3 м, толщина пластов 0.1-5 м, ширина измененных зон 0.05-1.0 м, горизонтальное УЭС блоков среды 1-2000 Ом·м, коэффициент

анизотропии УЭС 1-3.5), и практических данных, измеренных в скважинах месторождений Широного Приобья.

6. По результатам инверсии измеренных аппаратурой СКЛ и К1А-723М сигналов БКЗ определена анизотропия УЭС на интервалах баженовской свиты. По результатам совместной инверсии сигналов БКЗ и ВЭМКЗ построены детальные геоэлектрические модели терригенных меловых коллекторов Западной Сибири с оценкой их вертикального УЭС.

Личный вклад

С применением программного комплекса AlondraWL, разработанного с.н.с. ИНГТ СО РАН О.В. Нечаевым, и других программ, созданных сотрудниками ИНГТ СО РАН, проведены расчеты сигналов БКЗ и других методов в геоэлектрических моделях, типичных для меловых песчано-глинистых отложений Западной Сибири и баженовской свиты, с применением самостоятельно созданных вспомогательных программ визуализированы сигналы и проведен их сравнительный и численный анализ.

Опытным путем на многочисленных данных БКЗ и ВЭМКЗ установлена оптимальная последовательность действий при количественной интерпретации данных электрокаротажа, основанной на численной инверсии, включающая построение стартовой модели, проверку кондиционности измеренных сигналов, выбор модели радиального строения пластов, учет априорной информации при задании диапазонов изменения параметров, итерационный подход к включению в инверсию параметров пластов, оценку невязки подбираемых сигналов с учетом их взаимной невязки по глубине, а также оценку распределения возможных значений параметров для отдельных пластов и цилиндрических прискважинных зон.

Проведено численное исследование влияния на результаты совместной инверсии слабого наклона скважины и грубой ступенчатой аппроксимации непрерывного радиального и вертикального изменения УЭС в модели нефтеводонасыщенного коллектора.

В процессе модификации программного обеспечения инверсии (комплекса AlondraWL) осуществлено масштабное тестирование на синтетических и практических данных (суммарно более 3000 м), выявлены программные ошибки, предложены и экспериментально проверены варианты оптимизации работы алгоритма инверсии (в сотрудничестве с автором ПО О.В. Нечаевым).

Проведена количественная интерпретация более 30 интервалов каротажных данных, каждый из которых включает пересечение не менее 50

пластов песчаного, глинистого, карбонатного и смешанного состава с разными геоэлектрическими характеристиками, в том числе баженовскую свиту.

Реализован подход к оценке погрешности восстановления параметров модели среды при двумерной инверсии сигналов БКЗ и ВЭМКЗ, основанный на анализе результатов инверсии от разных стартовых моделей.

Для алгоритма расстановки границ по данным БКЗ с помощью искусственной нейронной сети построена представительная обучающая выборка сигналов БКЗ на базе типичных геоэлектрических моделей осадочных отложений Западной Сибири для условий их вскрытия на глинистом буровом растворе и практических данных. Суммарная длина сгенерированных синтетических сигналов 90 км, размеченных практических – 10 км. Проанализированы результаты применения алгоритма к практическим данным, измеренным в скважинах месторождений Широкого Приобья.

Теоретическая и практическая значимость исследования

1. В характерных для Западной Сибири условиях обоснована применимость инверсии данных БКЗ и ВЭМКЗ, в том числе совместной, на базе двумерной осесимметричной модели с кусочно-постоянным изменением свойств для практически важного случая слабонаклонных скважин и в отложениях с плавным радиальным и вертикальным изменением электрофизических свойств.

2. Учет в геоэлектрической модели анизотропии УЭС и диэлектрической проницаемости устраняет кажущееся противоречие между сигналами ВЭМКЗ и БКЗ, часто наблюдающееся в практических данных и приводящее к неверному заключению о некондиционности измерений.

