

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ НЕФТЕГАЗОВОЙ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ
ИМ. А.А. ТРОФИМУКА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Сухорукова Карина Владимировна,
доктор техн. наук

Новосибирск

2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОКАРОТАЖА	14
1.1. Определение электрической анизотропии горных пород по данным ГИС ...	14
1.2. Согласование разночастотных измерений: учет влияния диэлектрической проницаемости	19
1.3. Современное состояние моделирования и инверсии сигналов БКЗ и ВЭМКЗ	22
1.4. Выводы.....	24
Глава 2. РАСЧЕТНЫЕ СИГНАЛЫ БОКОВОГО КАРОТАЖНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И ИХ ИНВЕРСИЯ В КЛАССЕ ДВУМЕРНЫХ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ	25
2.1. Программное обеспечение интерпретации данных БКЗ и ВЭМКЗ.....	25
Решение прямых задач БКЗ и ВЭМКЗ в двумерной осесимметричной среде.....	25
Решение обратных задач БКЗ и ВЭМКЗ.....	29
Дополнительное программное обеспечение.....	30
2.2. Геоэлектрические модели осадочных отложений Западной Сибири	31
2.3. Сигналы электрокаротажа в изотропных и анизотропных моделях.....	34
2.4. Точность восстановления геоэлектрических параметров	40
Инверсия синтетических сигналов.....	40
Статистическая оценка точности восстановления параметров	44
Влияние ошибочного определения типа модели на результаты инверсии данных БКЗ	52

2.5. Условия применимости численной инверсии данных БКЗ и ВЭМКЗ в классе двумерных моделей	62
Влияние кусочно-постоянной аппроксимации радиального профиля УЭС..	62
Влияние кусочно-постоянной аппроксимации вертикального изменения УЭС	65
Влияние отклонения угла пересечения скважины и плоскости границ пластов от нормального	68
2.6. Выводы и результаты.....	74
Глава 3. МЕТОДИКА КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ БОКОВОГО КАРОТАЖНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОЙ ИНВЕРСИИ В КЛАССЕ ДВУМЕРНЫХ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ	76
3.1. Анализ кондиционности каротажного материала	76
3.2. Построение стартовой геоэлектрической модели.....	78
Алгоритм расстановки границ по данным БКЗ на основе искусственной нейронной сети	79
3.3. Оценка качества подбора измеренных данных.....	87
3.4. Методические приемы совместной численной инверсии данных БКЗ и ВЭМКЗ с применением программного комплекса AlonrdaWL	91
3.5. Выводы и результаты	95
Глава 4. ДВУМЕРНАЯ ИНВЕРСИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ИЗ СКВАЖИН ШИРОТНОГО ПРИОБЬЯ И НИЖНЕЕНИСЕЙСКОГО НЕФТЕГАЗОНОСНОГО РАЙОНА	97
4.1. Каротажный материал и проверка его кондиционности	97
4.2. Интерпретация данных БКЗ на интервалах непроницаемых отложений баженовской свиты	101
Физические свойства баженовской свиты	101

Анизотропия УЭС по данным из скважин Федоровского месторождения..	108
Коэффициент анизотропии и основные литотипы баженовских отложений.....	115
4.3. Инверсия сигналов БКЗ и ВЭМКЗ на интервалах меловых отложений.....	118
Пример 1. Совместная инверсия сигналов БКЗ и ВЭМКЗ, измеренных на интервале коллектора БС10 в скважине Федоровского месторождения.....	119
Пример 2. Совместная инверсия сигналов БКЗ и ВЭМКЗ, измеренных на интервале меловых отложений в скважине месторождения Ванкорской группы .	123
Пример 3. Оценка вертикального УЭС песчано-глинистого коллектора по данным БКЗ, измеренных в скважине Федоровского месторождения	124
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	128
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	131

ВВЕДЕНИЕ

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

В настоящее время в нефтяном сервисе проявляется повышенный интерес к разработке тонкослоистых песчано-глинистых и нетрадиционных коллекторов.

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, и этой характеристики достаточно для описания вертикально однородных песчаных коллекторов. 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. Поэтому знание их вертикального сопротивления является критически важным для оценки нефтенасыщенности и возможной продуктивности таких коллекторов.

Информацию о вертикальном сопротивлении в вертикальных скважинах можно получить с помощью приборов многокомпонентного индукционного каротажа, однако из-за низких цен на нефть их применение в России становится финансово невыгодным. Дополнительно осложняют ситуацию экономические санкции, препятствующие взаимодействию недропользователей с западными сервисными компаниями, предоставляющими услуги с применением подобных приборов.

Сложившаяся ситуация приводит к необходимости развития подходов к количественной интерпретации данных традиционных методов электрометрии, обеспечивающих получение информации о строении и свойствах отложений с минимальными материальными затратами.

Из всех широко применяемых российских методов электрокаротажа в вертикальных скважинах чувствительностью к анизотропии обладают только зонды, используемые в методе бокового каротажного зондирования (БКЗ), однако подхода, традиционно применяющегося к количественной интерпретации данных БКЗ, при сложном строении электрически контрастных отложений и небольшой толщине 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 данными других методов.

Метод БКЗ входит в России в комплекс обязательного каротажа и применяется при исследовании подавляющего большинства пробуренных на территории страны скважин. Также метод широко применялся в СССР, что обуславливает наличие большого количества архивных материалов, доступных для обработки, в том числе и из давно закрытых скважин. Таким образом, на некоторых площадях интерпретация данных БКЗ является единственной возможностью для фундаментальных исследований анизотропии УЭС осадочных пород без проведения дорогостоящих измерений или даже 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 и 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 программно-алгоритмические 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 сигналов и практических данных, полученных ОАО «Сургутнефтегаз» в 19 скважинах на территории Западной Сибири, включающих данные ВЭМКЗ, БКЗ, бокового каротажа (БК), гамма-каротажа (ГК), потенциала самопроизвольной поляризации (ПС), нейтронного каротажа (ННКт), кавернометрии, и др. Практические данные БКЗ и ВЭМКЗ измерены калиброванной и сертифицированной каротажной аппаратурой К1А-723М (Научно-производственное объединение «ГЕОПРОМ», г. Уфа); ВИКИЗ, СКЛ-76 (Научно-производственное предприятие геофизической аппаратуры "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. Предложен подход к оценке погрешности восстановления параметров модели среды при двумерной инверсии сигналов БКЗ и ВЭМКЗ, основанный на анализе результатов при различных стартовых моделях. Программно реализованный алгоритм учиты-

вает одновременное изменение нескольких параметров модели и априорную информацию о свойствах пластов, а также более точно оценивает погрешности, чем традиционный 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 Широкого 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. ИНГГ СО РАН О.В. Нечаевым, и других программ, созданных сотрудниками ИНГГ 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 неувязки 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 различных стартовых моделей.

Для обучения 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

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 модели среды 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 Широтного 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.

Степень достоверности результатов

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 Минобрнауки России для публикации результатов диссертаций (НТВ «Каротажник» – 2, «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири» – 1, «Геология и геофизика» – 1, «Нефтяное хозяйство» – 1, «Petrophysics» – 1). Материалы работы представлены на научных и научно-практических конференциях и семинарах.

Международные конференции: "Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых" "Гео-Сибирь" (Новосибирск, 2015–2019); "EAGE/SPE Workshop on Shale Science" (Москва, 2017); "SPE Annual Technical Conference and Exhibition 2017" (San Antonio, USA, 2017); "Марчуковские научные чтения. Вычислительная математика и математическая геофизика" (Новосибирск, 2018); "XI международный симпозиум стран ЭПШП и ЕАЭС. Новая техника и технологии ГИС для нефтегазовой промышленности" (Новосибирск, 2019).

Всероссийские конференции: "Науки о Земле. Современное состояние" (Геологический полигон "Шира", республика Хакасия, 2018); "Геодинамика. Геомеханика и геофизика: молодежная научная геофизическая школа XIX Всероссийской конференции" (Новосибирск, 2019); "Геомодель-2019" (Геленджик, 2019).

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 и поддержку в работе и жизни в целом, консультации, ценные советы и наставления.

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

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.

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.

Глава 1

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОКАРОТАЖА

1.1. Определение электрической анизотропии горных пород по данным ГИС

Анизотропия удельного электрического сопротивления осадочных пород была выявлена еще в 1920 году известным французским исследователем Конрадом Шлюмберже. Для осадочных горных пород это свойство не является исключительным, напротив, сам процесс отложения осадков и их дальнейшее преобразование естественным образом определяют наличие как минимум одноосной анизотропии как электропроводности, так и других физических свойств, с осью анизотропии, перпендикулярной плоскости напластования пород. Тем не менее, по данным большинства методов электротриеметрии в вертикальных скважинах определяется только горизонтальная компонента тензора УЭС (ρ_h), которая подходит для описания изотропных песчаных коллекторов. Для слоистых песчано-глинистых и низкопроницаемых коллекторов этого недостаточно: сложенный тонким переслаиванием разных по свойствам пород пласт является макроанизотропным, неучет анизотропии этих отложений может приводить к неправильной оценке типа флюидонасыщения или даже пропускам потенциально продуктивных интервалов.

Помимо естественной слоистости осадочных отложений, анизотропия их электрических свойств связана со структурой порового пространства и трещиноватостью породы. Таким образом, знание её параметров может быть использовано при построении петрофизических моделей коллекторов [Кашик, Макарова, 1970]. Более того, анизотропия коллектора и перекрывающих его пород во многих районах является устойчивым признаком нефтегазоносности [Дашевский, Табаровский, 1987].

При очевидной полезности параметров анизотропии УЭС среды, извлечение информации о них из каротажных диаграмм методов кажущегося сопротивления долгое время оставалось трудной задачей, считаясь некоторыми исследователями даже невозможной [Тюркишер, 1945].

Для оценки положения разработанной диссертантом методики интерпретации данных БКЗ с определением вертикального УЭС (ρ_v) среди других аппаратурно-методических решений, представляется необходимым рассмотреть как современные подходы к определению параметров электрической анизотропии по данным ГИС, так и историю их

становления. Следует отметить, что в контексте данной работы рассматриваются только те методы, которые позволяют оценивать вертикальное УЭС при измерениях в вертикальных скважинах. В наклонных скважинах чувствительностью к анизотропии обладают все применяемые методы электрометрии, однако интерпретация измерений и определение параметров анизотропии в наклонных скважинах – это отдельная тема, находящаяся за пределами данной работы.

Помимо естественных физических ограничений традиционных методов кажущегося сопротивления (КС), таких как симметрия поля, возбуждаемого в пласте, вскрываемом скважиной перпендикулярно плоскости напластования (позволяет изучать среду только в трансверсально-изотропной постановке), и парадокс анизотропии, который сводится к эквивалентному влиянию на градиент-зонды метода КС анизотропии среды и повышающей зоны проникновения раствора в одномерной постановке [Kunz, Moran, 1958], решение проблемы осложняли нехватка до недавнего времени вычислительных мощностей и отсутствие эффективных алгоритмов для расчета сигналов каротажа в 2D и 3D моделях сред.

В условиях ограниченных вычислительных ресурсов значительный вклад в исследование этой проблемы внесли многие советские ученые: Л.М. Альпин, В.Н. Дахнов, И.Э. Эйдман и многие другие. Так, в [Журавлев, 1968] и [Журавлев, 1971] были предложены методики определения по данным БКЗ коэффициента анизотропии УЭС в одномерной постановке и при пересечении анизотропного пласта соответственно, в предположении об отсутствии проникновения бурового раствора в пласт.

Параллельно с методической частью развивалась и аппаратная: в 1970 году И.Э. Эйдман получил патент на индукционный каротаж поперечной проводимости с помощью двухкатушечного зонда, магнитные моменты катушек которого располагались в горизонтальной плоскости [Эйдман, 1970]. Л.М. Альпиным была предложена конструкция зонда постоянного тока [Альпин, 1978], позволяющего измерять вертикальную компоненту УЭС в достаточно однородных и мощных слоях, однако практическая реализация зонда оказалась слишком сложной технически [Снегирев, Великий, 1982], а зонд конструкции Эйдмана обладал известными недостатками двухкатушечных зондов.

Совершенствование теоретической базы электромагнитных методов и резкое увеличение производительности машинных вычислений в 90-х годах прошлого столетия позволило исследователям использовать новые подходы для определения вертикальной компоненты УЭС пород в условиях естественного залегания.

За границей в качестве основного метода постоянного тока наибольшее распространение получили установки фокусированного бокового каротажа с зондами разной длины (Laterolog Array Tool). Например, HRLA (High-Resolution Laterolog Array Tool) компании «Schlumberger» [Better Saturation..., 1999], RTeX (Rt eXplorer) компании «Baker Hughes» [A New Multi..., 2008] и их аналоги. Несмотря на наличие научных работ по восстановлению параметров анизотропии по измерениям этих приборов в вертикальных скважинах в комплексе с индукционными зондированиями [Using array..., 2002; Frenkel, Geldmacher, 2003; Barber, 2006], чувствительность сигналов бокового каротажа к вертикальной компоненте УЭС зачастую оказывается недостаточно высока для практического применения технологии обработки данных с определением ρ_v . Это напрямую связано с конструкцией приборов: фокусировка тока, применяющаяся для увеличения разрешающей способности, подавляет чувствительность измеряемых сигналов к вертикальному УЭС.

Одним из последних достижений в области электромагнитных методов является многокомпонентный индукционный каротаж. Зонд Rt Scanner компании «Schlumberger», 3DeX («Baker Hughes» [Simultaneous determination..., 2003]) и их конструктивные аналоги позволяют не только решать задачу определения параметров анизотропии УЭС в трансверсально-изотропной постановке, но и восстанавливать полный тензор электропроводности благодаря наличию групп приемных катушек со взаимно ортогональными магнитными моментами и катушки, генерирующей трехмерный сигнал [Трехмерный индукционный..., 2008]. Идеологическими аналогами являются приборы, в которых используются наклонные генераторные и приемные катушки [New directional..., 2005; Vittar, 2011]. Достоинствами подхода являются высокая чувствительность измеряемых сигналов к параметрам анизотропии и возможность извлечения из данных большого количества уникальной информации о сложнопостроенной среде, а очевидными недостатками – чрезвычайно дороговизна аппаратуры и вычислительная сложность обработки данных.

На сегодняшний день именно многокомпонентный индукционный каротаж является общепринятым стандартом оценки анизотропии УЭС как в вертикальных, так и в

наклонных скважинах. Алгоритмы моделирования и методики интерпретации этих измерений активно развиваются большим количеством специалистов [*Simultaneous determination...*, 2003; Davydycheva, Druskin, Habashy, 2003; *Determining formation...*, 2004; Georgi, Schoen, Rabinovich, 2008; Davydycheva, Frenkel, 2010; Davydycheva, Wang, 2011; Wang, Abubakar, Allen, 2018]. Большинство продвинутых алгоритмов обработки сводятся к разбиению среды на пласты с постоянными свойствами и нахождению для каждого пласта компонент тензора электропроводности, наилучшим образом удовлетворяющего измеренным данным путем минимизации функционала невязки. Далее нахождением ориентации главных осей тензора определяется угол падения слоистости. Алгоритмы различаются степенью и способом учета влияния на измеряемые сигналы вмещающих пород, скважины, положения в ней прибора, проникновения бурового раствора в пласт и т.д.

Интересным является факт, что несмотря на наличие в приборах катушек, ориентированных по всем трем осям, результатом инверсии данных практически во всех рассмотренных алгоритмах являются кривые горизонтального и вертикального УЭС: электропроводность в горизонтальной плоскости считается не зависящей от направления. Моделированию сигналов многокомпонентного каротажа в средах с двухосной анизотропией посвящено несколько из рассмотренных работ [Davydycheva, Druskin, Habashy, 2003, 2003; Georgi, Schoen, Rabinovich, 2008; Davydycheva, Wang, 2011; Wang, Abubakar, Allen, 2018], однако лишь в одной предпринята попытка независимого восстановления компонент УЭС в горизонтальной плоскости [Georgi, Schoen, Rabinovich, 2008]. Сами авторы связывают это со сложностью и неоднозначностью решения обратной задачи в такой постановке, а также с отсутствием петрофизических моделей, учитывающих двухосную анизотропию.

При промышленном применении приборов очень большую роль играет экономическая целесообразность. В настоящее время, в условиях нестабильных цен на нефть, компании стремятся сократить издержки. Сервисные работы зарубежными приборами многокомпонентного индукционного каротажа очень дорогостоящи, а отечественных приборов пока не существует. Поэтому в России многокомпонентный индукционный каротаж применяется редко. К счастью, существуют и другие пути решения проблемы определения параметров электрической анизотропии: в настоящее время происходит активное развитие зондов электромагнитного каротажа с тороидальными катушками и установок

дипольного каротажа, которые являются более дешевой альтернативой дорогостоящим системам многокомпонентного индукционного каротажа.

Идея применения в скважине дипольной установки не нова, первым предложил использовать такие зонды еще в 1941 году Л.М. Альпин [Альпин, 1941]. На сегодняшний день существуют патенты и научные работы, посвященные различным дипольным зондам [Табаровский, Дашевский, 1979; Дашевский, Суродина, Эпов, 2002], однако примеров практической реализации пока что очень мало. Одна из главных причин этого – необходимость расположения в скважине четырех электродов, поэтому на стандартном трехжильном кабеле выполнить измерения дипольным зондом невозможно. С появлением семижильных кабелей и развитием автономных вариантов зондов работа в этом направлении возобновилась [Каринский, Кауркин, 2013; Кауркин, 2015].

Активно ведется работа по разработке зондов с тороидальными катушками: с середины прошлого века предложено большое количество зондов на основе тороидальных катушек как зарубежными исследователями [Arps, 1967; *Well logging...*, 1993; Gianzero, Bittar, 2007], так и отечественными.

Среди работ отечественных ученых выделяются перспективная отечественная зондирующая система ZET [Устройство для измерения..., 2014], которая обладает высокими разрешающей способностью и чувствительностью к анизотропии. Прибор реализован аппаратно и успешно прошел скважинные испытания [Новый электромагнитный..., 2018]. Параллельно с испытанием аппаратуры разрабатываются и способы моделирования и интерпретации сигналов этого прибора [Математическое обоснование..., 2018; Алгоритмы обработки..., 2019], что в совокупности позволяет надеяться на включение метода в используемый комплекс ГИС в будущем. Также хотелось бы выделить теоретические работы группы А.Д. Каринского, под руководством которого проводятся исследования дипольных зондов и зондов с тороидальными катушками различных конфигураций как на основе численного моделирования [Karinski, Mousatov, 2001; Karinski, Mousatov, 2002; Каринский, 2003], так и лабораторных экспериментов [Кауркин, 2015].

Так или иначе, несмотря на разработку исследователями и конструкторами новых приборов, на сегодняшний день в России единственным широко применяемым на практике методом электрокаротажа, чувствительным к вертикальному сопротивлению в вертикальных скважинах, по-прежнему является БКЗ. Исключительность этого метода за-

ключается в том, что он входит в России в комплекс обязательного каротажа и применяется при исследовании большинства пробуренных на территории страны скважин [Техническая инструкция..., 2001]. Также метод широко применялся в СССР, что обуславливает наличие большого количества архивных материалов, доступных для обработки, в том числе и из давно закрытых скважин. Таким образом, на некоторых площадях он является единственной возможностью для фундаментальных исследований анизотропии УЭС без проведения дорогостоящих измерений или даже бурения.

1.2. Согласование разночастотных измерений: учет влияния диэлектрической проницаемости

Постановка задачи согласования измерений каротажа на постоянном и переменном токе возникла в середине прошлого века с появлением скважинных приборов с индукционным способом возбуждения геологической среды. Последующее их развитие с расширением диапазона частот от первых десятков килогерц до гигагерц лишь повысило её остроту: оказалось, что измеряемые электрическое сопротивление и, особенно, диэлектрическая проницаемость образцов пород могут существенно зависеть от частоты приложенного поля, что связано с неоднородным строением горных пород на микроуровне. Эта частотная зависимость известна достаточно давно и активно исследуется отечественными и зарубежными учеными с начала 70-х годов [Брылкин, Дубман, 1972; Талалов, Даев, 1996; Garrouch, 2001], однако единого подхода к описанию процессов, происходящих в гетерогенной среде, возбуждаемой переменным полем, сформировано не было. На сегодняшний день существует множество равноправных математических моделей, в той или иной степени отвечающих представлениям о реальности. Большинство из них являются по своей сути формулами смешения материалов с разными электрическими свойствами, позволяющие при заданных частотах вычислить эффективные электрические характеристики смеси по характеристикам их составляющих [Geometrical model..., 1988; De Lima, Sharma, 1992; Garrouch, 1999; Эпов, Савин, Миронов, 2012].

Физически наличие частотной дисперсии свойств горных пород обусловлено несколькими механизмами, причем вклад каждого из них в суммарную диэлектрическую проницаемость на разных частотах весьма различен. Наиболее существенными из всех механизмов являются электронная поляризация, ориентация полярных молекул, поляризация на поверхности контакта твердого тела и электролита и образование двойных слоев

ионов вследствие формирования собственных электрических зарядов на поверхности твердых тел, помещенных в электролит (эффект Максвелла–Вагнера).

Наиболее интересным с геофизической точки зрения механизмом является эффект Максвелла–Вагнера, так как вклад этого вида поляризации при частотах возбуждающего поля, применяемых в традиционной геофизической аппаратуре, наиболее существенен [Левицкая, Ворсина, 1988]. Этот эффект возникает в породах с изолированными порами или вкраплениями проводящих минералов. В таких породах положительные ионы проводящих включений перемещаются по полю, а отрицательные – в противоположном направлении и задерживаются в пределах проводящих включений у межфазной поверхности. В результате описанного процесса частицы поляризуются и приобретают дипольный момент. С помощью различных математических моделей эффект поддается численной оценке, способам расчетов посвящены работы [Губатенко, 1991; *Modeling of Maxwell-Wagner...*, 2009] и многие другие. При этом тип кривой поляризации может быть связан с насыщением породы-коллектора. Например, в работе [Ельцов, Доровский, Гапеев, 2014] авторы показывают, что диэлектрический спектр нефтеводонасыщенной среды в акустическом диапазоне электромагнитного поля описывается поляризационной кривой Гаврильяка–Негами, имеющей асимметричный вид в областях малых и высоких значений частот, в то время как водонасыщенная – симметричной кривой Коул–Коул. Авторы предлагают новый способ оценки пористости, основанный на анализе характеристик поляризационной кривой, однако для этого необходимы измерения во всем акустическом диапазоне частот.