3. Разработанный алгоритм оценки погрешности определения параметров модели позволяет оценивать погрешность определяемых при инверсии практических сигналов параметров анизотропных песчано-глинистых коллекторов, что может быть использовано для оценки погрешности в определении коэффициента нефтенасыщения, толщины маломощных прослоев и эффективных толщин.

4. Алгоритм автоматической расстановки границ пластов по данным БКЗ упрощает построение стартовой модели в случае неувязки по глубине с данными методов радиоактивного каротажа и потенциала самополяризации, при их отсутствии или плохом качестве, а также позволяет ускорить процесс количественной интерпретации за счет уменьшения количества подбираемых параметров.

5. По результатам инверсии сигналов БКЗ определена анизотропия УЭС баженовской свиты на месторождениях Широного Приобья, что дополняет базу известных электрофизических свойств этих отложений и может быть использовано при решении задачи геонавигации горизонтальных скважин при разработке баженовских коллекторов.

6. По результатам инверсии сигналов БКЗ и ВЭМКЗ построены детальные модели меловых коллекторов различного насыщения и вмещающих их отложений. Независимая оценка горизонтального и вертикального УЭС повышает надежность заключения о типе флюидонасыщения, а с привлечением дополнительной априорной информации о характере переслаивания по компонентам УЭС определяются эффективные параметры песчано-глинистых коллекторов.

Достоверность результатов численного моделирования достигается использованием программно-алгоритмических средств решения прямых задач электрического и электромагнитного каротажа, верифицированных перекрестным сравнением с результатами других программ численного моделирования, сравнением с данными, измеренными сертифицированными приборами в вертикальных скважинах, вскрывающих разрезы с известными геоэлектрическими свойствами (хорошо изученные месторождения Федоровское, Русскинское, Восточно-Сургутское и др.).

Программы инверсии протестированы на синтетических сигналах, рассчитанных в реалистичных моделях осадочных отложений, и практическом материале, измеренном в скважинах нескольких месторождений Западной Сибири. Надежность тестирования на практических материалах обеспечивается представительностью используемых в работе данных комплекса геофизических исследований в открытом стволе вертикальных скважин.

Результаты инверсии данных БКЗ или комплекса данных БКЗ и ВЭМКЗ проверяются сравнением рассчитанных в полученной модели разреза сигналов БК и ИК с измеренными сигналами, не участвовавшими в инверсии.

Результаты расчетов и инверсии практических сигналов обсуждались на семинарах в разных научных организациях, опубликованы в рецензируемых журналах и представлены на научных и научно-практических конференциях различного уровня.

Апробация работы и публикации. Выносимые на защиту результаты изложены в 21 рецензируемой публикации, в том числе в 6 статьях, опубликованных в 5 рецензируемых научных журналах, рекомендованных перечнем ВАК («Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири», «Геология и геофизика», «Каротажник», «Нефтяное хозяйство», «Petrophysics»). Материалы работы представлены на научных и научно-практических конференциях и семинарах.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, содержит 147 страниц текста, в том числе 49 рисунков, 6 таблиц и библиографию из 150 наименований.

Благодарности. Работа выполнена в лаборатории многомасштабной геофизики ИНГГ СО РАН под руководством главного научного сотрудника д.т.н. К.В. Сухоруковой, которой автор выражает самые искренние уважение и благодарность за помощь, терпение и поддержку на протяжении шести лет совместной работы.

Автор крайне признателен старшему научному сотруднику ИНГГ СО РАН к.ф.-м.н. О.В. Нечаеву за создание уникальных программных алгоритмов, которые легли в основу данной работы, а также за доброжелательное отношение и отзывчивость.

За помощь в решении административных вопросов, возможность обсуждения полученных результатов и посещения разнообразных научных мероприятий автор благодарен заведующему лабораторией многомасштабной геофизики д.ф.-м.н. чл.-корр. РАН В.Н. Глинских.

Особую признательность хочется выразить д.т.н. академику М.И. Эпову за помощь, консультации, ценные советы и наставления.

За создание комфортной рабочей атмосферы автор признателен всему коллективу лаборатории многомасштабной геофизики; за участие в работе и обсуждение результатов – Даниловскому К.Н. и Логинову Г.Н.

За неоценимую помощь и поддержку на протяжении всего обучения и научной работы автор благодарит своих родителей и жену.

За дополнительную финансовую поддержку исследований, благодаря которой стало возможно углубление и расширение работы, автор выражает благодарность российскому фонду фундаментальных исследований, некоммерческой организации Society of Exploration Geophysicists (SEG) и компании BP.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** определены объект, цель и задача исследования, сформулированы основные полученные результаты, актуальность, научная новизна и личный вклад.

В **главе 1 «Современное состояние проблемы оценки электрической анизотропии по данным электрокаротажа»**, имеющей обзорный характер, приводятся сведения о развитии методов определения вертикального удельного электрического сопротивления (УЭС) по данным измерений в вертикальных скважинах, рассматриваются проблема учета влияния на измерение УЭС поляризации горных пород и существующие подходы к моделированию и инверсии данных БКЗ и ВЭМКЗ. Проведённый анализ открытых публикаций позволяет сделать следующие выводы.

1. Несмотря на активную разработку аппаратурно-методических решений, на сегодняшний день БКЗ является единственным широко применяемым отечественным методом электрометрии, чувствительным к вертикальному УЭС в вертикальных скважинах.

2. Применение зарубежных систем многокомпонентного индукционного каротажа в России затруднено в связи с высокой стоимостью сервисных работ, российских приборов подобного типа на рынке геофизических услуг не представлено.

3. Единственной возможностью для фундаментальных исследований анизотропии УЭС без проведения дорогостоящих измерений является интерпретация данных БКЗ. Для обработки доступно большое количество архивных материалов, в том числе и из давно закрытых скважин на многих месторождениях России и стран ближнего зарубежья.

4. На данный момент нет устоявшегося подхода к учету влияния диэлектрической проницаемости на измерения индукционными зондами. Существующие в скважинной геофизике решения опираются на возможности и особенности применяемой аппаратуры.

5. Несмотря на достаточно большое количество опубликованных алгоритмов моделирования и инверсии сигналов БКЗ и ВЭМКЗ в двумерных осесимметричных средах, большинство из них не отвечают требованиям, выполнение которых необходимо для создания методики интерпретации сигналов БКЗ и ВЭМКЗ с определением вертикального УЭС.

6. Предлагаемая в данной работе методика определения вертикального УЭС по данным БКЗ не имеет опубликованных аналогов.

В главе 2 «Расчетные сигналы бокового каротажного зондирования и высокочастотного электромагнитного каротажного зондирования и их инверсия в классе двумерных геоэлектрических моделей» рассматриваются результаты численного моделирования и инверсии сигналов электрокаротажа, рассчитанных в реалистичных моделях терригенных отложений Западной Сибири, обосновывающие разработанную методику.

В разделе 2.1 описаны применяемые алгоритмы моделирования и инверсии сигналов БКЗ и ВЭМКЗ, а также дополнительное программное обеспечение, использованное в работе.

В разделе 2.2 приведены типичные геоэлектрические модели терригенных отложений Западной Сибири, рассматриваемые в работе в качестве базовых [1]. В разделе 2.3 – анализ сигналов электрокаротажа в некоторых из этих моделей [5]. Показано, что в рассматриваемых условиях значения кажущегося УЭС по данным БКЗ, ВЭМКЗ и БК не позволяют достоверно судить о свойствах прискважинного пространства. Сравнительно малая мощность пластов также существенно ограничивает возможности применения 1D инверсии на базе одномерной радиально-слоистой модели, особенно данных БКЗ. В то же время при двумерной (2D) инверсии данных БКЗ или БКЗ и ВЭМКЗ можно не только естественным образом учитывать в каждой точке измерения вклад всех формирующих сигнал пластов, но и оценивать вертикальное УЭС отложений [10].