В контексте согласования данных БКЗ и ВЭМКЗ представляется важным упомянуть подходы, применяемые для зарубежных зондов, используемых для каротажа в процессе бурения (LWD), поскольку именно эти приборы наиболее близки по используемым частотам к зондам ВЭМКЗ. Традиционно на Западе в процессе бурения используются два электромагнитных зонда частотой 400 или 500 кГц и 2 МГц. Еще на этапе внедрения аппаратуры было замечено, что определяемое по резистивной модели УЭС отложений зачастую не совпадает не только с измерениями на постоянном токе, но и даже между разночастотными зондами LWD [Evanse, 1991]. Очень быстро стало ясно, что эти изменения вызваны увеличенным по сравнению с низкочастотным индукционным каротажем вкладом диэлектрической проницаемости в измеряемые сигналы [Jackson, Heys, 1994]. По-

вышенная чувствительность приборов к диэлектрической проницаемости вынудила исследователей искать способы приведения определяемых параметров среды к измерениям на постоянном токе, так как именно для них разработаны основные петрофизические зависимости. Наиболее простым и наименее точным решением стало применение корреляционной зависимости между УЭС и ДП отложений. При этом применяемые разными компаниями формулы существенно различаются [Аксельрод, 2007]. Понятно, что такой обобщающий подход не может не вносить дополнительных погрешностей в определяемые значения УЭС, так как подразумевает одинаковую связь УЭС с ДП для всех типов пород, что не всегда обосновано.

Наиболее правильным с методической стороны представляется независимое определение электропроводности и диэлектрической проницаемости на заданной частоте при совместной интерпретации измерений разности фаз и отношения амплитуд. Такой подход разработан как для зарубежных LWD систем [*Dielectric-independent...*, 1999; Haugland, 2001; *Identifying potential...*, 2008], так и для отечественной аппаратуры ВЭМКЗ [New Tool..., 2010; Пудова, Ельцов, Карчевский, 2010; *Электрофизические свойства...*, 2019].

Несмотря на очевидные преимущества одновременного измерения разности фаз и отношения амплитуд, большая часть используемых российских приборов высокочастотного каротажа позволяет измерять только разность фаз. В таких условиях возможен компромиссный подход, основанный на том, что электропроводность горных пород гораздо меньше зависит от частоты, чем диэлектрическая проницаемость [Талалов, Даев, 2003; Аксельрод, 2007]. В предположении об отсутствии частотной дисперсии электропроводности, можно определить УЭС среды и диэлектрическую проницаемость, имея измерения на постоянном токе и измерения разности фаз на заданных частотах. Такой подход используется, например, в работе [Zhang, Yu, Liu, 2012] для многокомпонентного индукционного каротажа, работе [Misra, Tathed, 2017] для лабораторных исследований керна, работах [Петров, Сухорукова, Нечаев, 2017b; Petrov, 2017; Петров, Сухорукова, Нечаев, 2019; *Частотная дисперсия...*, 2019] и системе интерпретации EMF Pro [*Новый аппаратный...*, 2010] для согласования измерений БКЗ и ВЭМКЗ.

Таким образом, на данный момент нет устоявшегося подхода как к описанию отклика геологической среды, возбуждаемой высокочастотным полем, так и к учету влияния диэлектрической проницаемости на измерения индукционными зондами. Выбор ис-

пользуемого в данной работе приближения обусловлен не желанием диссертанта, а объективным доминированием на российском рынке систем высокочастотного индукционного каротажа, основанных на измерении только разности фаз.

1.3. Современное состояние моделирования и инверсии сигналов БКЗ и ВЭМКЗ

Развитием инструментов моделирования и инверсии сигналов БКЗ в анизотропных средах занималось множество советских и российских исследователей. Решения прямых задач для зондов БКЗ в анизотропных одномерных средах представлены, например, в работах [Дахнов, 1981; Сидорчук, Чаадаев, 1972; Табаровский, Дашевский, 1979]. Решатели прямых задач БКЗ в двумерных осесимметричных анизотропных средах блочного строения представлены в работах [Каринский, 2006; Каринский, Даев, 2011];

Для количественной интерпретации данных БКЗ в изотропных средах с небольшой толщиной пластов предложены методические приемы и созданы алгоритмы решения обратной задачи на основе двумерных осесимметричных моделей среды [Друскин, 1984; Друскин, Книжнерман, 1987; Кнеллер, Потапов, 2010].

Наиболее активно развитием методов численного моделирования сигналов БКЗ и ВЭМКЗ в сложнопостроенных средах и методик их интерпретации последние годы занималась группа исследователей из ИНГГ СО РАН. Этой группой разработано большое количество алгоритмов моделирования сигналов БКЗ и ВЭМКЗ в двумерных изотропных и анизотропных средах, основанных на конечно-разностных, конечно-элементных и приближенных алгоритмах [Шурина, Нечаева, Нечаев, 2007; Суродина, Эпов, 2013; *Совместная численная...*, 2017], в том числе, с использованием GPU [Глинских, Эпов, Лабутин, 2008; Суродина, 2015; Glinskikh, Dudaev, Nechaev, 2017] и нестандартной параметризацией среды, например, с помощью непрерывных функций [Глинских, Эпов, 2009a; Глинских, Эпов, 2009b; Глинских, Никитенко, Эпов, 2013]. На основе алгоритмов двумерного моделирования разработаны различные программы для инверсии практических сигналов БКЗ и ВЭМКЗ как по отдельности [Effective Electromagnetic..., 2013; *Численное моделирование...*, 2015; Нечаев, Глинских, 2017; Петров, Нечаев, Сухорукова, 2019], так и совместно [*Совместная численная...*, 2017; Петров, Нечаев, Сухорукова, 2018].

Также этими же специалистами разрабатываются алгоритмы моделирования сигналов БКЗ и ВЭМКЗ в несимметричных моделях, например, при отклонении прибора от

оси скважины и наклонном пересечении скважиной геоэлектрических границ [Эпов, Шурина, Нечаев, 2007; Nikitenko, Itskovich, Seryakov, 2016; Суродина, Эпов, 2016; Нечаев, Глинских, 2018].

Среди последних исследований по моделированию и инверсии сигналов ВЭМКЗ, проводимых специалистами вне ИНГГ СО РАН, выделяется работа [Кошкина, 2016], в которой автор предлагает эффективный конечно-элементный решатель прямой задачи ВЭМКЗ в двумерных осесимметричных средах и рассматривает нетрадиционный подход к инверсии данных скважинной электротомии, основанный на использовании так называемых «ячеистых» структур, сравнивая его с традиционной геометрической инверсией.

Таким образом, в настоящее время существует большое количество алгоритмов двумерного моделирования сигналов БКЗ и ВЭМКЗ. Однако практически все публикации, посвящённые двумерной инверсии практических данных этих методов, относятся к разряду исследовательских работ и ограничиваются примерами обработки очень маленьких интервалов. Это связано с ограничениями алгоритмов как моделирования сигналов, так и систем инверсии. К наиболее часто встречающимся ограничениям относятся: недостаточное быстродействие, невозможность учета влияния на сигналы диэлектрической проницаемости и анизотропии УЭС, резкое падение точности при высоком контрасте УЭС в разных блоках модели и т.д. Задачу двумерной инверсии дополнительно осложняет отсутствие в методе БКЗ фокусировки тока. Трехэлектродные градиент-зонды дают очень сложную форму сигналов при пересечении горизонтальных границ, которая зависит от свойств разреза на значительном расстоянии от точки измерения. Из-за этого функционал невязки характеризуется большим числом локальных минимумов в моделях, соответствующих по сложности реальной среде.

Из-за описанных выше причин на сегодняшний день выбор программного обеспечения для построения эффективной методики интерпретации сигналов БКЗ и ВЭМКЗ с определением вертикального УЭС сложнопостроенных отложений крайне ограничен. Предлагаемая методика основана на использовании новейшего ПО, разработанного О.В. Нечаевым (ИНГГ СО РАН), которое по возможностям и быстродействию превосходит все другие известные автору решения. Детально используемое ПО будет рассмотрено в первом разделе следующей главы.

1.4. 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, подавляющее 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 на основе двумерной инверсии не имеет опубликованных аналогов.

Глава 2

РАСЧЕТНЫЕ СИГНАЛЫ БОКОВОГО КАРОТАЖНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И ИХ ИНВЕРСИЯ В КЛАССЕ ДВУМЕРНЫХ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

2.1. Программное обеспечение интерпретации данных БКЗ и ВЭМКЗ

Предлагаемая в работе методика количественной интерпретации сигналов БКЗ и ВЭМКЗ основана на использовании конечно-элементных алгоритмов моделирования сигналов гальванического и индукционного каротажа в двумерной осесимметричной среде комплекса AlondraWL. Автор алгоритмов – к.т.н. Нечаев О.В., с.н.с. ИНГГ СО РАН.

Для обоснования методики также использовались алгоритмы моделирования сигналов БКЗ и ВЭМКЗ в трехмерных моделях сред [Нечаев, Глинских, 2018] и численно-аналитический алгоритм моделирования сигналов ВЭМКЗ в наклонных скважинах Vikmag [*Численное моделирование...*, 2014]. Все используемые алгоритмы позволяют моделировать сигналы при пересечении анизотропных пластов. Конечно-элементные алгоритмы комплекса AlondraWL позволяют учитывать при моделировании влияние на измеряемые сигналы неровностей стенки скважины, вытеснение бурового раствора непроводящим корпусом прибора, его положение в скважине и сложное радиальное строение среды.

Решение прямых задач БКЗ и ВЭМКЗ в двумерной осесимметричной среде

Лежащая в основе предлагаемой методики программа для моделирования сигналов БКЗ пакета AlondraWL позволяет решать прямые задачи бокового каротажного зондирования в двумерной осесимметричной трансверсально-изотропной среде, когда геоэлектрическая модель состоит из однородных участков, разделенных цилиндрическими и горизонтальными границами, а каротажный прибор располагается на оси скважины [Петров, Нечаев, Сухорукова, 2018]. Положительными особенностями алгоритма являются возможность учитывать при моделировании сигналов конструктивные особенности корпуса прибора, данные кавернометрии и резистивиметрии.

Геоэлектрическая модель среды описывается при помощи функции $\rho(\vec{W}, \vec{x})$, задающей зависимость УЭС от пространственных координат x , и вектора параметров W . Последний содержит значения УЭС пластов и измененных зон, а также ширину зон и положение горизонтальных границ. Диаметр скважины и УЭС бурового раствора напротив каждого пласта, а также диаметр корпуса зонда полагаются фиксированными.

Результатом зондирования является кажущееся сопротивление, которое вычисляется по формуле:

$$\rho_k = k \frac{\varphi_M - \varphi_N}{I_A},$$

где ρ_k – кажущееся УЭС; k – коэффициент зонда, определяемый расстояниями между электродами; φ_M и φ_N – потенциалы на измерительных электродах; I_A – сила тока, стекающего с токового электрода. Распределение электрического потенциала в области моделирования описывается следующей краевой задачей:

$$-\operatorname{div} \sigma \operatorname{grad} \varphi = 0, \quad (1)$$

$$\varphi|_{\Gamma_0} = 0, \quad (2)$$

$$\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial \vec{n}} \Big|_{\Gamma_1} = 0, \quad (3)$$

$$\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial \vec{n}} \Big|_{\Gamma_1^A} = j_0^A, \quad (4)$$

где φ – потенциал напряженности электрического поля; σ – тензор удельной электрической проводимости; j_0^A – плотность тока с токового электрода; Γ_0 – внешняя граница области, на которой напряженность электрического поля считается близкой к нулю; Γ_1 – поверхность непроводящего корпуса зонда; Γ_1^A – поверхность токового электрода. Тензор удельной электропроводности имеет диагональный вид:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_h & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_h & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_v \end{bmatrix}.$$

Здесь σ_h – значение электропроводности в горизонтальной плоскости, σ_v – в вертикальном направлении. Область моделирования обладает осевой симметрией. В цилиндрической системе координат для исходной краевой задачи (1) – (4) формулируется следующая вариационная постановка: найти $\varphi \in H_0^1(\Omega)$ такое, что $\forall \psi \in H_0^1(\Omega)$ выполняется

$$\int_{\Omega} \left[\sigma_h \frac{\partial \varphi}{\partial r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \sigma_v \frac{\partial \varphi}{\partial z} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right] r dr dz = \int_{\Gamma_1^A} j_0^A \psi d\Gamma .$$

Для получения дискретного аналога данной вариационной постановки используется метод конечных элементов [Шайдуров, 1989], а затем разложение Холецкого для решения результирующей системы линейных алгебраических уравнений.

Программа для моделирования сигналов ВЭМКЗ в осесимметричной среде организована схожим образом. Зонд ВИКИЗ измеряет разность фаз э.д.с.:

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1,$$

где ϕ_1 и ϕ_2 – это фазы э.д.с., наведенные в первой и второй измерительных катушках. Для вычисления э.д.с. необходимо знать распределение в катушках электрического поля. Поведение электрического поля в области моделирования описывается системой уравнений Максвелла. Переменный ток в генераторной катушке изменяется во времени t по закону $I = I_0 e^{i\omega t}$. Здесь I_0 – амплитуда тока, ω – его циклическая частота. В этом случае уравнения Максвелла имеют следующий вид [Эпов, Шурина, Нечаев, 2007]:

$$\text{rot } \mathbf{E} + i\omega \mathbf{B} = 0, \quad (\text{I})$$

$$\text{rot } \mathbf{H} - i\omega \mathbf{D} - \mathbf{J} = \mathbf{J}_0, \quad (\text{II})$$

$$\text{div } \mathbf{D} = \rho, \quad (\text{III})$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0, \text{ div } \mathbf{J} + i\omega \rho = 0, \quad (\text{IV})$$

где \mathbf{E} , \mathbf{H} – напряжённость электрического и магнитного полей, \mathbf{D} , \mathbf{B} – электрическая и магнитная индукции, \mathbf{J} – плотность тока, \mathbf{J}_0 – плотность тока в источнике, ρ – плотность электрических зарядов, ε , μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости, σ – электрическая проводимость, i – мнимая единица.

Уравнения состояния имеют вид:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}, \quad (\text{V})$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad (\text{VI})$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}. \quad (\text{VII})$$

При этом полагается, что всегда выполняется условие разрешимости системы уравнений Максвелла $\operatorname{div} \mathbf{J}_0 = 0$.

Исключая из (I), (II) переменную \mathbf{H} , можно перейти к векторному уравнению Гельмгольца относительно электрического поля \mathbf{E} :

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = -i\omega \mathbf{J}_0, \quad (\text{VIII})$$

где $k^2 = i\omega\sigma - \omega^2\varepsilon$ – квадрат волнового числа.

С учетом радиальной симметрии среды и краевого условия $E \times n|_{\Gamma_0} = 0$, производится переход к вариационной постановке: найти $E_\phi \in H_0^1(\Omega)$ такое, что $\forall \psi \in H_0^1(\Omega)$ выполняется

$$\int_{\Omega} \frac{1}{\mu} \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial(r E_\phi)}{\partial r} \frac{\partial(r \psi)}{\partial r} + \frac{\partial E_\phi}{\partial z} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right] r dr dz + \int_{\Omega} (i\omega\sigma_h - \omega^2\varepsilon) E_\phi r dr dz = \int_{\Omega} j_0 \psi r dr dz, \quad ,$$

где E_ϕ – угловая компонента напряженности электрического поля (остальные компоненты поля равны нулю). Эта вариационная задача также решается методом конечных элементов и с помощью разложения Холецкого [Петров, Нечаев, Сухорукова, 2018].

Алгоритмы реализованы на языке C++. Модель среды описывается произвольным количеством слоев и радиальных зон с возможностью учета неровностей стенки скважины и вытеснения бурового раствора корпусом прибора. Электрофизические свойства каждого блока среды считаются постоянными и описываются вертикальным и горизонтальным УЭС и диэлектрической проницаемостью. Алгоритмы неоднократно совершенствовались. На данный момент поддерживаются параллельные вычисления, настройки точности расчета, размеров расчётного бака и др.

В рамках работы по разработке методики алгоритмы протестированы на большом количестве реалистичных геоэлектрических моделей осадочных отложений Западной Сибири [Петров, Нечаев, Сухорукова, 2018] и верифицированы сравнением с другими алгоритмами моделирования, разработанными в ИНГГ СО РАН. Установлено, что алгоритмы обеспечивают высокую производительность вычислений и точность расчета. Возможность многопоточных вычислений, учета диэлектрической проницаемости и гибкие настройки параметров моделирования позволяют использовать их как надежную основу для алгоритмов инверсии.

Решение обратных задач БКЗ и ВЭМКЗ

На основе алгоритмов моделирования Нечаевым О.В. разработана система инверсии сигналов БКЗ и ВИКИЗ/ВЭМКЗ в параметры осесимметричной геоэлектрической модели. Поддерживается инверсия произвольного набора зондов БКЗ и ВИКИЗ/ВЭМКЗ, как по отдельности, так и совместно.

Обратная задача определения параметров модели околоскважинного пространства формулируется как задача минимизации целевой функции:

$$f(\vec{x}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i \frac{|f_i - f_i^a(\vec{x})|}{f_i},$$

где \vec{x} – вектор параметров размерности m , задающий электрофизические свойства и геометрические характеристики модели околоскважинной среды; n – число измерений, используемых при каротаже (число зондов, умноженное на число точек измерения), f_i – измеренный сигнал (кажущееся сопротивление или разность фаз), $f_i^a(\vec{x})$ – сигнал, рассчитанный для модели, заданной вектором \vec{x} , k_i – весовой коэффициент зонда.

Отсутствие в методе БКЗ фокусировки тока очень сильно осложняет двумерную инверсию сигналов. Асимметричные трехэлектродные градиент-зонды дают очень сложную форму сигналов при пересечении горизонтальных границ, а сигналы зависят от свойств разреза на значительном расстоянии от точки измерения. Из-за этого функционал невязки характеризуется большим числом локальных минимумов в моделях, соответствующих по сложности реальной среде. В таких условиях простой направленный перебор параметров часто не способен привести к удовлетворительному решению обратной задачи.

Для решения этой проблемы программная реализация алгоритма инверсии предлагает два метода оптимизации: модифицированный покоординатный спуск [Нечаев, Глинских, 2017] и новейший метод DFO-LS [*Improving the Flexibility...*, 2018]. Реализованы четыре различных режима оконной работы инверсии, ускоряющие работу с большими моделями, и гибкая система ограничений модельных параметров, позволяющая учитывать априорную информацию о разрезе и управлять процессом инверсии.

Перечисленные особенности алгоритмов и разработанные методические приемы инверсии позволяют восстанавливать распределение УЭС по данным БКЗ и ВИКИЗ даже на интервалах сложного переслаивания относительно тонких пластов. Следует отметить,

что с развитием методики программы постоянно модифицируются под возрастающие требования: увеличивается быстродействие прямых задач, совершенствуется система ограничителей параметров модели, добавляются новые режимы работы алгоритмов оптимизации и т.д.

Дополнительное программное обеспечение

Помимо основных алгоритмов, решающих прямые и обратные задачи БКЗ и ВЭМКЗ в двумерной осесимметричной среде, были использованы другие программы, необходимые для научного обоснования предлагаемой методики.

1. Для оценки влияния нарушения осевой симметрии среды на восстанавливаемые параметры геоэлектрической модели использовались конечно-элементные алгоритмы для моделирования сигналов БКЗ и ВЭМКЗ в трехмерных моделях сред [Нечаев, Глинских, 2018]. По своему устройству алгоритмы аналогичны программам для моделирования в двумерной осесимметричной среде, однако позволяют учитывать смещение прибора с оси скважины и наклонное пересечение скважиной геоэлектрических границ.

2. В связи с крайне высокой ресурсоемкостью численных алгоритмов для моделирования сигналов БКЗ и ВЭМКЗ в трехмерных моделях сред, для ускорения работы также использовался численно-аналитический алгоритм моделирования сигналов ВЭМКЗ в наклонных скважинах *Vikmag* [Численное моделирование..., 2014]. Алгоритм не позволяет учитывать радиальную неоднородность среды, но обеспечивает очень существенный выигрыш в скорости расчета сигналов в моделях без сложного радиального строения.

3. Программа для численного моделирования чувствительности сигналов градиент-зондов к горизонтальному и вертикальному УЭС пластов модели, которая использовалась для обоснования возможности восстановления вертикального УЭС в разных условиях. Автор – Нечаев О.В.

4. Программа для численного моделирования сигналов БКЗ в осесимметричной среде с учетом металлических элементов корпуса прибора СКЛ-76, которая использовалась для оценки влияния утечки тока на показания длинных зондов БКЗ при переходе к высокоомным отложениям. Автор – Нечаев О.В.

5. Программа для оценки устойчивости результатов инверсии данных гальванических и индукционных зондирований на основе статистического моделирования. Алгоритм основан на решении большого количества обратных задач от различных стартовых

моделей в автоматическом режиме и статистической оценке результатов. Автор – диссертант, подробно алгоритм и результаты анализа рассмотрены в пункте 2.4 этой главы.

6. Программа автоматизированной расстановки границ пластов по данным БКЗ на основе искусственной нейронной сети (разработана диссертантом совместно с Г.Н. Логиновым, подробно в пункте 2 главы 3).

2.2. Геоэлектрические модели осадочных отложений Западной Сибири

Разрезы осадочных отложений на территории Широкого Приобья Западной Сибири большей частью представлены песчаными и глинистыми отложениями с уплотненными карбонатизацией прослоями. В результате анализа практических материалов в работах [Сухорукова, 2018; *Геоэлектрические модели...*, 2019] по комплексу данных ГИС, включающему методы радиометрического каротажа, потенциала самополяризации и электрометрических методов на постоянном и переменном токе, выявлены основные типы геоэлектрических моделей пластов терригенных отложений Западной Сибири.

Глинистые отложения. Обычно представляют собой однородный пласт без проникновения, характеризуемый тремя электрическими параметрами: горизонтальным и вертикальным сопротивлениями (ρ_h, ρ_v) и эффективной относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_{\text{эфф}}$. В некоторых случаях эффективное значение ε может зависеть от частоты возбуждаемого в среде электромагнитного поля. При невысоком значении УЭС характерная для глинистых отложений микроанизотропия влияет на сигналы коротких зондов БКЗ. В зависимости от минерального состава и глубины их УЭС составляет от 4–5 Ом·м до 7 Ом·м, на глубине ниже 2800–3000 м – 8–9 Ом·м, частично карбонатизированные или сильно уплотненные аргиллиты – 12–20 Ом·м.