В разделе 2.4 на тестовом наборе моделей отложений рассматриваются возможности восстановления параметров среды с помощью совместной инверсии БКЗ и ВЭМКЗ.

На результатах инверсии синтетических данных показано, что в геоэлектрических условиях, соответствующих типичным моделям терригенных отложений Западной Сибири, при совместной инверсии сигналов БКЗ и ВЭМКЗ сужается область эквивалентности параметров зоны проникновения и окаймляющей зоны, что дает возможность оценивать вертикальное УЭС неизменной фильтрацией бурового раствора части пластов в коллекторах со сложным радиальным профилем УЭС [10].

Предложен и программно реализован подход к оценке погрешности определения восстанавливаемых при инверсии параметров среды на основе статистического моделирования [7]. С применением алгоритма показана недостаточность оценки погрешности на основе анализа функций чувствительности сигналов к параметрам модели при инверсии данных

БКЗ; построены обоснованные оценки погрешностей для результатов инверсии синтетических данных БКЗ и ВЭМКЗ, рассчитанных в реалистичных моделях терригенных отложений Западной Сибири; обосновано применение интервальных ограничителей для учета в инверсии данных априорной информации.

В разделе 2.5 обсуждаются условия применимости инверсии данных БКЗ и ВЭМКЗ в классе двумерных моделей.

Рассмотрены вопросы влияния кусочно-постоянной аппроксимации непрерывного радиального профиля УЭС и непрерывного вертикального изменения УЭС на измеряемые сигналы. Результатами численного моделирования сигналов каротажа в двумерных осесимметричных моделях анизотропных сред показана достаточность блочной кусочно-постоянной параметризации среды для корректного восстановления вертикального УЭС отложений при инверсии данных БКЗ и ВЭМКЗ, измеренных в вертикальных скважинах.

С применением новейших высокоточных алгоритмов численного моделирования сигналов БКЗ в трехмерных моделях анизотропных сред с учетом влияния скважины и корпуса прибора, исследовано влияние на сигналы и результаты их двумерной инверсии отклонения угла пересечения скважиной геоэлектрических границ от нормального как в моделях бесконечно мощных пластов, так и в моделях, сложенных относительно тонкими пластами (рисунок 1).

Обосновано применение инверсии сигналов БКЗ и ВЭМКЗ на базе двумерных осесимметричных моделей в терригенном разрезе при отклонении угла пересечения скважины и границ пластов θ от нормального до 15 градусов [4]. На рисунке 2 приведен пример сигналов, рассчитанных в модели D и в соответствующей осесимметричной модели. Несмотря на существенное относительное расхождение сигналов длинных зондов, инверсия данных, рассчитанных при $\theta=0^\circ$ и $\theta=15^\circ$, в параметры осесимметричной модели не приводит к практически значимому различию значений параметров. В приведенном примере среди пластовых параметров при инверсии наименее точно определяется вертикальное УЭС водонасыщенной части (относительная ошибка 9%), наиболее точно – горизонтальное УЭС (относительная ошибка менее 5% для всех пластов). Подобный анализ, проведенный для различных типов моделей, параметров среды и значений θ , позволяет утверждать, что в типичных для западносибирского терри-

генного разреза условиях отклонение угла пересечения скважины и границ пластов от нормального до 15° не приводит к существенному увеличению погрешностей определения модельных параметров.

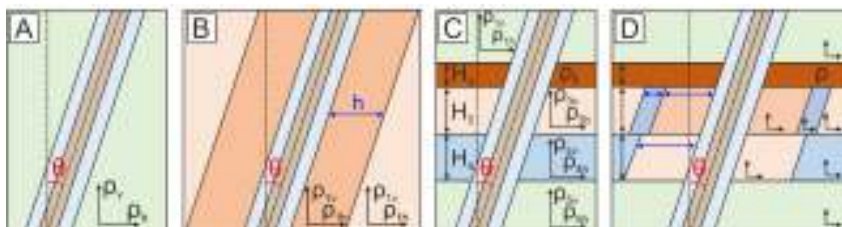


Рисунок 1 – Типы моделей трансверсально-изотропных отложений, пересеченных наклонной скважиной: А – модель мощного непроницаемого пласта; В – модель мощного проницаемого пласта; С – модель непроницаемого слоистого разреза; D – модель слоистого коллектора с пластами разного насыщения

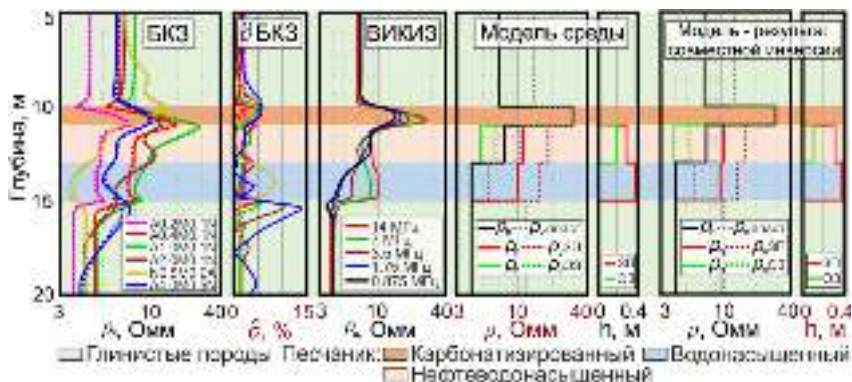


Рисунок 2 – Сигналы БКЗ и ВЭМКЗ в модели D, пересеченной наклонной ($\theta=15^\circ$, пунктирные линии) и вертикальной скважиной (сплошные линии), относительное расхождение сигналов БКЗ δ и параметры модели

Таким образом, результатами анализа синтетических сигналов и численными экспериментами обосновано применение совместной инверсии данных БКЗ и ВЭМКЗ на базе двумерных осесимметричных моделей анизотропных сред для восстановления вертикального УЭС терригенных отложений в вертикальных скважинах.

В главе 3 «Методика количественной интерпретации данных бокового каротажного зондирования и высокочастотного электромагнитного каротажного зондирования на основе численной инверсии в классе двумерных геоэлектрических моделей» описывается разработанная методика [4] как совокупность последовательности действий, алгоритма расстановки границ и способов оценки качества инверсии, позволяющая путем инверсии практических данных БКЗ и ВЭМКЗ получать реалистичные геоэлектрические модели терригенных отложений, удовлетворяющие измеренным данным и априорной информации.

В разделе 3.1 приводятся рекомендации по анализу кондиционности практического каротажного материала и по их предварительной обработке. При подготовке данных БКЗ и ВЭМКЗ к численной инверсии необходимо оценить качество материалов: согласованность сигналов градиент-зондов с данными резистивиметрии и кавернометрии, качество увязки по глубине, оценить влияние диэлектрической проницаемости и ее частотной дисперсии на сигналы ВЭМКЗ, а также исключить возможное влияние эксцентриситета. При измерении в наклонных скважинах для повышения точности инверсии и корректной оценки мощности пластов данные электрокаротажа следует спроецировать на вертикаль.

В разделе 3.2 рассматриваются вопросы построения стартовой модели для инверсии данных. Стартовая модель строится способом одномерной инверсии, например, в программе EMF Pro (ИНГГ СО РАН), модель радиального изменения УЭС в проницаемых пластах задается на основе априорной информации о технологии бурения. Для автоматизированного расчленения пластов разреза в соавторстве с сотрудником ИНГГ СО РАН Логиновым Г.Н. разработан и реализован программно алгоритм расстановки горизонтальных геоэлектрических границ по данным БКЗ на основе искусственной нейронной сети. Описаны структура алгоритма, принципы формирования обучающей выборки и результаты тестирования на практических данных [3].