Проницаемые песчаные и песчано-глинистые отложения. Песчаные пласты-коллекторы характеризуются толщиной от долей метра до нескольких десятков метров. Насыщение песчаников в интервале глубин 800–3000 м преимущественно водное. Их УЭС меньше, чем у глинистых отложений на небольших глубинах (до 2000–2500 м). Нефтенасыщенные пласты характеризуются относительно высоким УЭС (30–300 Ом·м). Часто встречаются пласты со смешанным насыщением промежуточного УЭС (5–15–30 Ом·м). Их главным признаком является изменение нефтенасыщения от относительно высокого в верхней части до относительно низкого в нижней.

При минерализации пластовых вод, типичной для Западной Сибири (15–20 г/л, редко 8–9 г/л), УЭС водонасыщенного песчаника в среднем составляет от 1.5–2.0 Ом·м (глубины 1000–2000 м) до 4.0–5.0 Ом·м (глубины 2500–3000 м). УЭС от 5–7 Ом·м до 15–20 Ом·м (в зависимости от пористости и минерализации пластовой воды) – нефтеводонасыщенные песчаники с разным соотношением содержаний воды и нефти. УЭС 20–30 Ом·м – нефтенасыщенные песчаники с пластовой водой, находящейся преимущественно в связанном состоянии. Диэлектрическая проницаемость на частотах ВЭМКЗ не выявляется при невысоких УЭС песчаных пластов. Тем не менее, УЭС нефтенасыщенных песчаников может быть и выше, например, в юрских уплотненных коллекторах (50–100 Ом·м).

При бурении в осадочных отложениях Западной Сибири на пресном глинистом растворе без активных добавок, если гидростатическое давление бурового раствора превышает пластовое, по комплексу ВЭМКЗ + БКЗ обычно определяется модель песчаного коллектора, включающая прискважинные зоны, измененные фильтрацией бурового раствора. Значения их УЭС и толщины зависят от свойств пласта, условий вскрытия, времени между бурением и каротажем, а также проведенных в этот временной интервал дополнительных операций в скважине. В общем случае, в водонасыщенном песчанике наблюдается зона проникновения (ЗП), насыщенная фильтратом бурового раствора, с повышенным относительно пласта УЭС, в нефтенасыщенном песчанике – ЗП с УЭС, пониженным относительно пласта. В песчанике со смешанным насыщением (нефтью и пластовой водой) кроме ЗП выделяется еще одна измененная при бурении зона – зона скопления пластовой минерализованной воды или окаймляющая зона (ОЗ). Из-за более высокой, чем у фильтрата бурового раствора, минерализации пластовой воды УЭС ОЗ ниже, чем УЭС ЗП и пласта. Через 10–20 часов после вскрытия пласта по данным электрокаротажа определяются следующие характерные параметры измененных зон: толщина ЗП 0.3–0.5 м, УЭС от 12 до 30 Ом·м; толщина ОЗ 0.2–0.4 м, УЭС от 3–5 до 7–8 Ом·м.

При бурении на биополимерном минерализованном растворе при обычных для бурения эксплуатационных скважин сроках каротажа (0.5–1.0 суток после бурения) наблюдается одна измененная зона с УЭС около 1–2 Ом·м при толщине 0.15–0.30 м. Примерно через 3–4 недели после вскрытия пласта наблюдается измененная зона с УЭС около 0.5 Ом·м и толщиной около 0.3–0.4 м.

Непроницаемые неглинистые отложения. Обычно характеризуются небольшими толщинами, выделяются по высоким значениям сигнала нейтронного каротажа и кажущегося УЭС. Плотные карбонатизированные песчаники образуются в кровельной и подошвенной частях или в месте бывшего водо-нефтяного контакта (ВНК) внутри песчаного пласта. Они сильно изменяют сигналы БКЗ и повышают кажущееся сопротивление ВЭМКЗ рядом с собой. Характерные толщины варьируются от 0.3 до 2.0 м, УЭС изменяются в широком диапазоне от 20 до 500 Ом·м. В этих пластах, как правило, отсутствуют изменения, связанные с проникновением фильтрата бурового раствора. Без применения двумерной инверсии по данным ГИС корректно определяются только границы такого пласта, УЭС оценивается по наибольшему значению кажущегося сопротивления из всех зондов электрокаротажа (включая микрозонды, при их наличии). При высоких УЭС по данным ВЭМКЗ определяется значение $\varepsilon_{\text{эфф}}$.

Для обоснования применимости и преимущества совместной двумерной инверсии перед традиционными подходами в вычислительных экспериментах рассматривались несколько типов моделей терригенных коллекторов различного строения, приведенные на рисунке 2.2.1, и различные их комбинации.

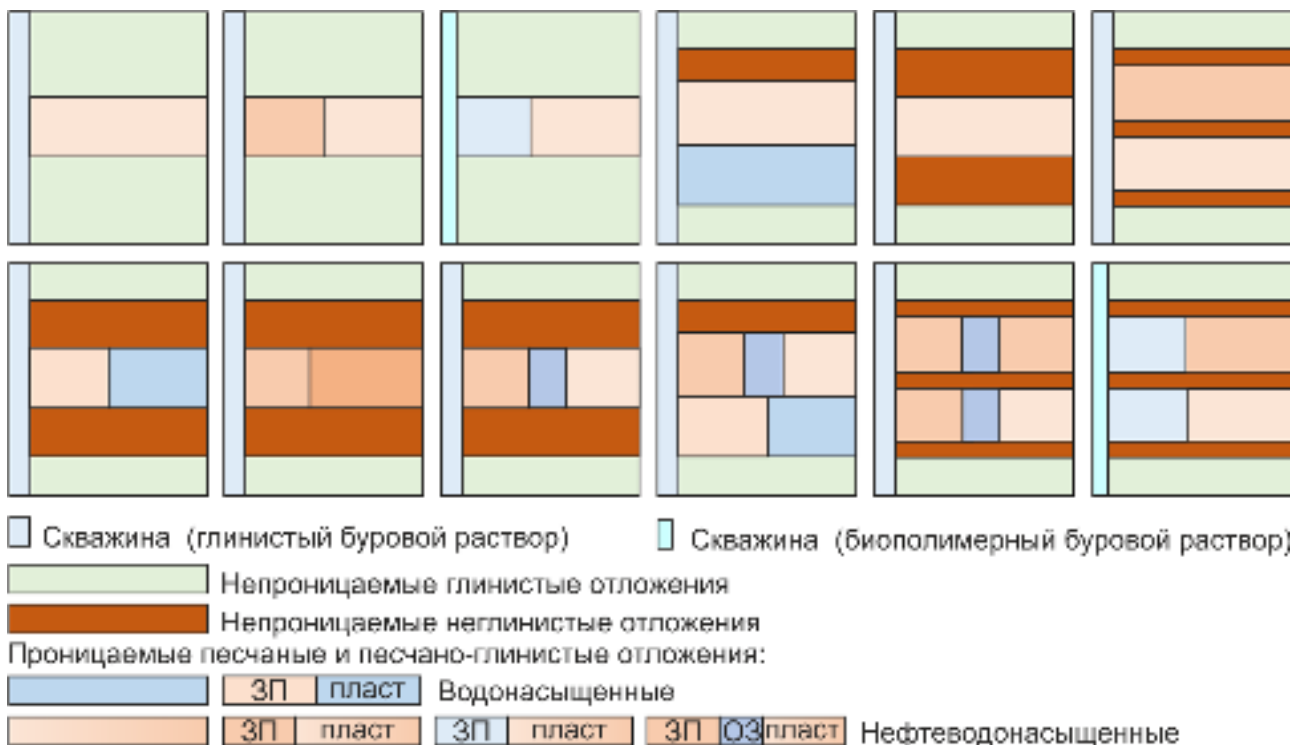


Рисунок 2.2.1 – Основные типы тестовых моделей терригенных коллекторов Западной Сибири

2.3. Сигналы электрокаротажа в изотропных и анизотропных моделях

Приводить результаты анализа сигналов во всех рассмотренных типах моделей не представляется целесообразным, поэтому рассмотрим 4 модели, наиболее наглядно демонстрирующие преимущества двумерной и совместной инверсии данных БКЗ и ВЭМКЗ. Во всех примерах рассчитываются сигналы прибора СКЛ-76 с учетом вытеснения бурового раствора непроводящим корпусом прибора (диаметр $D_{\text{прибора}} = 76$ мм). Более полный обзор моделей и сигналов (в том числе модели отложений, пробуренных с использованием биополимерного бурового раствора) приведен в работе [Comparison of the Russian..., 2020].

Характерная мощность исследуемых пластов-коллекторов, однородных по данным электрометрии, сегодня редко превышает 3 метра. Первая модель – простейший случай пересечения незатронутого проникновением нефтеводонасыщенного песчаного пласта мощностью 3 метра, перекрытого глинистыми отложениями (Рисунок 2.3.1).

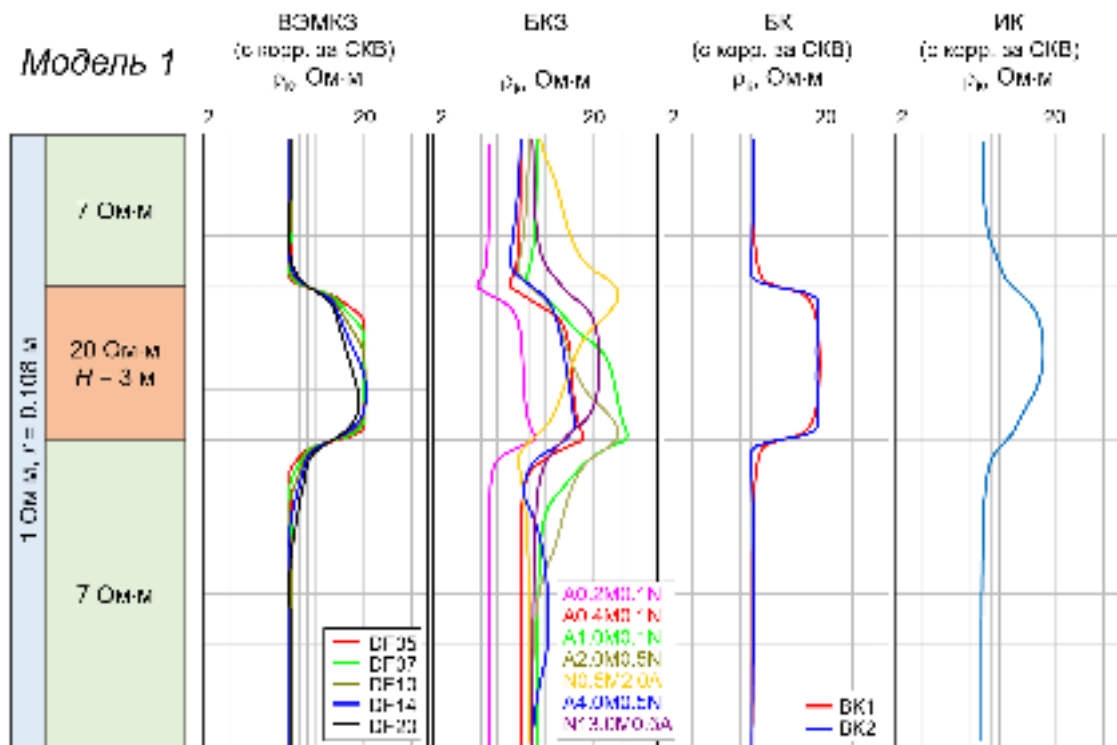


Рисунок 2.3.1 – Модель незатронутого проникновением нефтеводонасыщенного песчаного пласта, перекрытого глинистыми отложениями и рассчитанные в ней сигналы электрометрии. Значения КС для методов ВЭМКЗ, БК и ИК приведены с коррекцией влияния скважины с буровым раствором

Из приведенных на рисунке данных видно, что даже в таком простейшем случае вертикальной разрешающей способности зонда низкочастотного индукционного каротажа недостаточно для корректного расчленения разреза и точного определения УЭС пласта-коллектора. По этой причине не будем анализировать его сигналы в более сложных моделях.

Границы пласта одинаково хорошо видны на диаграммах остальных методов. Особенно хорошо границы проявлены четкими экстремумами сигналов двух коротких градиент-зондов (A0.2M0.1N и A0.4M0.1N). На значение УЭС пласта выходят диаграммы кажущегося сопротивления всех зондов ВЭМКЗ, кроме DF20 (и кроме интервала под кровлей длиной, равной длине зонда), а также диаграммы зондов БК (с небольшим занижением, 18 и 19 Ом·м для длинного и короткого зондов).

По сигналам БКЗ УЭС пластов может быть восстановлено только с помощью одномерной инверсии кривой зондирования в модели "скважина – пласт". Во вмещающих пластах по всем зондам отсчет сигналов берется на асимптотических частях диаграммы, результат инверсии – 7 Ом·м. В песчаном пласте для 3 коротких зондов отсчет берется по наиболее пологой части диаграммы, для двухметровых – по максимуму, результат инверсии 21.4 Ом·м. Несмотря на хорошую точность результата 1D инверсии, стоит отметить, что даже при мощности пласта, равной 3 метра, при заданном невысоком контрасте УЭС скважины и отложений, только сигнал зонда A0.2M0.1N в центральной части пласта показывает значение, с хорошей точностью соответствующее сигналу в модели бесконечно мощного пласта. Поэтому на практике точность одномерной инверсии очень сильно зависит от корректности процедуры снятия пластовых отсчетов, при которой следует адекватно учитывать влияние вмещающих пород. При практических измерениях настолько выдержанные по УЭС целевые объекты встречаются крайне редко, и изменение УЭС приводит к еще большему усложнению процедуры, а зачастую – и к полной невозможности снятия корректных пластовых отсчетов.

Гораздо более реалистичной в условиях Западной Сибири является модель 2 (рисунок 2.3.2). В модели представлен нефтеводонасыщенный коллектор (толщина 4.0 м), верхняя половина насыщена нефтью с водой, нижняя – водой, над коллектором – непроницаемый карбонатизированный песчаник (толщина 1.0 м), вмещающие породы (верхнее и нижнее полупространства) – глинистые (аргиллит); измененные зоны: в верхней части коллектора ЗП и ОЗ, в нижней – ЗП.

Границы пластов четко выражены в диаграммах БК, хуже – зондов DF05 и DF07, но пласты хорошо разделяются по комплексу зондов ВЭМКЗ. По диаграммам БКЗ определяется положение двух верхних границ и нижней. На УЭС верхнего пласта выходит сигнал зонда DF05 и, с занижением до 24 Ом·м, длинный зонд БК. На УЭС неизменной части коллектора выходят сигналы зондов DF14 и DF20. УЭС ЗП не достигается ни одним зондом, при этом короткие зонды ВЭМКЗ, БКЗ и БК адекватно показывают соотношение этого параметра с УЭС ОЗ и пласта в верхней и нижней частях коллектора. Снижение значений ρ_k зондами DF07 и DF10 по сравнению с остальными приводит к вогнутой кривой зондирования и свидетельствует о наличии окаймляющей зоны.

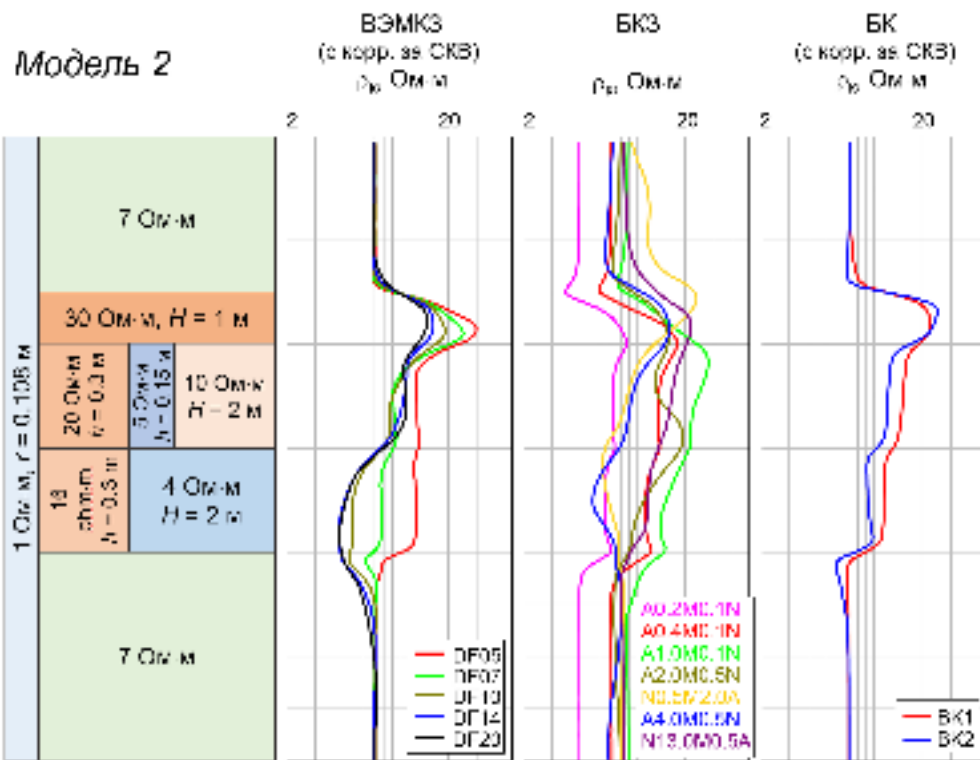


Рисунок 2.3.2 – Реалистичная модель песчаного коллектора смешанного насыщения, осложненного карбонатизацией, в глинистых вмещающих породах и рассчитанные в ней сигналы электрометрии

Наиболее информативным методом из представленных в данной модели является ВЭМКЗ. По сигналам этого метода с помощью одномерной инверсии можно как восстановить УЭС коллектора, так и оценить параметры всех измененных зон. Однако для корректного восстановления УЭС уплотненного прослоя в верхней части коллектора необ-

ходима уже двумерная инверсия. Двумерная инверсия сигналов БКЗ в этой модели позволяет уточнить положения границ, определить пластовые значения УЭС и оценить параметры зон проникновения. К окаймляющей зоне в нефтеводонасыщенном пласте сигналы БКЗ чувствительны слабо. Использование совместной инверсии БКЗ и ВЭМКЗ позволяет значительно снизить погрешности всех параметров, особенно измененных зон, по сравнению с инверсией методов по отдельности.

Естественная микроанизотропия глинистых отложений, а также тонкое переслаивание различных по электрофизическим свойствам пород, как известно, приводят к существенному искажению сигналов БКЗ. Однако для мощных пластов справедлив так называемый парадокс анизотропии, который проявляется в потере чувствительности к вертикальному УЭС с увеличением длины градиент-зонда [Kunz, Moran, 1958]. Из-за этого извлечение информации об анизотропии разреза некоторыми исследователями даже считалась невозможной [Тюркишер, 1945]. Возможность восстановления вертикального УЭС по данным БКЗ появляется при наличии в реальной среде как большого количества горизонтальных геоэлектрических границ (границы между пластами), так и вертикальной (граница скважина – пласт). Конфигурация токов в геометрически сложной анизотропной среде существенно отличается от таковой в среде изотропной.

На рисунке 2.3.3 приведены простейшая модель анизотропного пласта, перекрытого изотропными отложениями, и сигналы БКЗ, рассчитанные с учетом анизотропии и без.

Как видно из данных, представленных на рисунке, вопреки распространённому заблуждению наибольшими относительными приращениями характеризуются сигналы самого длинного зонда – А4.0М0.5N, а сигналы самых коротких (А0.2М0.1N и А0.4М0.1N), напротив, наименьшими. При этом максимумы амплитуды приращений сигналов всех зондов тяготеют к границам между пластами. С увеличением мощности анизотропного пласта максимумы амплитуды приращений существенно не изменяются (в центральной части мощных пластов появляется протяженная зона слабых приращений, соответствующих модели бесконечно мощного пласта). С уменьшением мощности анизотропного пласта форма диаграмм может существенно меняться, однако для сравнительно небольшого заданного контраста максимумы амплитуды приращений для длинных зондов остаются в пределах десятков процентов даже для прослоев толщиной менее 0.5 м [Петров, 2015].

При этом ширина области отрицательного приращения сигналов ниже подошвы анизотропного слоя определяется не его мощностью, а длиной зонда. Таким образом, именно применение двумерной инверсии сигналов обеспечивает возможность восстановления вертикального УЭС, при этом обеспечивая возможность оценки параметров даже относительно тонких пластов.

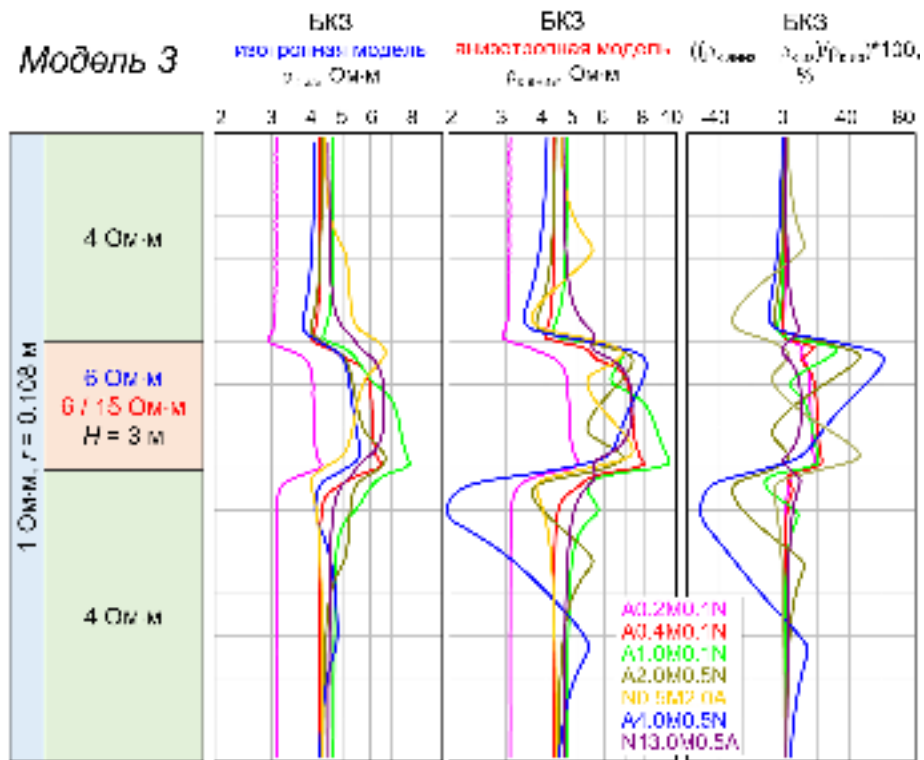


Рисунок 2.3.3 – Анизотропный пласт в изотропных вмещающих породах, сигналы БКЗ без учета анизотропии УЭС, сигналы БКЗ с учетом анизотропии УЭС и относительная разница этих сигналов. УЭС изотропного пласта 6 Ом·м, горизонтальное УЭС анизотропного пласта 6 Ом·м, вертикальное – 15 Ом·м

Помимо наиболее очевидной необходимости оценки вертикального УЭС анизотропных пластов-коллекторов, также необходимо максимально корректно учитывать влияние вмещающих пород в условиях, отличных от постановки «пласт конечной мощности в однородных изотропных вмещающих породах». В условиях терригенного разреза Западной Сибири контрастные по УЭС карбонатизированные пропластки чаще всего характеризуются небольшой толщиной. Большое количество таких пропластков в исследуемых отложениях значительно осложняет анализ сигналов электрокаротажа. Помимо этого, глинистые отложения, являющиеся вмещающими для целевых горизонтов, обычно

являются анизотропными. Неучет их анизотропии может приводить к ошибкам при интерпретации сигналов БКЗ. Также качество глинистой покрышки может быть связано с электрической анизотропией её свойств, поэтому информация о вертикальном УЭС вмещающих глинистых отложений тоже может быть полезна.

На рисунке 2.3.4 представлена реалистичная модель осложнённого карбонатными прослоями изотропного нефтеводонасыщенного коллектора во вмещающих анизотропных глинистых отложениях. Диаграммы кажущегося сопротивления по данным ВЭМКЗ в тонких уплотненных пластах не достигают модельных значений УЭС (значения для короткого зонда: 33, 40 и 35 Ом·м вместо 50, 70 и 60). УЭС неизменной проникновением части пластов можно оценить по диаграмме зонда DF20 как 10 и 9 Ом·м (вместо 12 и 9 Ом·м) в области под их кровлями. В обоих нефтеводонасыщенных коллекторах соотношение сигналов зондов разной длины соответствует наличию ЗП и ОЗ. Более широкая ОЗ в нижнем коллекторе отражается в более низких значениях КС для зонда DF10.

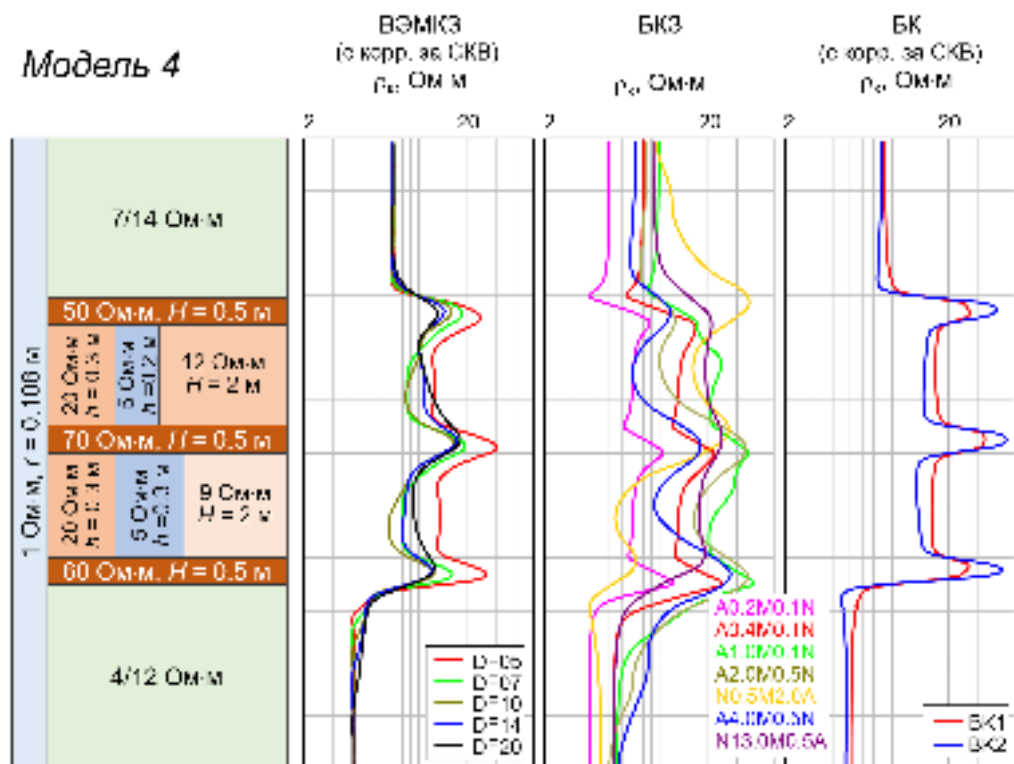


Рисунок 2.3.4 – Реалистичная модель осложнённого карбонатными прослоями изотропного нефтеводонасыщенного коллектора во вмещающих анизотропных глинистых отложениях и рассчитанные в ней сигналы электрометрии

Диаграммы КС БКЗ отмечают максимумами подошвы каждого уплотненного пласта и минимумами – их кровли. Значения в максимумах около 45 Ом·м (для кровельного зонда над верхним уплотненным пластом, для зондов А1.0М0.1N и А2.0М0.5N – над двумя нижними). Влияние высокоомных пластов затрудняет визуальный анализ и использование пластовых отсчетов для построения кривой зондирования.

Значения КС обоих зондов БК немного ниже в нижнем коллекторе, чем в верхнем. Ни один из зондов не показывает УЭС ЗП или пласта, причиной чего является суммарный вклад ЗП, ОЗ и пласта в измеряемые сигналы. Значения в уплотненных пластах достигают примерно 40, 45 и 42 Ом·м от верхнего к нижнему.

Из-за наличия в модели тонких высокоомных пропластков, анизотропии вмещающих пород и сложного радиального строения пластов-коллекторов, ни один из методов не способен дать достаточно полной информации о модели. Для корректного восстановления всех параметров подобных моделей необходима совместная инверсия данных БКЗ и ВЭМКЗ. При этом, как будет показано в следующем пункте этой главы, совместная инверсия данных 11 зондов двух разных по физическим принципам установок позволяет решать и еще более сложную задачу – задачу оценки вертикального УЭС проницаемых пластов, измененных проникновением бурового раствора.

2.4. Точность восстановления геоэлектрических параметров

Инверсия синтетических сигналов

Для оценки возможностей восстановления параметров моделей с помощью совместной инверсии БКЗ и ВЭМКЗ проведено тестирование алгоритмов и методических приемов на широком наборе моделей терригенных отложений [Петров, Нечаев, Сухорукова, 2018; Петров, Сухорукова, Нечаев, 2019]. В вычислительных экспериментах использовались как основные типы моделей западносибирских осадочных отложений (см. рисунок 2.2.1) по отдельности, так и более сложные, полученные произвольной комбинацией нескольких из них. Диапазоны значений параметров отложений приведены в таблице 2.4.1, толщина пластов варьировалась от 0.5 до 2.0 м. В большей части моделей УЭС глинистого бурового раствора равно 0.5, 1.0 и 2.0 Ом·м. Для тестирования алгоритмов моделирования сигналов в условиях высокого контраста УЭС в выборке присутствовали

модели со скважиной, пробуренной на биополимерном минерализованном растворе (0.05 Ом·м).

Для последней версии вычислительных модулей время решения прямых задач для основных тестовых моделей на компьютере с процессором Intel i5 3570К с использованием для вычислений 4 потоков варьируется от 0.1 до 1.5 с в зависимости от геометрической сложности модели.

Таблица 2.4.1 – Параметры тестовых моделей терригенных отложений Западной Сибири

Отложения	Параметры модели	ЗП		ОЗ		Пласт	ρ_v / ρ_h
		ρ_h , Ом·м	h , м	ρ_h , Ом·м	h , м	ρ_h , Ом·м	
Глинистые породы		нет	нет	нет	нет	4–7	1–9
Непроницаемые неглинистые породы		нет	нет	нет	нет	30–50	*
Песчаники водонасыщенные		16	0.3–0.4	нет	нет	4–5	*
Песчаники нефтеводонасыщенные		20	0.3–0.4	5	0.1–0.2	9–30	*

*Значение ρ_v для всех радиальных зон коллекторов определялось по формулам переслаивания изотропных песчаных и анизотропных глинистых прослоев [Hagiwara, 2013]

В рассчитанные сигналы вводился нормально распределенный шум с относительным среднеквадратическим отклонением 2.5%. По полученным псевдоизмеренным сигналам согласно разработанной методике (глава 3) составлялись стартовые модели для инверсии.

Поскольку свойства отложений при инверсии полагались неизвестными, при подборе все блоки считались анизотропными (алгоритмом варьировались обе компоненты УЭС). Также уточнялось положение всех границ, кроме стенки скважины. Критерием выхода из инверсии являлось достижение величины относительного среднеквадратического расхождения рассчитанных и псевдоизмеренных сигналов в 3%.

По завершению инверсии анализировалась точность подбора каждого из параметров модели. Всего было исследовано около 30 тестовых моделей. Рассмотрим результаты инверсии сигналов, рассчитанных в трех из них (Рисунок 2.4.1а). Модель 1 содержит два коллектора с разной степенью нефтенасыщенности и осложнена тонкими непроницаемыми высокоомными пропластками. Модель 2 содержит непроницаемый высокоомный

слой в кровле и два проницаемых пласта, один из которых насыщен водой, а другой – смесью воды и нефти. Пласты коллектора в модели 3 образованы тонким переслаиванием проницаемых пород со свойствами, как в модели 2, и непроницаемых пород со свойствами, как у подстилающих анизотропных глин; глинистость пачки 20%. Эффективные параметры (значения ρ_h и ρ_v) пластов и измененных зон модели 3 рассчитаны по формулам [Nagiwara, 2013]. Также в модели 3 несколько больше, чем в основных моделях, ширина измененных зон и разное УЭС вмещающих толщ.

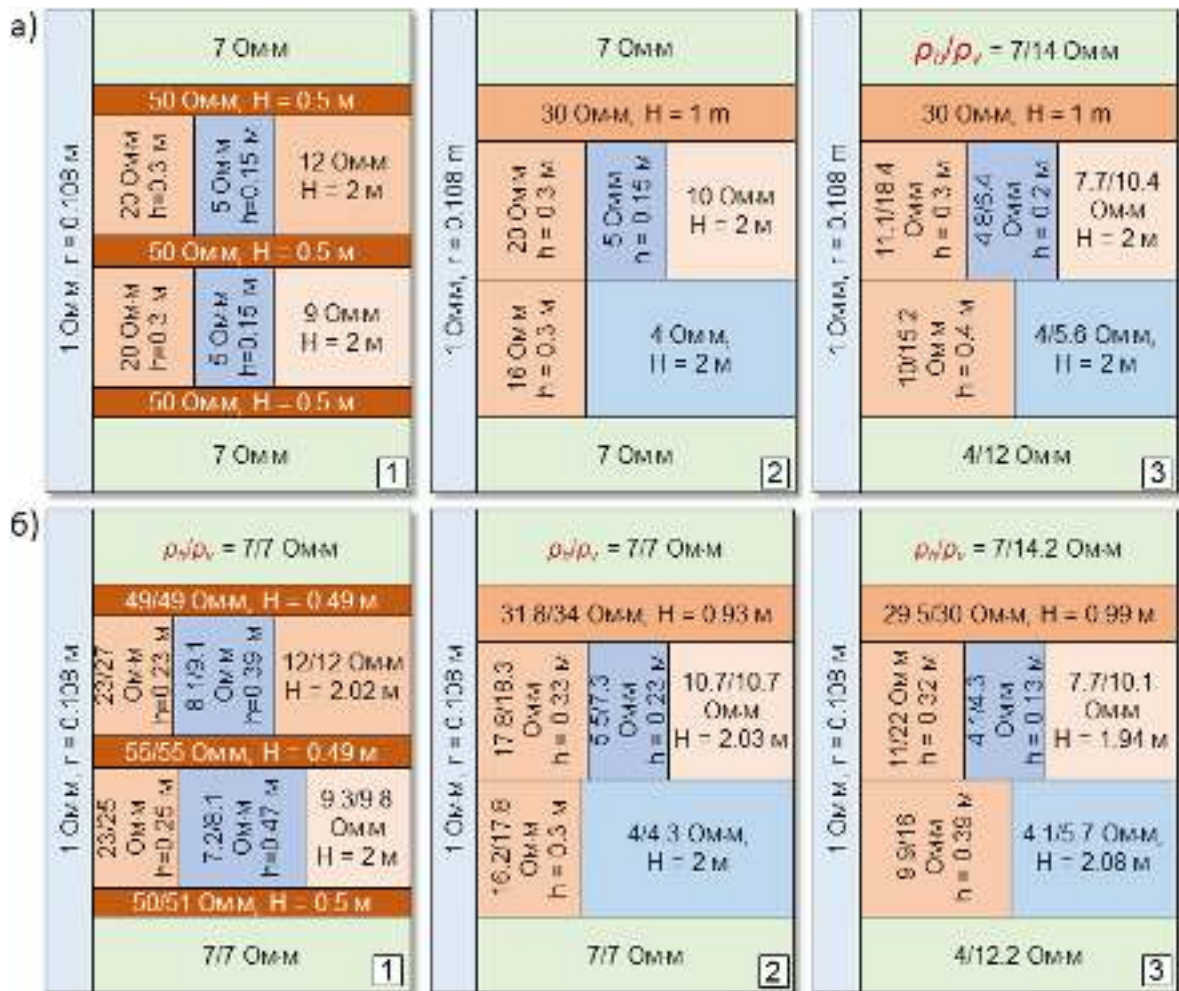


Рисунок 2.4.1 – Примеры тестовых моделей терригенных коллекторов (а) и результат совместной инверсии псевдоизмеренных сигналов ВЭМКЗ и БКЗ (б)

Стоит обратить внимание, что предлагаемые к рассмотрению примеры достаточно просты для анализа, поэтому подобрать сигналы можно и без жесткого следования разработанной методике: скорость работы алгоритмов достаточно высока для того, чтобы по-

добрать сигналы без фиксации различных параметров на разных стадиях инверсии и использования оконного режима. Однако с увеличением протяженности модели по вертикали время, необходимое для перебора, резко увеличивается, и без использования методических приемов подобрать сигналы зачастую становится невозможным. В то же время погрешность определения модельных параметров определяется сложностью радиального строения отложений, электрическим контрастом и толщиной прослоев, а не протяженностью модели по вертикали. Увеличение протяженности лишь осложняет процесс подбора сигналов.

На рисунке 2.4.1б приведены результаты инверсии сигналов ВЭМКЗ и БКЗ, рассчитанных в тестовых моделях. Наиболее точно в процессе инверсии определяются параметры неизменной части пласта, наименее точно – параметры ОЗ.

Несмотря на подбор двух независимых компонент УЭС, во всех рассмотренных моделях удается с хорошей точностью восстановить большинство значимых параметров. Наибольший практический интерес представляют значения ρ_h и ρ_v неизменных проникновением частей пластов, которые в условиях терригенных отложений Западной Сибири восстанавливаются с достаточно высокой точностью. Это становится возможным благодаря совместной инверсии независимых данных двух методов, основанных на разных способах генерации электрических токов в проводящей среде и обладающих совершенно различными областями чувствительности. В рассмотренных моделях для нефтеводонасыщенного пласта мощностью 1.5–2.0 метра средняя погрешность определения ρ_h составила ~3.5%, ρ_v – ~6%.

Также при тестировании выявлено, что чувствительность сигналов БКЗ к вертикальному УЭС ЗП недостаточна для его определения по практическим данным: даже при инверсии синтетических данных погрешность определения ρ_v ЗП достигает 35%. Однако этот параметр в настоящее время не востребован при петрофизической интерпретации.

Низкая чувствительность сигналов БКЗ к параметрам ОЗ хорошо известна, поэтому определить ρ_v ОЗ по данным совместной инверсии БКЗ и ВЭМКЗ невозможно: погрешность определения ρ_v ОЗ может достигать 90%. При наличии осложняющих разрез тонких карбонатных прослоев (Рисунок 2.4.1а1, 2.4.1б1) наблюдается широкая эквивалентность в соотношении ширины и горизонтального УЭС окаймляющей зоны. Остальные параметры модели восстанавливаются с хорошей точностью, включая параметры высокоомных прослоев мощностью 0.5 м, на интервал которых при обычном шаге представления

данных каротажа 0.2 м приходится всего по две-три точки измерения (максимальная погрешность определения ρ_h и $\rho_v \sim 10\%$). Это обусловлено их сильным влиянием на сигналы БКЗ, измеренные выше и ниже них по разрезу. Благодаря характерным формам сигналов БКЗ, имеющим резкие «пички» при пересечении горизонтальных границ, положения всех горизонтальных границ восстанавливаются с очень высокой точностью.

Подобные результаты получены и по остальным моделям. Таким образом, на синтетических моделях подход показал высокую точность, которая ограничивается не особенностями алгоритмов, а модельной эквивалентностью, разрешающей способностью приборов и сетью наблюдений. Однако, несмотря на низкие погрешности восстановления значимых параметров во всех рассмотренных моделях, данный способ оценки точности инверсии позволяет лишь на качественном уровне судить о возможностях алгоритмов и аппаратуры.

Еще одним способом оценки точности инверсии является подход на основе расчета частных производных сигналов по параметрам модели [Аржанцев, Сухорукова, Нечаев, 2012; Сухорукова, Петров, Нечаев, 2017]. Способ успешно применяется для различных фокусированных зондирующих систем, в том числе ВЭМКЗ. Отсутствие фокусировки тока в методе БКЗ приводит к тому, что на каждое измерение может влиять большое количество параметров, поэтому оценки на основе функций чувствительности сигналов к параметрам среды для этого метода дают лишь приблизительное представление об устойчивости результата инверсии, не позволяя построить в полной мере обоснованные оценки погрешностей. В то же время постоянно растущее быстродействие алгоритмов численного моделирования и инверсии сигналов уже сегодня позволяет в исследовательских работах применять для решения задачи определения погрешности модельных параметров статистическое моделирование.

Статистическая оценка точности восстановления параметров

Для получения точных оценок погрешности определения восстанавливаемых при инверсии параметров среды разработан прототип ПО на основе статистического моделирования [Петров, Сухорукова, 2020]. Алгоритм основан на решении большого количества обратных задач от различных стартовых моделей и статистической оценке результатов. За счет интеграции с инструментами инверсии AlondraWL, алгоритм полностью автоматический и не требует участия интерпретатора, за исключением этапа стартовой

настройки. Алгоритм не привязан к конкретному каротажному методу и позволяет осуществлять анализ результатов инверсии произвольного набора зондов БКЗ и ВЭМКЗ. При инверсии поддерживаются все ключевые возможности AlondraWL: параллельные вычисления, гибкая система ограничения модельных параметров, оконная инверсия и т.д. Помимо очевидного преимущества – возможности учета одновременного влияния нескольких параметров на каждую точку измерения – подход позволяет учитывать влияние на точность определения модельных параметров априорной информации, заданной с помощью фиксации или интервальных ограничителей параметров.

На рисунке 2.4.2 представлена принципиальная схема алгоритма.

На вход алгоритма подается исследуемая модель, рассчитанные в ней сигналы каротажа и модель погрешности измерений.



Рисунок 2.4.2 – Принципиальная схема алгоритма для оценки точности восстановления параметров среды при двумерной инверсии с помощью статистического моделирования

Исследуемая модель может быть получена в результате инверсии практических данных, если необходимо оценить точность оценки параметров конкретных отложений, или может представлять собой типичную модель целевого интервала, если необходимо оценить целесообразность использования методов БКЗ и ВЭМКЗ в каких-либо условиях.

Сигналы каротажа – набор сигналов БКЗ и/или ВЭМКЗ, рассчитанных в исследуемой модели. Инверсия данных может быть как совместной, так и для каждого метода по отдельности.

Модель погрешности измерения для каждого зонда используется в алгоритме для зашумления подбираемых сигналов.

При запуске алгоритма для создания каждой стартовой модели значение каждого из параметров (положения горизонтальных и цилиндрических границ и УЭС блоков) варьируется в заданных пределах от истинного значения в исследуемой модели (ИМ). При этом параметры, которые не планируется подбирать при инверсии, считаются известными априорно, их значение задается равным значению в ИМ и не варьируется (фиксируется). При анализе синтетических моделей в качестве практических сигналов берутся сигналы, рассчитанные в ИМ. В подбираемые сигналы добавляется шум, сгенерированный по модели погрешности измерений.

Полученные стартовая модель и сигналы отправляются в решатель обратной задачи комплекса AlondraWL. Для оптимизации функционала невязки используется метод DFO-LS [*Improving the Flexibility...*, 2018]. Априорная информация (если есть) учитывается в виде интервальных ограничителей на возможные значения параметров. Производится несколько последовательных итераций минимизации, в качестве стартовой модели на следующей итерации берется полученная на предыдущем шаге модель. После каждой итерации минимизации проверяется качество подбора сигналов. Если точность подбора удовлетворительна, минимизация прерывается, стартовая и финальная модели сохраняются для последующего анализа. Если за максимальное количество итераций достигнуть удовлетворительного качества подбора не удастся, то результат отбраковывается.

Оценка качества инверсии. В случае одномерной инверсии (инверсии кривой зондирования) для зондов каждого метода оценивается максимальное отклонение рассчитанных на текущем шаге сигналов от подбираемых и среднее отклонение по всем зондам. При двумерной инверсии для зондов каждого метода оценивается максимальное отклонение сигналов, смещение уровней рассчитанных сигналов относительно измеренных и

их среднеквадратическая невязка. Результат инверсии считается удовлетворительным, если каждое из этих значений меньше либо равно значению, рассчитанному по подбираемым и рассчитанным в ИМ сигналам.

Эти шаги повторяются необходимое количество раз, формируя выборку моделей – результатов инверсии, в практическом смысле эквивалентных исследуемой. В конце анализируется распределение каждого из параметров.