В разделе 3.3 предлагается способ оценки качества подбора измеренных данных при совместной инверсии на основе невязки сигналов, учитывающей их возможную неувязку в пределах шага дискретизации по глубине.

В разделе 3.4 описываются методические приемы совместной численной инверсии данных БКЗ и ВЭМКЗ с применением программного комплекса AlonrdaWL. Численную инверсию целесообразно выполнять в

несколько итераций, последовательно расширяя набор подбираемых параметров модели:

- при инверсии БКЗ при первой итерации подбираются УЭС зон проникновения и горизонтальное и вертикальное УЭС пластов, при второй итерации подбираются также положения горизонтальных и радиальных границ (границы пластов и толщина зоны проникновения);

- при инверсии БКЗ и ВЭМКЗ в разрезах без изменения проницаемых пластов фильтрацией бурового раствора при первой итерации подбираются значения УЭС пластов и положения границ только по данным БКЗ, на второй итерации уточняются значения УЭС и подбираются значения диэлектрической проницаемости по данным БКЗ и ВЭМКЗ;

- при инверсии БКЗ и ВЭМКЗ в разрезах с нефтеводонасыщенными пластами, в которых есть зона проникновения и окаймляющая зона (ОЗ), при первой итерации по данным БКЗ и ВЭМКЗ подбираются УЭС и ширина зон проникновения и горизонтальное и вертикальное УЭС пластов (не подбираются горизонтальные границы пластов, параметры окаймляющей зоны и диэлектрическая проницаемость), далее на второй итерации в подбор добавляются горизонтальные границы, на третьей итерации – радиальные границы, УЭС ОЗ и эффективная диэлектрическая проницаемость на частотах ВЭМКЗ.

При неудовлетворительном результате инверсии корректируется разбивка разреза на пласты, добавляются или удаляются измененные фильтрацией бурового раствора зоны, вводится ограничение параметров пластов и проводятся дополнительные итерации инверсии.

В главе 4 «Двумерная инверсия практических данных из скважин Широтного Приобья и Нижнеенисейского нефтегазоносного района» представлены примеры применения разработанной методики на практических данных БКЗ и ВЭМКЗ.

В разделе 4.1 описывается используемый каротажный материал – данные из 19 скважин Широтного Приобья и Нижнеенисейского нефтегазоносного района – и анализируется его кондиционность.

В разделе 4.2 по данным открытых источников анализируются физические свойства баженовской свиты и рассматриваются примеры интерпретации данных БКЗ, измеренных на её интервале в скважинах Федоровского месторождения [1, 8]. Установлена связь анизотропии УЭС λ с основными типами пород свиты в пределах высокоомных отложений [8,9]. Наименьшая анизотропия характерна для карбонатных пропластков,

В разделе 4.3 приведены результаты совместной инверсии данных БКЗ и ВЭМКЗ, измеренных на интервалах меловых отложений, и оценки вертикального УЭС песчано-глинистого коллектора по данным БКЗ с помощью разработанного алгоритма на основе статистического моделирования [7]. На рисунке 4 приведен пример совместной инверсии данных БКЗ и ВЭМКЗ на интервале коллектора БС10 и вмещающих его отложений.