Рассмотрим пример применения алгоритма на одномерной радиально-слоистой модели, хорошо демонстрирующий преимущество перед подходом на основе линейного приближения. На рисунке 2.4.3 приведены результаты оценки точности восстановления параметров модели нефтеводонасыщенного пласта при инверсии данных БКЗ СКЛ-76.

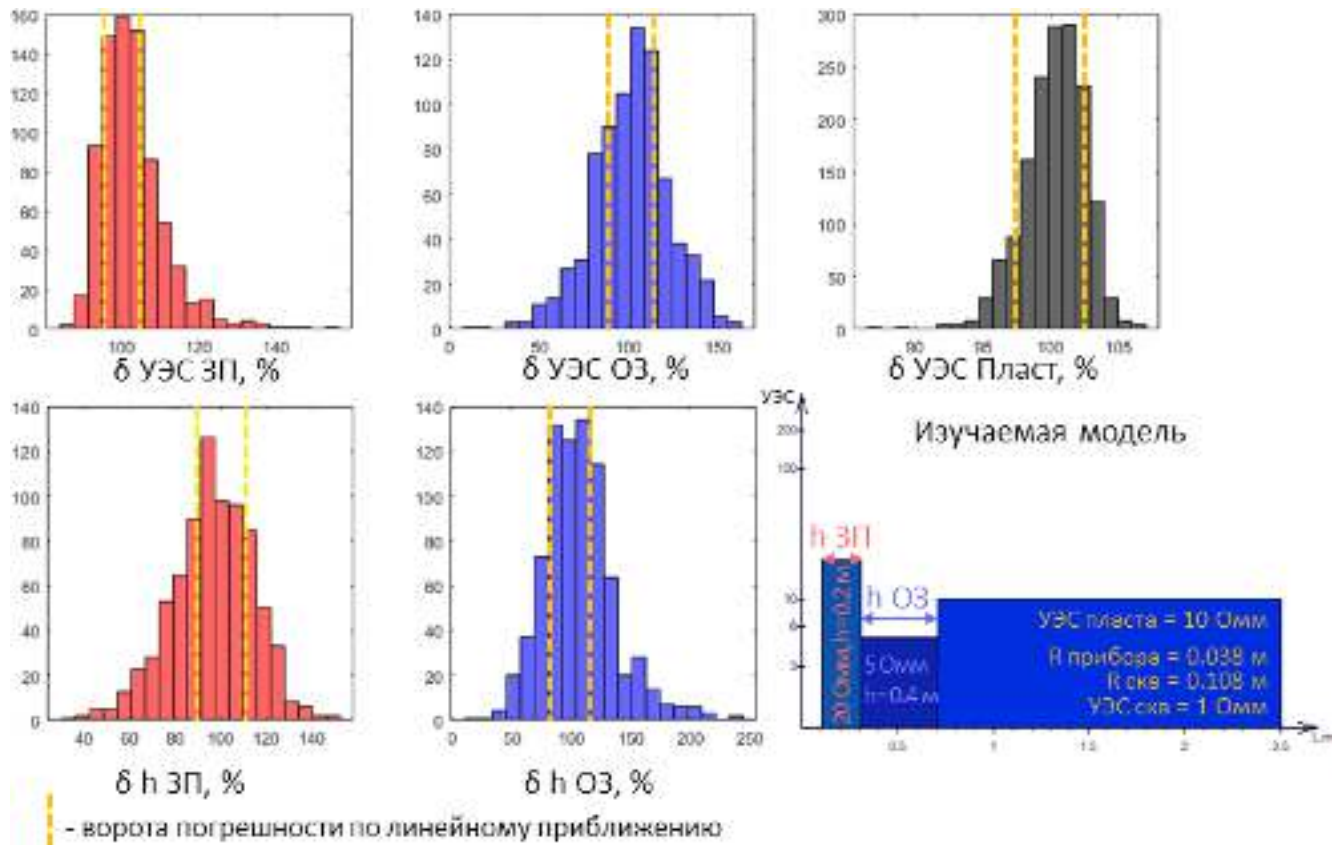


Рисунок 2.4.3 – Результаты статистической оценки точности восстановления параметров модели мощного нефтеводонасыщенного пласта, пробуренного на глинистом буровом растворе, при инверсии данных БКЗ СКЛ-76. $\delta = 100 \cdot p_{inv} / p_{true}$, где p_{inv} – восстановленное значение параметра, а p_{true} – истинное

Для построения гистограмм распределения параметров использовалась выборка из 200 моделей, эквивалентных по сигналам БКЗ исследуемой с точностью до погрешности измерений. В расчётах использовалась модель нормально распределенного шума с

$3\sigma = 2.5 + 0.004 * (5000/\rho_{ik} - 1) \%$, где ρ_{ik} – кажущееся УЭС i -того зонда БКЗ, что соответствует паспортным характеристикам прибора [Комплекс геофизический..., 2013]. При генерации стартовых моделей все параметры ($h_{зп}$, $h_{оз}$, $\rho_{зп}$, $\rho_{оз}$, $\rho_{пласт}$) выбирались случайно из равномерного распределения в пределах $\pm 70\%$ от истинного значения. Полученная в результате инверсии модель считалась эквивалентной исследуемой, если максимальное относительное отклонение рассчитанного ρ_k каждого зонда от псевдоизмеренного не превышало 3%, а среднее отклонение по всем зондам – 1%. Ворота погрешности по линейному приближению соответствуют максимальному изменению одного параметра исследуемой модели, при котором выполняется критерий эквивалентности.

Как видно из данных, приведенных на рисунке, оценка погрешности, полученная по линейному приближению, оказывается существенно заниженной. Некоторые комбинации параметров измененных зон и пласта (эквивалентные модели) находятся за пределами линейного приближения, так как влияние на сигналы изменения одного параметра может быть частично компенсировано изменением других параметров. В приведенном примере оценку на основе линейного приближения можно применить лишь для УЭС пласта, так как чувствительность сигналов к этому параметру максимальна. В то же время оценка погрешности на основе статистического моделирования позволяет получить не только пределы, но и вероятностное распределение значений всех восстанавливаемых параметров.

Второй пример – модель коллектора смешанного насыщения, осложненного карбонатизацией в кровельной части и расположенного в мощных глинистых отложениях (Рисунок 2.4.4)

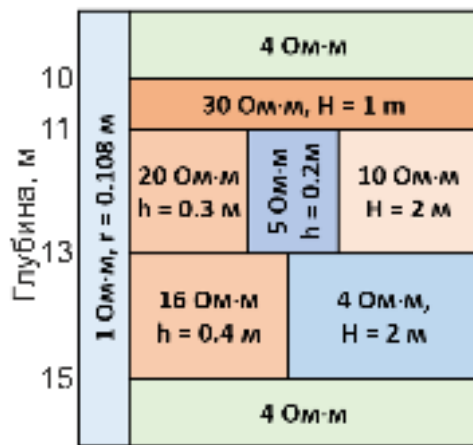


Рисунок 2.4.4 – Модель осложненного карбонатизацией коллектора смешанного насыщения в мощных глинистых отложениях

В примере анализируется точность восстановления параметров модели при совместной инверсии сигналов БКЗ и ВЭМКЗ СКЛ-76 (6 зондов БКЗ, 5 зондов основной изо-параметрической группы ВЭМКЗ, 51 точка измерений с шагом 0.2 м). Модели погрешности измерения сигналов БКЗ и ВЭМКЗ выбраны согласно описаниям приборов [Аппаратура высокочастотного..., 2005; Комплекс геофизический..., 2013].

Генератор стартовых моделей: все параметры выбирались случайно из равномерного распределения. Положения горизонтальных границ варьировались в пределах ± 0.2 м от истинного положения, остальные параметры ($h_{ЗП}$, $h_{ОЗ}$, $\rho_{ЗП}$, $\rho_{ОЗ}$, $\rho_{пласт}$) в пределах $\pm 70\%$ от истинного значения. Так как при инверсии истинная модель считается неизвестной, для всех блоков, кроме карбонатизированного прослоя и ОЗ, при подборе независимо варьировались горизонтальное и вертикальное УЭС (ρ_h и ρ_v). Результаты оценки точности восстановления параметров приведены на рисунке 2.4.5.

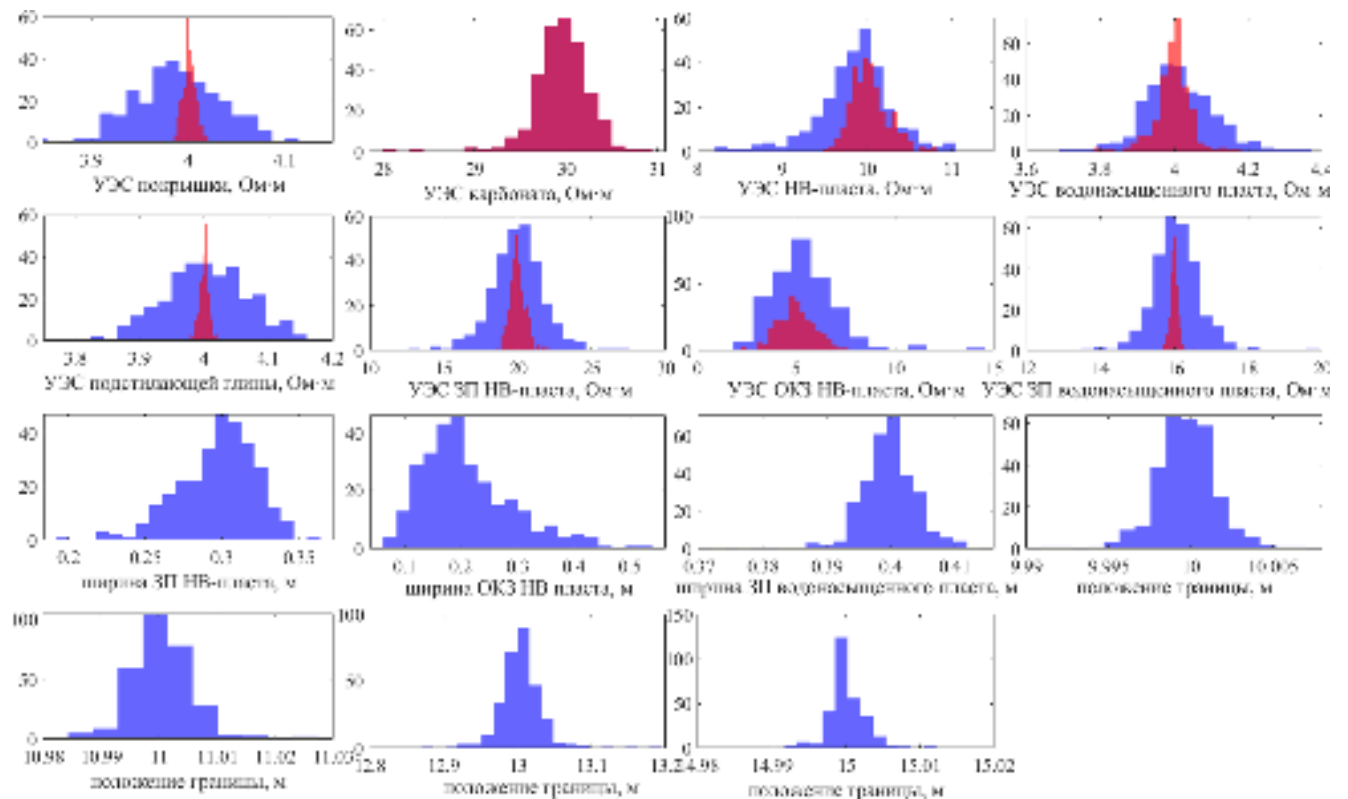


Рисунок 2.4.5 – Результаты статистической оценки точности восстановления параметров модели коллектора смешанного насыщения в мощных глинистых отложениях (см. рисунок 2.4.4). На гистограммах УЭС красным цветом – ρ_h , синим – ρ_v

Максимумы распределения всех параметров, полученные при статистическом моделировании, с высокой точностью соответствуют истинным значениям. Характер распределений подтверждает сделанные ранее выводы.

1. Несмотря на то, что чувствительность сигналов БКЗ к вертикальной компоненте тензора УЭС существенно ниже, чем к горизонтальной, благодаря сужению области эквивалентности при совместной инверсии сигналов БКЗ и ВЭМКЗ в геоэлектрических условиях, близких к рассмотренной модели, можно оценить вертикальное УЭС неизменных частей пластов в коллекторах со сложным радиальным профилем УЭС.

2. Большая погрешность определения параметров измененных зон не позволяет оценивать величину их вертикального УЭС даже при совместной инверсии БКЗ и ВЭМКЗ.

3. Мощность исследуемого слоя не является решающим параметром для оценки вертикального УЭС с помощью двумерной инверсии, так как наибольшая чувствительность сигналов к ρ_v наблюдается в точках скважины, расположенных вблизи границ пластов. Так, погрешность определения вертикального УЭС (95% доверительный интервал) мощной подстилающей толщи составляет ~6.5%, что лишь на 2.5% меньше, чем погрешность определения УЭС неизменной части водонасыщенного пласта мощностью 2 м, определение параметров которой осложняется наличием зоны проникновения.

4. Точность определения положения резких контрастных горизонтальных границ очень высока, что связано с полным соответствием интерпретационной модели типу исследуемой модели – осесимметричная среда с кусочно-постоянным изменением УЭС. При практических измерениях само понятие границы пластов может быть условным, так как часто встречается плавное изменение свойств по разрезу. Методические аспекты этого вопроса будут рассмотрены в пункте 2.5 этой главы.

В подавляющем большинстве случаев естественный процесс осадконакопления приводит к тому, что в песчано-глинистых отложениях вертикальное УЭС больше или равно горизонтальному. Поэтому при обработке практических данных, измеренных в терригенных отложениях, целесообразно использовать ограничитель на отношение $\frac{\rho_v}{\rho_h} \geq 1$.

Такой ограничитель является примером простейшей априорной информации, которая может использоваться в инверсии. Помимо этого, целесообразно использовать одно значение УЭС для описания свойств окаймляющей зоны, так как чувствительность сигналов

БКЗ к вертикальной компоненте УЭС этой зоны низка. Опыт интерпретации данных в подобных разрезах позволяет установить интервальный ограничитель на ширину и УЭС ОЗ ($3 \text{ Ом}\cdot\text{м} \leq \rho_{\text{ОЗ}} \leq 7 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $0.1 \text{ м} \leq h_{\text{ОЗ}} \leq 0.4 \text{ м}$) [Comparison of the Russian..., 2020]. Добавление в инверсию этих условий значительно меняет картину распределения восстанавливаемых параметров (Рисунок 2.4.6).

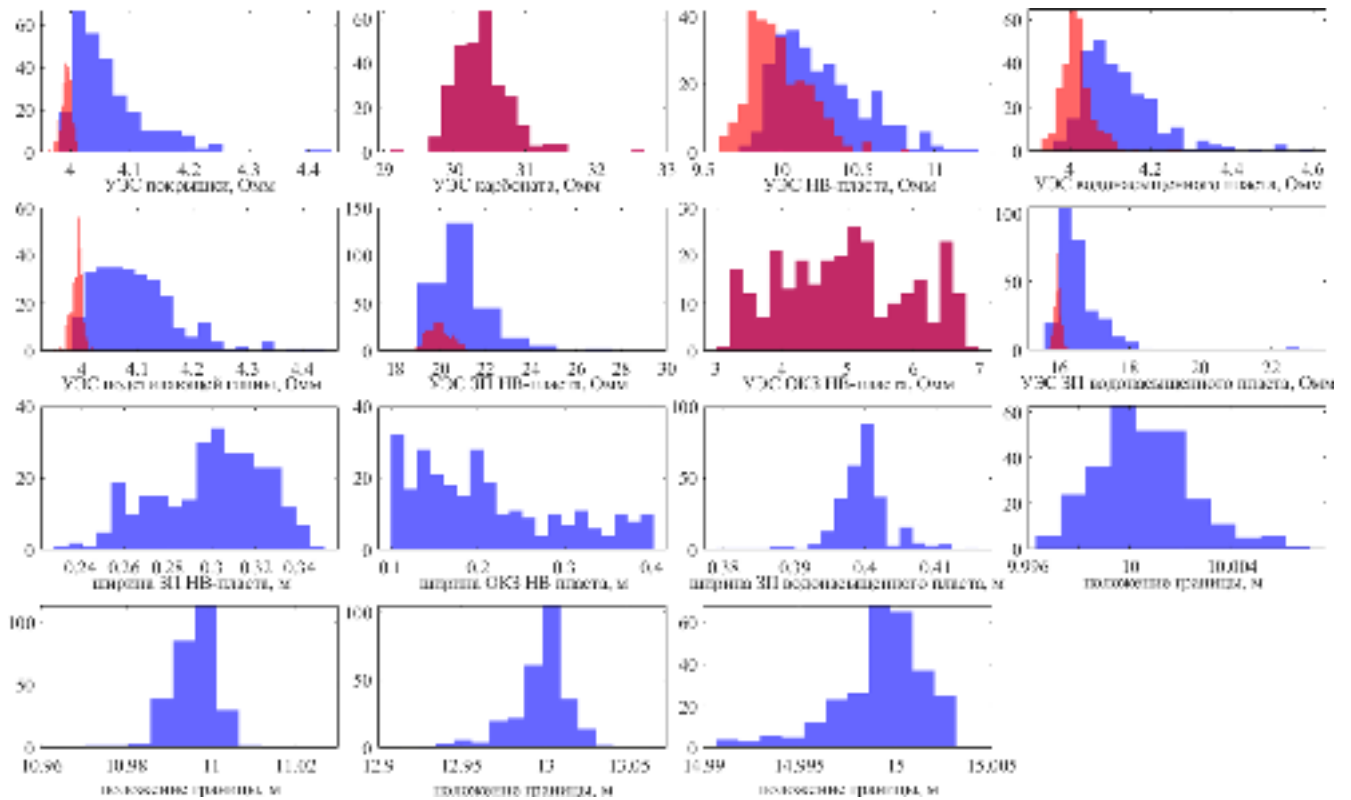


Рисунок 2.4.6 – Результаты статистической оценки точности восстановления параметров модели коллектора смешанного насыщения в мощных глинистых отложениях (см. рисунок 2.4.4) с использованием априорной информации. На гистограммах УЭС красным цветом – ρ_h , синим – ρ_v

Введение перечисленных ограничителей на параметры существенно уменьшает погрешность определения вертикального УЭС пластов. Тем не менее, погрешность определения вертикального УЭС зон проникновения все еще остается слишком высокой, чтобы оценивать этот их параметр при инверсии реальных данных. Таким образом, и при использовании ограничителя $\lambda \geq 1$ для описания свойств зоны проникновения следует использовать одно значение УЭС: введение анизотропии лишь увеличивает размерность обратной задачи, усложняя нахождение решения.

Из-за того, что при использовании ограничителя $\lambda \geq 1$ решения с $\rho_v < \rho_h$ невозможны, максимум распределения ρ_v смещается в сторону больших значений. При этом это смещение мало: в рассматриваемой модели для неизменных частей пластов его величина не превышает 2%. Таким образом, добавление ограничителей приводит к уменьшению дисперсии определяемых значений и обеспечивает возможность исключения заведомо не отвечающих геологии моделей, что крайне важно при практическом использовании инверсии. Добавляющаяся при этом в определяемые значения ρ_v неизменных частей пластов систематическая погрешность пренебрежимо мала.

Таким образом, на реалистичной модели терригенного коллектора:

- показана возможность определения вертикального УЭС проницаемых отложений по данным совместной инверсии БКЗ и ВЭМКЗ;
- оценена погрешность восстановления параметров модели с учетом их одновременного влияния на измеряемые сигналы;
- рассмотрено влияние интервального ограничителя $\frac{\rho_v}{\rho_h} \geq 1$ на определяемые параметры.

Подобным образом рассмотрено еще несколько тестовых моделей (см. рисунок 2.4.1), результаты анализа подтверждают выводы, полученные для первой модели. К сожалению, высокая ресурсоемкость статистического моделирования не позволяет рассмотреть весь спектр тестовых моделей (см. рисунок 2.2.1). Также сложность подбора сигналов в полностью автоматическом режиме затрудняет анализ моделей, протяженных по глубине. Тем не менее, на практических данных инструмент можно использовать для детального анализа точности восстановления параметров локальных объектов и небольшого интервала вмещающих их пород. Пример анализа практических данных, измеренных на интервале песчано-глинистого коллектора юрского возраста и вмещающих его отложений, будет рассмотрен в пункте 3 главы 4.

Влияние ошибочного определения типа модели на результаты инверсии данных БКЗ

Еще одна важная проблема, требующая рассмотрения в рамках оценки точности восстановления модельных параметров, - это влияние на результаты инверсии ошибоч-

ного определения типа модели отдельного слоя. Например, при попытке подбора проницаемого слоя с измененной прискважинной зоной как непроницаемого анизотропного. Подобная ситуация маловероятна при совместной инверсии данных БКЗ и ВЭМКЗ, так как данные ВЭМКЗ обычно хорошо поддаются визуальному анализу и характерным образом изменяются на интервалах проницаемых отложений. Более того, даже если при определении типа модели какого-либо из слоев интерпретатором будет допущена ошибка, сигналы ВЭМКЗ в вертикальных скважинах не чувствительны к вертикальному УЭС, и подобрать модель, удовлетворяющую данным обоих методов, без учета измененной зоны возможно лишь в исключительных случаях.

Ситуация осложняется при использовании инверсии только данных БКЗ. При обработке ограниченного набора ГИС, например, архивных данных, определение модели каждого слоя может быть неоднозначным. Эквивалентность сигналов градиент-зондов в однородной трансверсально-изотропной среде и среде с осесимметричным распределением УЭС при расположении точки измерения на оси симметрии была аналитически показана еще в середине прошлого века в работе [Kunz, Moran, 1958]. Поэтому появление инструментов 2D инверсии с возможностью подбора вертикальной компоненты сопротивления следует сопровождать анализом эквивалентности между сигналами БКЗ в разных классах 2D моделей [Петров, Сухорукова, Нечаев, 2017а]. Под разными классами моделей подразумевается наличие качественных отличий между ними, таких как присутствие или отсутствие радиальных границ и анизотропии в каждом отдельно взятом слое.

В этой части работы рассчитываются сигналы градиент-зондов комплекса СКЛ-76 с учетом корпуса прибора для ряда типичных осесимметричных кусочно-постоянных моделей проницаемых пластов с шагом по глубине 0.2 м. После к рассчитанным сигналам применяется численная инверсия с привлечением различной априорной информации в рамках моделей, соответствующих и не соответствующих исходному классу, для того чтобы выделить те классы, в которых параметры модели восстанавливаются корректно, и показать возможные последствия ошибочного выбора класса модели интерпретатором.

Во всех расчетах радиус прибора принят равным 0.038 м, радиус скважины – 0.108 м, УЭС бурового раствора – 1 Ом·м. Отдельно следует отметить, что в приведенных примерах в подбираемые сигналы умышленно не добавлен шум, так как в пределах каждого из пластов находится достаточно большое количество точек измерений и добавление

симметрично распределенного шума фактически не влияет на результат инверсии, но осложняет визуальный анализ диаграмм.

Модели изотропного песчаного коллектора

При условии достаточной мощности пласта традиционная методика интерпретации данных БКЗ подразумевает определение его параметров в рамках 1D модели. Рассчитаем сигналы градиент-зондов БКЗ комплекса СКЛ в простейшей модели мощного песчаного коллектора (Рисунок 2.4.7а). Инверсия рассчитанной кривой зондирования в рамках модели анизотропного слоя без зоны проникновения дает практически полное совпадение уровней сигналов всех зондов (Рисунок 2.4.7в). В модели без проникновения сигналы градиент-зондов БКЗ однозначным образом зависят от компонент сопротивления [Журавлев, 1968], однако получаемая в результате инверсии модель является очень неправдоподобной: значение ρ_h (11.5 Ом·м) близко к УЭС пласта, а значение ρ_v (1340 Ом·м) оказывается очень высоким (Рисунок 2.4.7б).

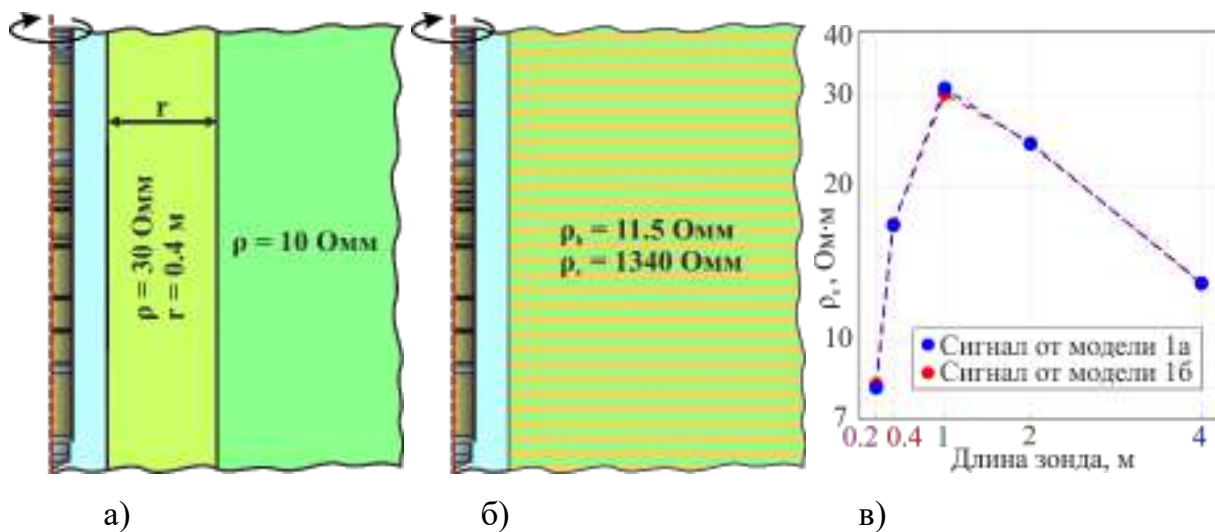


Рисунок 2.4.7 – 1D модель песчаного коллектора (а); модель анизотропного непроницаемого пласта, полученная в результате инверсии рассчитанных для модели а сигналов (б); кривые зондирования для моделей а и б (в)

Достаточно трудно представить себе условия, необходимые для формирования такой породы в песчано-глинистом разрезе. Поэтому, как минимум в случае контрастной зоны проникновения, попытка подбора интервала коллектора как анизотропного слоя без

зоны проникновения не даст правдоподобного результата, который мог бы быть ошибочно воспринят как верная интерпретация данных, даже если в скважине нет измерений другими методами.

Несмотря на очень высокое значение ρ_v , значение ρ_h неизменной части пласта определяется с погрешностью около 15%. Это объясняется тем, что в таких условиях измерений с увеличением длины зонда чувствительность к вертикальной компоненте сопротивления уменьшается [Дашевский, 2008] и показания длинных зондов обусловлены, в первую очередь, именно горизонтальной компонентой, в то время как влияние на сигналы коротких зондов повышающей зоны проникновения в модели с непроницаемым анизотропным пластом компенсируется за счет повышения ρ_v .

При уменьшении сопротивления ЗП определяемое вертикальное сопротивление также уменьшается. При $\rho_{зп} = 15$ Ом·м получаемое в результате инверсии ρ_v составляет уже всего 60 Ом·м, а $\rho_h = 9.7$ Ом·м. Подобные соотношения ρ_h и ρ_v в реальности встречаются, поэтому даже при выборе из двух простейших моделей необходимо учитывать данные других методов и априорную информацию о разрезе.

Добавление в модель горизонтальных границ существенно сужает область эквивалентности. Рассмотрим различия в поведении сигналов при пересечении границ трансверсально-изотропного слоя без проникновения и изотропного с радиальной границей. На рисунке 2.4.8 представлена модель изотропного песчаного коллектора, находящегося в мощных анизотропных глинистых пластах. В этом и всех последующих примерах горизонтальные границы находятся на глубине 10 и 12 м соответственно.

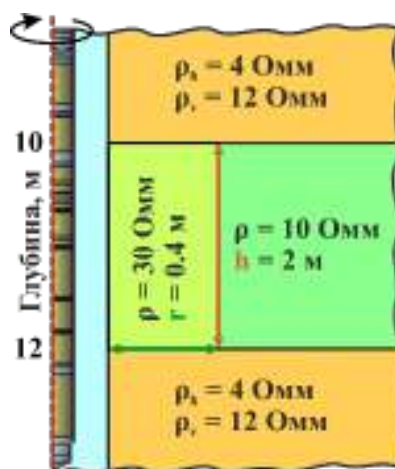


Рисунок 2.4.8 – Модель изотропного песчаного коллектора, перекрытого мощными толщами анизотропных глин

На рисунке 2.4.9 – результат инверсии рассчитанных для модели 2.4.8 сигналов БКЗ комплекса СКЛ. При инверсии предполагалось, что пласт анизотропный, а проникновение бурового раствора в него отсутствует.

В качестве стартового приближения использовались изотропные модели со значениями УЭС, близкими к горизонтальным компонентам в анизотропных пластах и к сопротивлению неизменной части пласта на интервале коллектора. Такие модели легко получить путем осреднения кажущегося сопротивления по БК. С целью моделирования именно этой ситуации инверсия была проведена для двух стартовых моделей с разными значениями горизонтального сопротивления (+15% и –15% от истинного). Положения границ в стартовых моделях были сдвинуты на 0.1 и 0.2 м, что моделировало возможную погрешность их определения по диаграммам БК и небольшую неувязку данных по глубине.

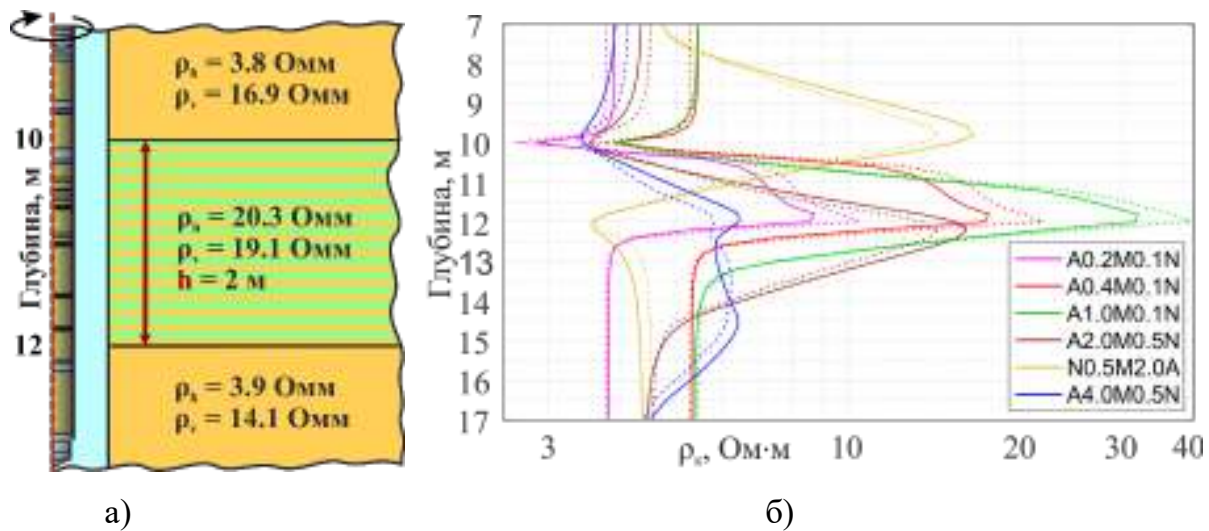


Рисунок 2.4.9 – Модель анизотропного непроницаемого пласта, полученная в результате инверсии рассчитанных для модели на рисунке 2.4.8 сигналов БКЗ комплекса СКЛ – (а); сигналы БКЗ, рассчитанные в модели 2.4.8 (пунктирные линии) и в модели 2.4.9а (сплошные линии) – (б)

Обе стартовых модели дают один и тот же результат инверсии, причем $\rho_h < \rho_v$. Горизонтальные границы определяются с точностью 3–5 см. Стоит отметить, что для удобства визуального анализа в истинной модели границы расположены так, что на них по глубине попадают точки измерений. Однако смещение точек измерений по глубине так,

чтобы они не попадали на границы, практически не влияет на результат инверсии, поскольку подбирается полная форма сигналов.

Так как положения границ определяются единственным образом, если класс модели, в рамках которой проводится инверсия, совпадает с исходным, точность их определения значительно превышает практически необходимую. Если же класс модели не совпадает с исходным, то во всех рассматриваемых примерах точность определения составляет $\sim 3\text{--}5$ см, поэтому в дальнейшем информация о точности восстановления границ не приводится.

Анализируя результаты, представленные на рисунке 2.4.9, можно сделать два основных вывода.

1. Эквивалентность моделей изотропного пласта с ЗП и анизотропного пласта без ЗП отсутствует, так как сигналы длинных зондов БКЗ ведут себя вблизи границ принципиально различным образом.

Особенно хорошо это видно по экстремумам диаграммы для зонда А4.0М0.5N на глубине ~ 13 м: в одной модели наблюдается максимум, а в другой – минимум. При этом следует понимать, что этот вывод справедлив лишь для пластов, радиальное распределение УЭС в которых может быть аппроксимировано кусочно-постоянной моделью с одной радиальной границей. В реальности радиальное изменение УЭС непрерывно, а фронт вытеснения фильтратом бурового раствора пластового флюида может быть сильно нерезким. Также при низком контрасте УЭС неизменённой части пласта и ЗП эти отличия могут оказаться меньше погрешности измерения, однако в приведенной модели в пределах пласта-коллектора среднее расхождение исходных и подобранных сигналов составляет от 7 до 12% в зависимости от длины зонда, что намного превышает её.

2. При ошибочном выборе класса модели среднего пласта исходные параметры не восстанавливаются и на интервалах вмещающих пород.

Очевидно, что степень влияния параметров того или иного слоя зависит от количества расположенных в его пределах точек измерений, однако в приведенном примере на интервал вмещающих пород при подборе приходится 10 м, в то время как на интервал пласта – всего 2 м, при этом ошибка определения ρ_v вмещающих пород составляет $\sim 40\%$. Таким образом, ошибочное определение класса модели одного небольшого пласта в разрезе может привести к большим ошибкам определения параметров соседних пластов.

Модель макроанизотропного песчано-глинистого коллектора

Наиболее интересной с практической точки зрения является модель коллектора с переслаиванием тонких песчаных и глинистых пропластков. При достаточно малой мощности пропластков такой слой будет эквивалентен анизотропному, а поскольку песчаник проницаем, будет формироваться также анизотропная зона проникновения, параметры которой будут отличаться от параметров неизменной части пласта.

Для примера рассмотрим равномерное переслаивание пропластков песчаника из предыдущей модели ($\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_{\text{зп}} = 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) и глин с $\rho = 4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, перекрытых мощными толщами анизотропных глин. Для упрощения глины в пределах коллектора считаем изотропными, а толщины всех пропластков равными. Пересчитывая по известным формулам [Nagiwara, 2013] параметры прослоев в параметры анизотропии, получаем модель, изображенную на рисунке 2.4.10а.

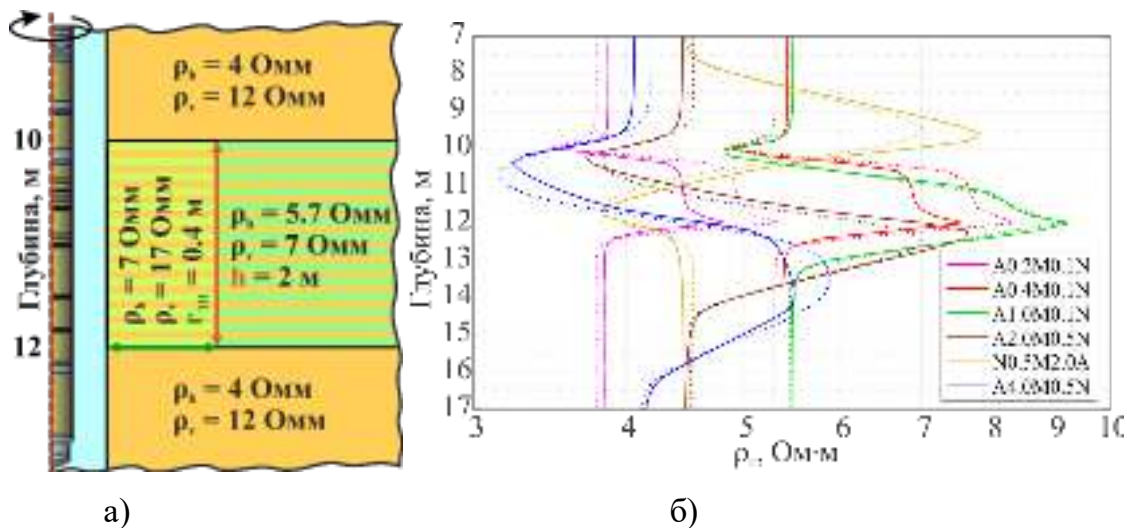


Рисунок 2.4.10 – Модель анизотропного песчаного коллектора, перекрытого мощными толщами анизотропных глин – (а); рассчитанные сигналы БКЗ (пунктирные линии), подобранные сигналы для модели анизотропного пласта без ЗП (сплошные линии) – (б)

Подбор сигналов в предположении, что пласт анизотропный, но без проникновения, приводит к расхождению исходных и подобранных сигналов коротких зондов (A0.2M0.1N и A0.4M0.1N) более чем на 10% почти на всем интервале пласта. Максимальные расхождения между сигналами двухметровых зондов тяготеют к областям границ, где также превышают 10% (Рисунок 2.4.10б). Велики расхождения сигналов и на интервале вмещающих пород. В приведенном примере, как и в модели изотропного коллектора,

подбираемый интервал вмещающих пород 10 м, при этом ошибка определения их ρ_v составляет около 25%.

Подбор для модели с изотропным пластом с проникновением приводит к лучшему совпадению сигналов на интервале коллектора, однако расхождения на интервалах вмещающих пород также наблюдаются – значение ρ_v определяется с ошибкой ~25% (Рисунок 2.4.11). При инверсии реальных данных в такой ситуации интерпретатор может ошибочно решить, что класс модели определен неверно для вмещающих пород, так как сигналы на интервале коллектора подбираются достаточно хорошо, тогда как на самом деле ситуация обратная. Также нельзя забывать, что при уменьшении контраста значений УЭС ЗП и неизменной части пласта этот эффект может оказаться меньше погрешности измерения.

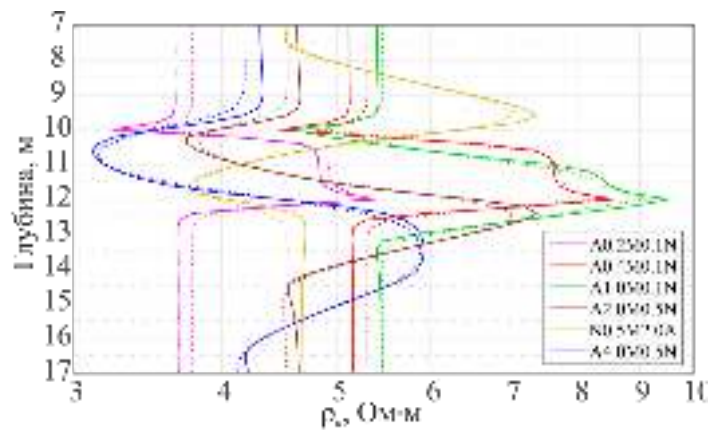


Рисунок 2.4.11 – Пунктирными линиями – сигналы БКЗ, рассчитанные по модели 2.4.10а, сплошными – подобранные в предположении, что пересекаемый слой является изотропным

Предположим, что по данным других методов на интересующем интервале известны с точностью $\pm 15\%$ значения горизонтального сопротивления неизменных буровым раствором пород, а также истинная глубина ЗП. В качестве стартовых моделей для инверсии сигналов БКЗ возьмем изотропные, сопротивление которых взято как $\pm 15\%$ от истинного ρ_h , УЭС ЗП примем равным УЭС неизменной части пласта, а ее толщину зафиксируем на истинном значении.

С обеих стартовых моделей восстанавливаются все параметры модели. Если же в стартовых моделях не фиксировать глубину зоны проникновения, при этом выбирая в качестве ее стартового приближения значения, сильно отличающиеся от истинного, можно получить разные соотношения параметров, дающие практически идентичный исходному

сигнал (для которого невязка меньше единицы, то есть отличие от исходного сигнала меньше погрешности измерения).

Чтобы устранить эту эквивалентность, необходима априорная информация о коллекторе. Причем при инверсии реальных данных крайне нежелательна фиксация горизонтальных сопротивлений на его интервале, поскольку БКЗ наиболее чувствителен именно к горизонтальным компонентам УЭС, и даже небольшая ошибка в оценке одного из них может привести к большим ошибкам в определении других параметров или к невозможности подобрать сигналы с необходимой точностью. Поэтому при инверсии с фиксированной глубиной зоны проникновения необходимо определять её значение по всем доступным данным других методов.

Аппроксимация непрерывного профиля УЭС одной вертикальной границей может отличаться для данных разных методов, а кроме того, параметры зоны проникновения изменяются во времени. Поэтому необходимо проанализировать, как меняются восстанавливаемые параметры при ошибочном определении глубины проникновения. Для этого проведена инверсия сигналов БКЗ, рассчитанных по модели, приведенной на рисунке 2.4.10а, от разных стартовых моделей, в которых фиксировались (не подбирались) разные толщины ЗП.

Как видно из результатов инверсии (Таблица 2.4.2), при неправильном определении толщины ЗП компенсация расхождения сигналов происходит преимущественно за счет вертикальной компоненты её УЭС. С уменьшением глубины проникновения более чем в два раза от истинного, чувствительность к вертикальному сопротивлению ЗП быстро падает, что приводит к резкому увеличению погрешности определения не только ρ_v , но и ρ_h ЗП. При дальнейшем уменьшении толщины ЗП получается модель с очень высокими значениями ρ_v ЗП. Параметры неизменной проникновением части пласта определяются с ошибкой до 11% для всего рассмотренного интервала значений толщины ЗП. На точность определения параметров вмещающих пород изменение глубины проникновения влияния практически не оказывает, так как отсутствуют качественные различия между моделями.

Дополнительно сужает область неопределенности модельных параметров высокая точность измерений комплекса СКЛ. Согласно технической документации, в условиях, близких к рассматриваемым, относительная погрешность измерения градиент-зондами БКЗ комплекса СКЛ составляет $\sim \pm 2.5\%$. Чтобы исключить влияние случайного шума в

реальных данных, модель считалась неудовлетворяющей измерениям с достаточной точностью, если за ворота погрешности выходило более 4 точек подряд хотя бы для одного зонда. После введения этого ограничения допустимый интервал значений толщины ЗП дополнительно сужается, и погрешность определения всех параметров, кроме ρ_v в зоне проникновения, не превышает 10%.

Таблица 2.4.2 – Восстановление параметров модели с неверно заданной толщиной ЗП

Глубина ЗП, м	$\Delta_{\max}, \%$	УЭС, Ом·м				Погрешность определения, %			
		ЗП		Пласт		ЗП		Пласт	
		ρ_h	ρ_v	ρ_h	ρ_v	ρ_h	ρ_v	ρ_h	ρ_v
0.1	4.7	9.2	$2.2 \cdot 10^4$	5.5	7.7	32	$1.29 \cdot 10^5$	3.5	10.6
0.15	3.8	8.2	34.5	5.5	7.7	17.7	103	3	9.4
0.2	2.9	7.7	24.7	5.6	7.5	10	45.3	2.5	7.7
0.25	2.2	7.5	20.4	5.6	7.5	7.1	20	2.1	6.6
0.4	–	7	17	5.7	7	–	–	–	–
0.6	2.9	6.8	15.2	5.8	6.5	3.4	10.6	1.8	6.6
0.7	3.8	6.7	14.8	5.9	6.5	4.3	12.9	3.5	7.1
0.8	4.6	6.6	14.3	5.9	6.3	5.4	15.9	3.5	10

Зеленым цветом выделена истинная модель, розовым – модели, для которых сигналы отличаются от подбираемых более чем на погрешность измерения СКЛ-76 в пяти и более точках глубины подряд хотя бы для одного зонда. Δ_{\max} – максимальное отклонение рассчитанных сигналов от подбираемых на интервале подбора

Таким образом, если данные ВЭМКЗ для применения совместной инверсии недоступны, в исключительных случаях по данным БКЗ можно оценить вертикальное УЭС проницаемых отложений. Это возможно при условии, если пласт выдержан по УЭС, его горизонтальные границы достаточно резкие, а глубина зоны проникновения может быть определена независимо по данным других методов. На практике такие условия встречаются редко, поэтому для инверсии только данных БКЗ рекомендуется оценивать параметры проницаемых отложений по возможности используя изотропную модель пласта, так как оценить реальную погрешность определения вертикального УЭС в таких условиях может быть проблематично.