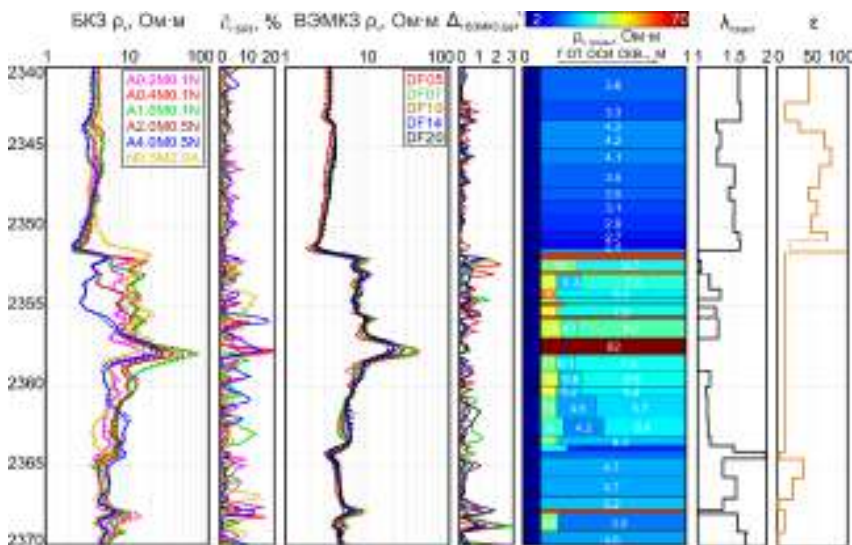


Рисунок 4 – 2D геоэлектрическая модель коллектора БС10. Слева направо: диаграммы измеренных (пунктир) и рассчитанных (сплошные линии) сигналов БКЗ (кажущееся УЭС); поточечные невязки измеренных и рассчитанных сигналов БКЗ; диаграммы ρ_k ВЭМКЗ (измерение и расчет); поточечные невязки для ВЭМКЗ; распределение горизонтального УЭС в пластах модели; коэффициент анизотропии УЭС λ ; эфф. 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

Результат инверсии характеризуется высокой точностью подбора практических данных. Восстановлена детальная модель среды со сложным профилем изменения УЭС от стенки скважины вглубь пласта. По наличию окаймляющей зоны – прямого признака наличия в пластах по-

движной нефти – явно выделяются пласты-коллекторы смешанного насыщения. Оценено вертикальное УЭС пластов. Наибольшими значениями λ характеризуются глинистые отложения. В качестве дополнительного параметра восстанавливается эффективная диэлектрическая проницаемость (ε) на частотах ВЭМКЗ.

Всего с применением разработанной методики количественной интерпретации данных БКЗ и ВЭМКЗ проведена количественная интерпретация более 1000 м данных высокочастотного электромагнитного и бокового каротажных зондирований, измеренных на интервалах меловых отложений месторождений Западной Сибири, сложенных переслаиванием песчаных, глинистых и карбонатизированных пластов малой мощности [6, 11]. Построены детальные геоэлектрические модели коллекторов с определением электрофизических параметров пластов и измененных фильтрацией бурового раствора зон и с выявлением нефтесодержащих интервалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и обоснована численными экспериментами методика интерпретации данных БКЗ или комплекса данных БКЗ и ВЭМКЗ, измеренных в геологических средах, сложенных анизотропными породами с малыми толщинами пропластков, позволяющая более точно оценивать электрофизические параметры анизотропных отложений, чем существующие подходы. С применением разработанной методики при обработке сигналов БКЗ можно определить две компоненты УЭС (ρ_h и ρ_v) непроницаемых отложений. Благодаря использованию высокоточного численного двумерного моделирования и построению детальных геоэлектрических моделей прискважинного пространства, удовлетворяющих данным двух разных по физическим принципам зондирующих методов, при совместной инверсии сигналов БКЗ и ВЭМКЗ становится возможным определение вертикального УЭС проницаемых отложений, в том числе сравнительно малой мощности. В качестве дополнительного параметра оценивается эффективная диэлектрическая проницаемость глинистых прослоев на частотах ВЭМКЗ.