При малом контрасте свойств пласта и ЗП определить тип модели среды только по БКЗ также может оказаться сложно, а ошибочный выбор модели может привести к резкому увеличению погрешности определения параметров не только пласта, для которого

модель была определена неверно, но и вмещающих пород на большом интервале по глубине. Поэтому для корректной 2D инверсии данных БКЗ с определением ρ_v выбор типа интерпретационной модели для каждого отдельно взятого пласта необходимо делать на основе анализа комплекса ГИС, а не только данных БКЗ, по возможности привлекая априорную геологическую информацию о разрезе.

2.5. Условия применимости численной инверсии данных БКЗ и ВЭМКЗ в классе двумерных моделей

Разработанный подход рассчитан на интерпретацию измерений в субвертикальных скважинах, пробуренных на глинистом буровом растворе в осадочных отложениях Западной Сибири. Обычно песчано-глинистые отложения характеризуются одинаковым УЭС в плоскости напластования и отличным от него УЭС в направлении, перпендикулярном ей.

подавляющее большинство алгоритмов моделирования сигналов методов скважинной электротомии основаны на использовании блочных моделей среды с кусочно-постоянным изменением УЭС. До этого момента в работе рассматривались только традиционные кусочно-постоянные модели прискважинного пространства с 1–2 измененными зонами. При этом реальный профиль проникновения зачастую может быть очень далек от кусочно-постоянного [Киндюк, Нестерова, Ельцов, 2017], [Павлова, Ельцов, Нестерова, 2018].

Также известно [Moran, 1982], что большое количество информации о вертикальном УЭС отложений содержится в формах сигналов БКЗ при пересечении границ. В реальных отложениях могут наблюдаться как резкие границы между отдельными слоями, так и плавное изменение свойств с глубиной. Поэтому для обоснования применимости двумерной инверсии данных на базе кусочно-постоянной модели необходимо оценить величину возможного влияния аппроксимации плавного изменения УЭС по глубине и по радиусу кусочно-постоянным.

Влияние кусочно-постоянной аппроксимации радиального профиля УЭС

Если рассматривать модель бесконечно-мощного пласта, пересеченного скважиной, то, несмотря на то что реальный профиль УЭС может очень сильно отличаться от кусочно-постоянного, при интерпретации БКЗ и ВИКИЗ практически всегда используется аппроксимация профиля одной или двумя измененными зонами с постоянными свой-

ствами (ЗП и ОЗ) [Альпин, 1978; Дахнов, 1981; *Новый аппаратный...*, 2010]. Это связано с ограниченным количеством измерений (обычно 5 зондов ВИКИЗ и 6 зондов БКЗ) и недостаточной радиальной чувствительностью методов для более детального расчленения профиля проникновения.

Несмотря на то что такой подход применяется повсеместно, вопрос о правомерности применения грубой кусочно-постоянной аппроксимации при профилировании вдоль ствола скважины в открытых публикациях не рассматривался.

Исследование этого вопроса важно, так как большая часть информации о вертикальном УЭС содержится в формах сигналов БКЗ при пересечении границ. И если эта форма сильно зависит от детальности аппроксимации профиля УЭС в проницаемых пластах, то точность восстановления параметров анизотропии коллекторов может оказаться очень низкой. При этом для обоснования применимости совместной инверсии необходимо проверить, возможен ли подбор эквивалентной модели, согласованной для данных обоих методов. Для проверки влияния грубой аппроксимации радиального профиля УЭС на форму сигналов БКЗ и ВЭМКЗ выполнен ряд численных экспериментов.

На рисунке 2.5.1 показаны две 1D-радиальные модели пластов-коллекторов, построенные в системе EMF Pro. Верхняя модель соответствует нефтеводонасыщенному коллектору (измененная зона осложнена наличием ОЗ), нижняя – водонасыщенному. В обеих моделях рассчитаны сигналы БКЗ (прибор К1А-723М) и ВИКИЗ; УЭС бурового раствора 1 Ом·м, радиус скважины 0.108 м. Затем количество радиальных зон уменьшено (красные линии) и произведен подбор сигналов, рассчитанных в исходных моделях. Таким образом получены 1D-радиальные модели, по сигналам БКЗ и ВИКИЗ эквивалентные исходным.

С применением комплекса AlondraWL рассчитаны сигналы БКЗ в двумерных моделях, содержащих слои со сложным профилем УЭС. Далее эти слои заменены на эквивалентные им в 1D-радиальной постановке и произведено сравнение сигналов (Рисунок 2.5.2).

Как видно из рисунка, аппроксимация сложной формы профиля УЭС более грубой в данном случае практически не приводит к изменению формы сигналов. Для сигналов ВИКИЗ это объясняется тем, что вихревые токи, возбуждаемые в среде соосной скважине

генераторной катушкой, текут в горизонтальной плоскости. Поэтому при профилировании вдоль ствола скважины модель, эквивалентная в 1D-радиальной постановке, будет полностью эквивалентна и в 2D-радиальной.

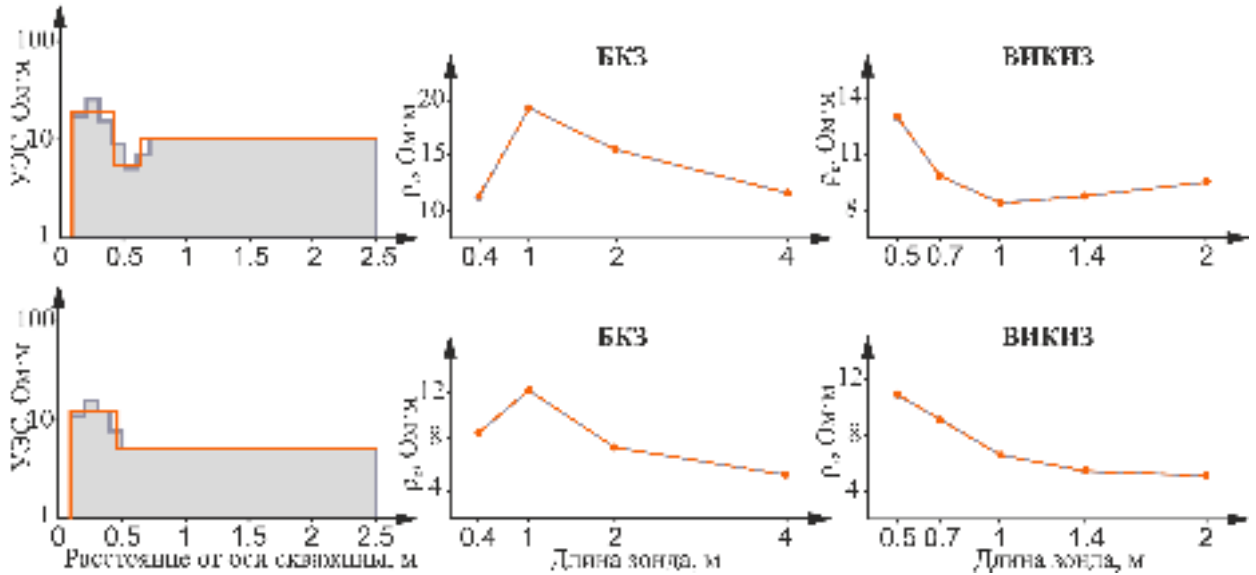


Рисунок 2.5.1 – 1D-радиальные модели коллекторов со сложным профилем проникновения (серым) и эквивалентные модели с грубой аппроксимацией радиального профиля УЭС (оранжевым) – слева; сигналы БКЗ и ВИКИЗ, рассчитанные в моделях со сложным профилем (серым) и в эквивалентных моделях (оранжевым) – справа

В силу физических особенностей измерения, объяснить поведение сигналов БКЗ значительно труднее, за исключением самых простых моделей. Поэтому были проведены подобные численные исследования для разных УЭС и мощностей пластов (от 0.5 до 5 метров), разных типов моделей коллекторов (см. рисунок 2.2.1), разной формы и контраста по УЭС профиля проникновения. Параметры профилей проникновения выбирались согласованно с данными гидродинамических исследований терригенных коллекторов Западной Сибири [Киндюк, Нестерова, Ельцов, 2017], [Павлова, Ельцов, Нестерова, 2018], но не ограничивались ими. Были рассмотрены границы между проницаемыми и непроницаемыми пластами в разных комбинациях как в изотропных, так и анизотропных моделях. По результатам численных экспериментов во всех случаях удастся найти эквивалентную модель, которая как удовлетворяет данным ВИКИЗ, так и не влияет на форму сигналов БКЗ при пересечении границ даже в условиях высокого контраста УЭС.

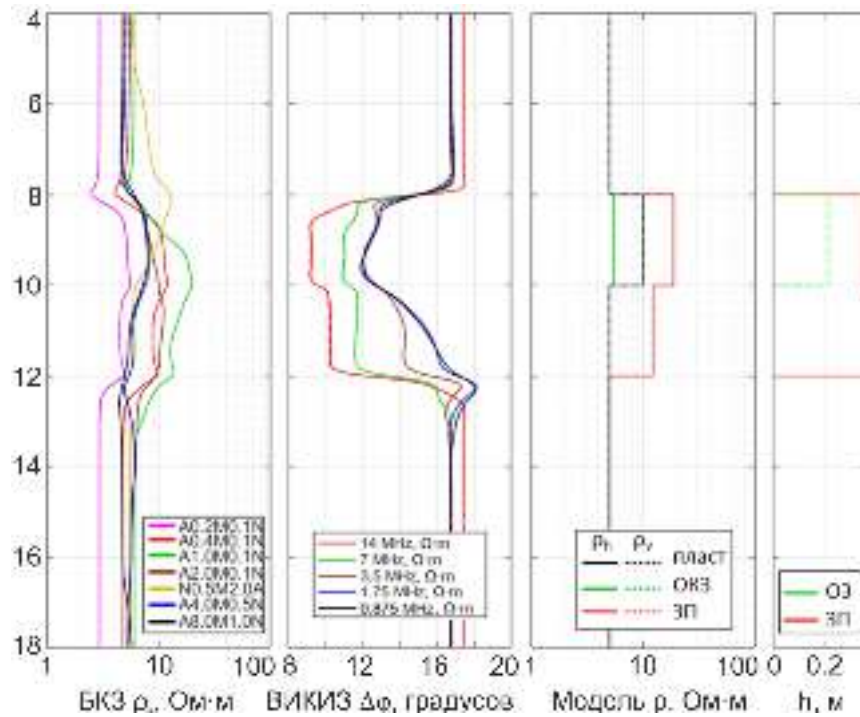


Рисунок 2.5.2 – Сигналы БКЗ и ВИКИЗ, рассчитанные в моделях со сложным радиальным профилем (пунктир) и в моделях с грубой аппроксимацией радиального профиля УЭС (сплошные линии, – слева; модель среды с грубой аппроксимацией профиля УЭС – справа)

Таким образом, установлено, что в условиях терригенного разреза Западной Сибири, применение грубой кусочно-постоянной аппроксимации сложного радиального профиля УЭС не приводит к существенному изменению формы сигналов БКЗ и, как следствие, к увеличению погрешности определения вертикального УЭС проницаемых отложений. Вероятно, это обусловлено особенностями распределения поверхностных зарядов на границах блоков среды.

Влияние кусочно-постоянной аппроксимации вертикального изменения УЭС

Вторым вопросом, требующим рассмотрения, является применение кусочно-постоянной аппроксимации изменения УЭС по вертикали. Несмотря на то что обычно границы между пластами достаточно резкие, в коллекторах смешанного насыщения часто встречается плавное уменьшение УЭС от кровли к подошве. Это может быть связано как с изменением нефтенасыщенности, так и с изменением глинистости. В коллекторах со смешанным насыщением дополнительно осложняют ситуацию процессы фильтрации бу-

рового раствора: с изменением степени нефтенасыщенности значительно меняется радиальный профиль УЭС. В водонасыщенной части песчаного пласта для измененной зоны характерен один экстремум УЭС, а в нефтеводонасыщенной дополнительно формируется окаймляющая зона пониженного сопротивления. То есть при плавном изменении нефтенасыщенности коллектора должно наблюдаться и плавное изменение параметров прискажинной зоны.

Учитывая сложную нелинейную зависимость сигналов БКЗ от параметров модели, необходимо рассмотреть, насколько адекватной является аппроксимация таких коллекторов пластами с постоянными свойствами. Для этого проведена серия вычислительных экспериментов. Стоит отметить, что приближение плавного изменения свойств с глубиной при моделировании выполнялось с помощью слоев с постоянными свойствами толщиной 2 см. В общем случае результаты расчёта сигналов в таких моделях и моделях с градиентным изменением свойств могут быть неэквивалентны, однако для рассматриваемого диапазона УЭС это расхождение не превышает погрешности расчета.

На рисунке 2.5.3 представлена модель коллектора с плавным изменением нефтенасыщенности по вертикали. В модели учтено изменение радиального профиля УЭС с глубиной. Поскольку модель является чрезвычайно сложной для расчета, на каждой глубине профиль УЭС представлен грубой аппроксимацией двумя зонами – ЗП и ОЗ, так как ранее установлено, что такая аппроксимация не оказывает существенного влияния на форму сигналов. Среднеквадратическая невязка сигналов БКЗ, рассчитанных в двух моделях, не превышает 2.6%, что примерно соответствует погрешности измерения современных приборов. Абсолютная невязка сигналов ВИКИЗ не превышает 0.25° , что также примерно соответствует погрешности измерения.

Как видно из данных, представленных на рисунке, в заданной модели для подбора сигналов с практически значимой точностью достаточно лишь грубой разбивки интервала на три слоя. При этом, несмотря на нелокальность и нелинейность сигналов БКЗ, параметры этих слоев определяются как некоторое осреднение свойств более сложной модели.

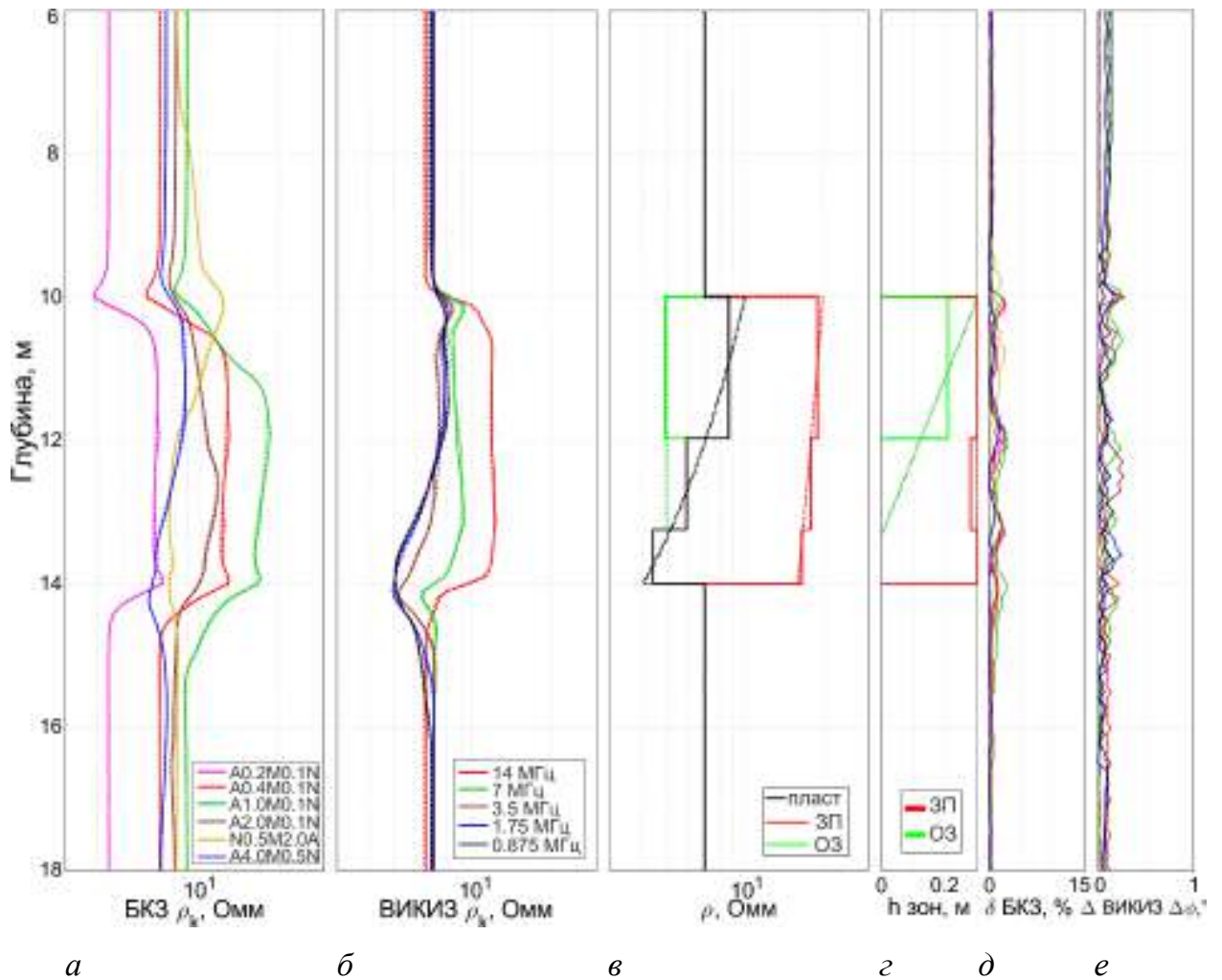


Рисунок 2.5.3 – Параметры модели коллектора сложного строения с плавным изменением УЭС по глубине (в, г) и сигналы в ней (пунктиром – а, б) и подобранной модели с грубой аппроксимацией плавного изменения УЭС с глубиной (в, г) и сигналы в ней (сплошными линиями – а, б); невязки сигналов, рассчитанных в двух моделях: относительная для БКЗ (д) и абсолютная для ВИКИЗ (е)

Подобные расчеты были проведены для четырех характерных моделей коллекторов (по две изотропных и анизотропных, с осложнением карбонатными прослоями повышенного УЭС и без них). По всем моделям получены идентичные результаты. Высокая сложность расчета сигналов в моделях с плавным изменением УЭС не позволила рассмотреть весь спектр тестируемых моделей. Тем не менее, полученные результаты подтверждают правомерность предлагаемой параметризации среды для оценки вертикального УЭС с помощью совместной инверсии сигналов БКЗ и ВИКИЗ.

**Влияние отклонения угла пересечения скважины и плоскости границ пластов
от нормального**

Обычно песчано-глинистые отложения характеризуются постоянным УЭС в плоскости напластования и отличным – в направлении, перпендикулярном ей. Использование осесимметричных приборов и модели среды подразумевает, что скважина пересекает породы по нормали к напластованию. Несмотря на то что для Западной Сибири характерно горизонтально-слоистое залегание, локальные структуры, а также изгибы траектории скважины могут приводить к отклонению скважины от нормали к поверхности напластования. Поэтому необходимо проанализировать, как влияет нарушение осевой симметрии на результаты обработки данных. Рассмотрим четыре типа моделей (Рисунок 2.5.4).

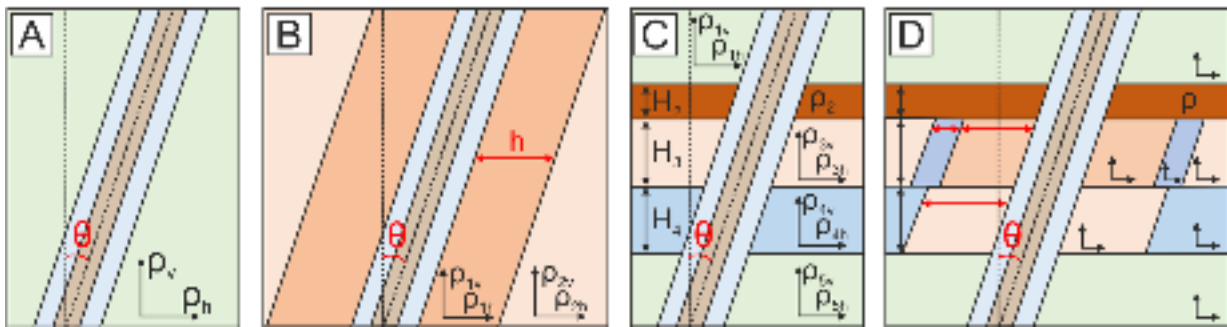


Рисунок 2.5.4 – Основные типы моделей трансверсально-изотропных отложений, пересеченных наклонной скважиной: А – модель мощного непроницаемого пласта; В – модель мощного проницаемого пласта; С – модель непроницаемого слоистого разреза; D – модель слоистого коллектора с пластами разного насыщения

Наиболее анизотропными в терригенном разрезе обычно являются глинистые отложения, коэффициент анизотропии которых по некоторым данным может достигать значений $\lambda = 3.0\text{--}3.5$ [Triaxial Induction..., 2006; Трехмерный индукционный..., 2008]. Результаты численного моделирования сигналов БКЗ, рассчитанных напротив мощных непроницаемых сильно анизотропных глинистых отложений (тип модели А), приведены на рисунке 2.5.5, а, б.

При отсутствии скважины распределение объемных зарядов в однородной среде зависит от конфигурации зонда, угла θ и коэффициента анизотропии. Наличие скважины изменяет распределение зарядов в среде, и появляется зависимость сигналов от соотношения УЭС бурового раствора и среды. Однако для рассматриваемого диапазона УЭС и

угла наклона изменение приращений сигналов с увеличением контраста выражается в смещении максимальной чувствительности к более длинным зондам (Рисунок 2.5.5, а, б), при этом максимальное приращение остается практически неизменным и не превышает 3.7% при отклонении скважины от вертикали до 15° .