Результаты тестирования методики и алгоритмов на синтетических данных показывают хорошую точность восстановления практически значимых модельных параметров в типичных для западносибирского терригенного разреза условий. Масштабная апробация на практических данных демонстрирует преимущество перед традиционными подходами.

Дальнейшее развитие может быть связано с ускорением моделирования сигналов, например, при помощи использования решателей прямых задач на основе искусственных нейронных сетей. Применение таких алгоритмов очень существенно повысит скорость обработки данных, что может оказаться решающим фактором при внедрении методики. С исследовательской точки зрения представляют интерес сигналы каротажа в средах с наклоном осей тензора электропроводности. Углубленный анализ данных различных методов электрокаротажа и возможностей их инверсии в таких моделях может открыть новые перспективы для исследования трещиноватых коллекторов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК

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

2. Частотная дисперсия электрофизических характеристик и электрическая анизотропия пород баженовской свиты по данным электрокаротажа / М.И. Эпов, В.Н. Глинских, **А.М. Петров**, К.В. Сухорукова, А.А. Федосеев, О.В. Нечаев, М.Н. Никитенко // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 9. – С. 62-64.

3. Логинов Г.Н., **Петров А.М.** Автоматическое выделение геоэлектрических границ по данным бокового каротажного зондирования с помощью глубокой сверточной нейронной сети // Геология и геофизика. – 2019. – Т. 60. – № 11. – С. 1650-1657.

4. **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.

5. Eпов M.I., Sukhorukova K.V., Nechaev O.V., **Petrov A.M.**, Rabinovich M., Weston H., Tyurin E., Wang G.L., Abubakar A., Claverie M. Comparison of the Russian and Western Resistivity Logs in Typical Western Siberian Reservoir Environments: A Numerical Study // Petrophysics. – 2020. – № 1(61). – P. 38-71.

6. Сухорукова К.В., **Петров А.М.**, Нечаев О.В. Геоэлектрические модели меловых коллекторов Западной Сибири по результатам комплексной интерпретации данных электрокаротажа // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2020. – № 3(43). – С. 77-86.

Другие значимые публикации

7. **Петров А.М.**, Сухорукова К.В. Оценка погрешности определения параметров среды при двумерной инверсии сигналов российского электрокаротажа с использованием статистического моделирования // Геофизические технологии. – 2020. – № 1, – С. 4-15.

8. **Petrov A.** Determining the resistivity anisotropy of high-resistivity sediments, based on lateral logging sounding data from vertical wells // SPE Annual Technical Conference and Exhibition 2017, San Antonio, USA, 9–11 October, 2017. – 2017. <https://doi.org/10.2118/189295-STU>.

9. **Петров А.М.**, Сухорукова К.В., Нечаев О.В. Геоэлектрическая модель отложений баженовской свиты по данным бокового и электромагнитного каротажных зондирований [Электронный ресурс] // EAGE/SPE Workshop on Shale Science, Session: Prospecting technologies (Moscow, 10–11 April 2017). – 2017. – Pap. M12. – 5 p. – DOI: 10.3997/2214-4609.201700181. – Режим доступа: <http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=87776>.

10. **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–2018. XIV Междунар. науч. конгр., 23–27 апреля 2018 г., Новосибирск, сб. материалов в 6 т. Т. 4. – Новосибирск : СГУГиТ, – 2018. – С. 90-97.

11. **Петров А.М.**, Нечаев О.В., Сухорукова К.В. Двумерная инверсия сигналов российского электрокаротажа, измеренных на интервалах сложно-построенных отложений [Электронный ресурс] // Геомодель-2019: 21-я конференция по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа. 9-13 сентября 2019 г., Геленджик. – 4 с. – Режим доступа: <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=99295>.

Технический редактор Т.С. Курганова

Подписано в печать 19.02.2021

Формат 60x84/16. Бумага офсет №1. Гарнитура Таймс

Печ.л. 1,0. Тираж 100. Зак. № 192

ИНГГ СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3