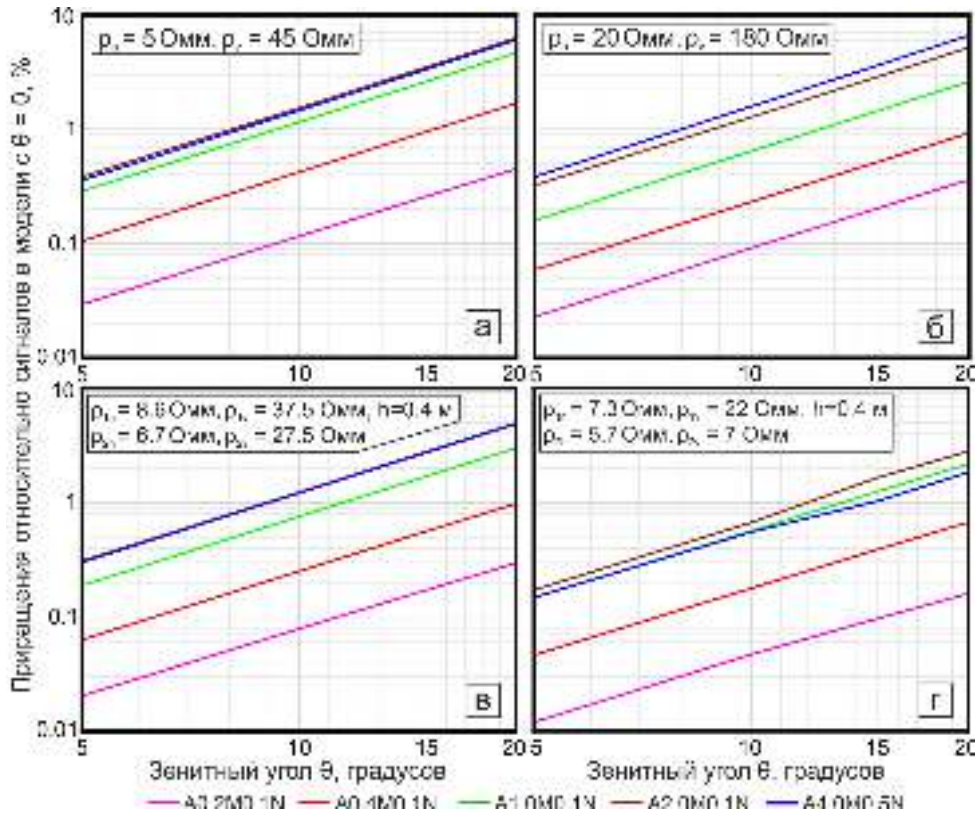


Рисунок 2.5.5 – Приращения сигналов БКЗ в моделях А (а, б) и В (в, г) относительно сигналов в осесимметричной модели в зависимости от угла между осью скважины и вертикалью

С увеличением коэффициента анизотропии чувствительность сигналов градиент-зондов к вертикальному УЭС снижается, поэтому в диапазоне значений УЭС, типичных для глин Западно-Сибирского разреза, относительные приращения не превышают 4.5% при $\theta = 15^\circ$ и 2% при $\theta = 10^\circ$ даже для экстремального значения $\lambda = 5$.

Песчано-глинистые коллекторы обычно менее анизотропные, чем глинистые отложения, но для этих пластов характерно наличие зоны проникновения (ЗП). На рисунке 2.5.5 в, г приведены результаты расчета сигналов БКЗ в мощном песчано-глинистом коллекторе (тип модели В). Параметры модели на рисунке 2.5.5в определены по формулам [Nagiwara, 2013] равномерного переслаивания сильно анизотропных глин ($\rho_h = 4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$,

$\rho_v = 45 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) и изотропного нефтеводонасыщенного песчаника с контрастной по УЭС ЗП ($\rho_{\text{пласта}} = 10$, $\rho_{\text{зп}} = 35 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $h = 0.4 \text{ м}$). Следует отметить, что при большом контрасте УЭС коэффициент анизотропии в пласте и ЗП отличается слабо, поэтому приращения сигналов также практически линейны в билогарифмическом масштабе, как и для моделей без проникновения. В модели на рисунке 2.5.5г достигается высокий контраст по λ между ЗП и неизменной частью пласта в результате равномерного переслаивания изотропных глин ($\rho=4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) и изотропного песчаника ($\rho_{\text{пласта}} = 10$, $\rho_{\text{зп}} = 40 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $h = 0.4 \text{ м}$). УЭС ЗП взята заведомо выше характерных значений для Западной Сибири, чтобы увеличить контраст по λ . В таких моделях зависимость приращений от угла наклона усложняется. Однако в рассматриваемом диапазоне УЭС отклонение зависимости от линейной пренебрежимо мало.

Поскольку отклонения сигналов в моделях бесконечно мощных пластов малы, решающим фактором, влияющим на соответствие численной модели реальной среде, является наклон пластов по отношению к скважине. Поскольку в методе БКЗ отсутствует фокусировка тока, отклонение среды от осесимметричной при наличии контрастного напластования может изменить конфигурацию тока и, как следствие, измеряемые сигналы.

На рисунке 2.5.6 приведена модель типа С терригенного коллектора, осложнённого карбонатизацией, и сигналы, рассчитанные для наклонной и вертикальной скважины. Для удобства сравнения сигналы, рассчитанные для наклонной скважины, спроецированы на вертикаль. Слой с повышенным УЭС соответствует карбонатизированному песчанику. Два нижележащих слоя – нефтенасыщенному и водонасыщенному коллекторам. Параметры коллектора рассчитаны для переслаивания изотропного песчаника (нефтенасыщенный песчаник $\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, водонасыщенный: $\rho = 4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) и анизотропных глин с параметрами, как в подстилающем пласте ($\rho_h = 4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_v = 12 \text{ Ом}\cdot\text{м}$). Глинистость коллектора 20%.

Максимальное расхождение сигнала для зонда А4.0М0.5N достигает 14%. Для того чтобы оценить, насколько эти расхождения влияют на параметры модели, определяемые в предположении нормального пересечения пластов, проведено две инверсии сигналов: с проекцией рассчитанных в модели с наклонной скважиной на вертикаль и без. Поскольку пласты непроницаемые, а сигналы не зашумлены, при инверсии все параметры восста-

навливаются единственным образом и отличия параметров от истинных связаны исключительно с влиянием наклона. В обоих случаях точность подбора сигналов значительно превышает точность измерения реальных приборов БКЗ.

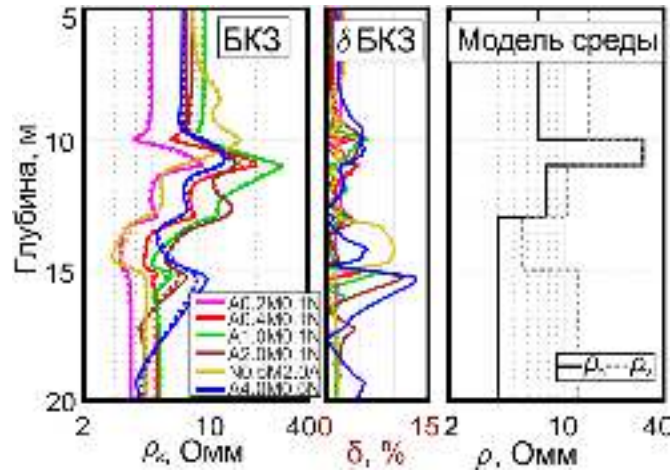


Рисунок 2.5.6 – Сигналы градиент-зондов в модели С, пересеченной наклонной ($\theta=15^\circ$, пунктирные линии) и вертикальной скважиной (сплошные линии), относительное расхождение сигналов δ и параметры модели

По результатам инверсий с наименьшей точностью восстанавливается вертикальное УЭС подстилающей глинистой толщи – определяемое значение на 20% ниже истинного при инверсии без проекции измерений на вертикаль и на 16% – при инверсии с проекцией. Для верхней толщи – 14% и 12% соответственно. Погрешность определения вертикального УЭС коллекторов не превышает 7% в обоих случаях. Горизонтальное УЭС всех пластов, кроме карбонатизированного, определяется с погрешностью менее 3%. Погрешность определения УЭС карбонатизированного пропластка 8% для проецированных сигналов и 9% – для непроецированных.

Следует отметить, что в этой и других рассмотренных моделях ошибки определения параметров немного ниже, если проецировать измерения на вертикаль. При практических измерениях информация об углах пересечения границ может быть получена с помощью наклономеров или пластовых микроимджеров. Тем не менее, даже без использования этого приема значения параметров восстанавливаются с приемлемой для практического применения точностью.

Добавление в рассматриваемую модель радиального строения не приводит к существенному изменению δ (Рисунок 2.5.7). Однако в такой модели восстановление вертикального УЭС проницаемых пластов только по сигналам БКЗ в гораздо большей степени затруднено сильной эквивалентностью модельных параметров.

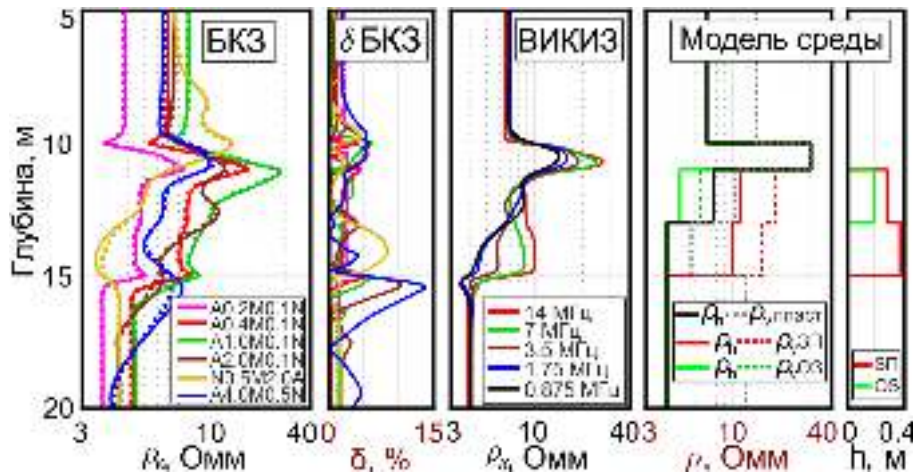


Рисунок 2.5.7 – Сигналы БКЗ и ВЭМКЗ в модели D , пересеченной наклонной ($\theta=15^\circ$, пунктирные линии) и вертикальной скважиной (сплошные линии), относительное расхождение сигналов БКЗ δ и параметры модели

В рассматриваемых моделях угол наклона $\theta = 15^\circ$ не оказывает существенного влияния на сигналы ВИКИЗ [Исследование возможностей..., 2016; Копытов, Сухорукова, 2018]: отклонения сигналов, вызванные наклоном скважины, не превышают точности расчета. Добавление сигналов ВИКИЗ позволяет провести совместную инверсию сигналов по разработанной методике (Рисунок 2.5.8, измерения спроецированы на вертикаль).

Сигналы подбираются с высокой точностью, расхождение лишь в отдельных точках превышает погрешности измерения реальной аппаратуры. Значения относительной невязки между истинными и определяемыми значениями параметров неизменных частей пластов приведены в таблице 2.5.1. УЭС неизменной части пластов определяются даже лучше, чем в модели без проникновения, что связано с добавлением в инверсию сигналов ВИКИЗ. Погрешности определения параметров радиальных зон не приводятся, потому что разделить влияние на них наклона скважины и модельной эквивалентности очень сложно. Тем не менее, в рассматриваемой модели они определяются близко к истинным (см. рисунки 2.5.7 и 2.5.8).

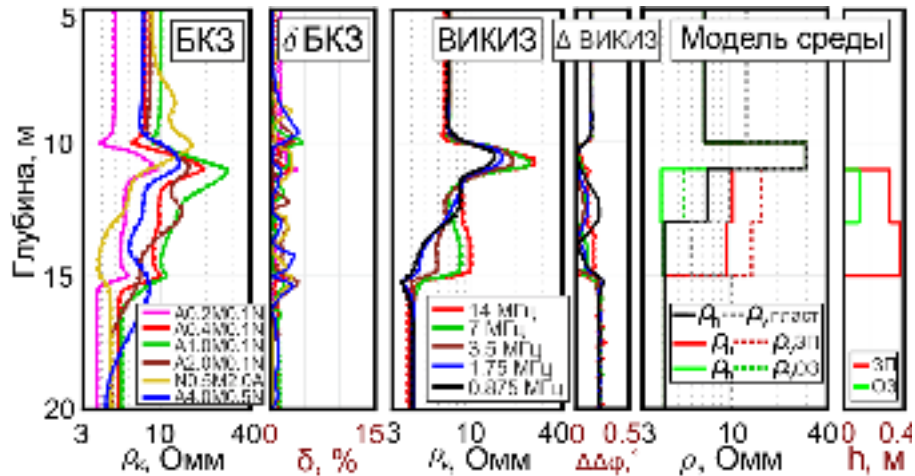


Рисунок 2.5.8 – Результат совместной двумерной инверсии сигналов, рассчитанных в модели D при $\theta=15^\circ$. Сигналы БКЗ и ВИКИЗ: исходные (пунктирные линии) и подобранные (сплошные линии); относительное расхождение сигналов БКЗ (δ); абсолютное расхождение сигналов ВЭМКЗ (Δ); подобранные параметры модели

Таблица 2.5.1 – Относительная погрешность определения пластовых параметров

	Глинистая покрышка	Карб. песчаник	Песчаник (нефть)	Песчаник (вода)	Подстилающая глинистая толща
$\delta(\rho_h) / \delta(\rho_v)$, %	1.7 / 2.1	4.3 / 4.3	6.5 / 4.1	0.5 / 8.9	2.2 / 6.7

Аналогичным образом проанализированы и другие типичные модели терригенных отложений Западной Сибири, приведенные на рисунке 2.2.1. Установлено, что применение осесимметричных моделей среды при отклонении угла пересечения скважины и поверхности напластования от нормального до 15° не приводит к существенному увеличению погрешностей определения модельных параметров [Петров, Сухорукова, Нечаев, 2019]. При небольшом контрасте УЭС пластов параметры могут корректно определяться и при больших значениях θ , но в этих случаях требуется анализ применимости с учетом условий конкретного месторождения.

Таким образом, с одной стороны, в терригенном разрезе использование совместной инверсии сигналов БКЗ и ВЭМКЗ для восстановления вертикального УЭС обосновано при отклонении скважины от нормали к поверхности напластования до 15° , а с другой, определить этот угол без использования специальных приборов (пластовых микроимиджеров или наклономеров) может быть невозможно, поэтому применение оправдано на

месторождениях с хорошо изученным геологическим строением. В противном случае возможны большие ошибки определения параметров из-за недостаточного соответствия интерпретационной модели реальной среде.

2.6. Выводы и результаты

По результатам анализа сигналов электрокаротажа в реалистичных моделях терригенных отложений Западной Сибири показано, что кажущиеся 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 инверсии данных БКЗ можно не только естественным образом учитывать в каждой точке измерения вклад всех формирующих сигнал пластов, но и оценивать вертикальное УЭС отложений.

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.

Разработан алгоритм оценки погрешности восстановления модельных параметров при инверсии данных БКЗ и ВЭМКЗ на основе статистического моделирования. С применением алгоритма показана недостаточность оценки погрешности на основе линейного приближения 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.

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, рассмотрено влияние на измеряемые сигналы и результаты двумерной инверсии отклонения угла пересечения скважиной геоэлектрических границ от нормального как в моделях бесконечно мощных пластов, так и в моделях, сложенных относительно тонкими пластами. Обосновано применение инверсии сигналов БКЗ и ВЭМКЗ на базе двумерных осесимметричных моделей в терригенном разрезе при отклонении угла пересечения скважины и границ пластов от нормального до 15 градусов.

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.

Глава 3

МЕТОДИКА КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ БОКОВОГО КАРОТАЖНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОЙ ИНВЕРСИИ В КЛАССЕ ДВУМЕРНЫХ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

3.1. Анализ кондиционности каротажного материала

Для проведения двумерной инверсии с определением вертикальной компоненты УЭС по данным БКЗ или БКЗ и ВЭМКЗ, измеренных в субвертикальных скважинах, чрезвычайно важно качество каротажного материала. Данные БКЗ и ВЭМКЗ должны быть представлены с достаточным шагом дискретизации (0.1–0.2 м), не искажены ошибками пересчета скорости каротажа в глубину и измерены с небольшим временем между каротажными операциями. Невыполнение этих требований может критически сказываться на результатах интерпретации, так как используется двумерное численное моделирование и определяемые параметры среды взаимно влияют друг на друга. При большом времени между каротажными операциями или при проведении между ними операций в скважине, изменяющих прискважинную область, построение совместной модели может оказаться невозможным, так как измерения проводились в разных условиях и соответствуют разным средам [Yeltsov, Nesterova, Kashevarov, 2011]. Оптимальны измерения, выполненные каротажными комплексами за одну спускоподъемную операцию.

Среди наиболее часто встречающейся несогласованности данных – неверные показания резистивиметра, смещение уровней отдельных зондов электрокаротажа на постоянный коэффициент или константу. Неправильная конструкция резистивиметра может приводить к существенной зависимости его показаний от УЭС прискважинного пространства, в этом случае диаграмма УЭС раствора в скважине начинает повторять диаграмму БК. Неправильная калибровка резистивиметра, как и неправильная оценка диаметра скважины и прибора, и смещенный уровень сигналов БКЗ могут существенно повышать ошибку определения вертикального сопротивления.

Первичную проверку кондиционности данных ВЭМКЗ и БКЗ можно провести с помощью совместной одномерной инверсии пластовых значений в предположительно

непроницаемых пластах достаточной толщины и однородных по УЭС. Выбор таких пластов основывается на выдержанности значений кажущегося УЭС ВЭМКЗ и БКЗ и отсутствии на диаграммах БКЗ признаков пересечения тонких изолирующих прослоев. Предположение об отсутствии проникновения строится на априорной информации и анализе данных комплекса каротажа. По результатам 1D инверсии в таких пластах должна восстанавливаться единая реалистичная модель, описывающая сигналы БКЗ и ВЭМКЗ с практически значимой точностью. При этом параметры скважины определяются по данным кавернометрии и резистивиметрии и не участвуют в подборе.

Согласованность уровней сигналов является необходимым, но недостаточным условием: из-за нарушений технологии каротажа может изменяться форма сигналов при пересечении пластов, также данные измерения могут быть искажены различными коррекциями при первичной интерпретации. Если есть основания полагать, что полученные данные могли быть искажены, следует проверить возможность подбора сигналов с помощью двумерной инверсии на относительно простом интервале. Оптимально, если он будет сложен непроницаемыми породами.

Если известен угол, под которым скважина пересекает напластование, необходимо скорректировать измеренные данные, спроецировав измерения на нормаль к поверхности напластования.

В случае сильного влияния смещения зонда с оси скважины на данные ВЭМКЗ, необходимо ввести в них коррекцию за эксцентриситет (пересчитать на осесимметричное положение зондов) [Игнатов, Сухорукова, 2009]. Однако следует тщательно проанализировать результат, так как ввод коррекции может исказить соотношение сигналов зондов, если прибор находится не на стенке скважины, а в промежуточном положении [Литвиченко, Сухорукова, Нечаев, 2018].

Если обрабатываемые данные записаны на разных спускоподъемных операциях, необходимо увязать их с точностью до шага дискретизации по глубине, при этом, по возможности, не прибегая к масштабированию (сжатию или растяжению). В случае, если достичь увязки данных смещением невозможно, предпочтительнее подвергать коррекции данные ВЭМКЗ, так как зачастую градиент-зонды метода БКЗ фиксируют настолько сложный отклик, что достоверно определить необходимость масштабирования данных может быть невозможно.

3.2. Построение стартовой геоэлектрической модели

Для построения стартовой модели предлагается использовать пластовую разбивку по комплексу данных ГИС и одномерную инверсию сигналов ВЭМКЗ и/или БКЗ с подбором цилиндрически-слоистой изотропной модели с учётом данных резистивиметрии и кавернометрии. Пластовая разбивка должна быть детальной и учитывать контрастные по УЭС прослой, даже если они очень тонкие, так как в противном случае подобрать сигналы градиент-зондов с необходимой точностью может оказаться невозможным. В случае анализа непроницаемых интервалов вместо 1D инверсии данных БКЗ и/или ВЭМКЗ для создания стартового приближения ρ_h можно использовать данные бокового каротажа.

Все операции по созданию стартовой модели могут быть выполнены, например, в автоматизированной системе EMF Pro [*Новый аппаратный...*, 2010]. Поскольку при одномерной интерпретации возможности оценки вертикального УЭС очень ограничены, в создаваемой стартовой модели во всех пластах ρ_h и ρ_v считаются равными и варьируются отдельно лишь на этапе 2D инверсии. На этапе построения стартовой модели критически важно правильно предположить тип интерпретационной модели каждого пласта для двумерной инверсии (наличие проникновения ФБР и тип радиального распределения УЭС в коллекторах).

Для двумерной инверсии следует выбирать более протяженный по скважине интервал данных, чем целевой, так как на сигналы зондов БКЗ очень существенное влияние оказывают вмещающие породы. Оптимально, если интервал подбора ограничен сверху и снизу мощными однородными пластами, однако на практике это встречается редко. По результатам тестирования на синтетическом материале установлено, что для минимизации влияния вмещающих пород на определение модельных параметров в сложных геологических условиях достаточно увеличить целевой интервал на 2 длины самого длинного зонда БКЗ сверху и снизу.

Типы геоэлектрических моделей, необходимые и достаточные для объяснения сигналов в терригенных отложениях Западной Сибири с практически значимой точностью, были рассмотрены в пункте 2 главы 2. Последствия неверного определения типа модели – в пункте 4 главы 2.

Отдельного рассмотрения требует вопрос расстановки горизонтальных границ для создания пластовой разбивки в условиях недостаточности данных, например, при интерпретации архивных данных БКЗ при неудовлетворительном качестве записи данных радиоактивного каротажа и каротажа ПС. Также зачастую в архивных данных отсутствуют данные бокового каротажа. Поэтому единственной возможностью определения положения горизонтальных геоэлектрических границ становится анализ данных БКЗ.

Алгоритм расстановки границ по данным БКЗ на основе искусственной нейронной сети

Расстановка горизонтальных границ в геологическом разрезе с целью выделения однородных по свойствам интервалов – классическая подзадача интерпретации данных ГИС. На сегодняшний день разработан широкий набор алгоритмов автоматического выделения пластов по данным различных методов или комплексов методов [Maiti, Tiwari, 2005; Бердов, Власов, Лапковский, 2012]. Большая их часть основана на градиентном или дисперсионном подходах. Однако они неприменимы для БКЗ, поскольку градиент-зонды являются несимметричными. Для диаграмм БКЗ характерна сложная асимметричная форма, зависящая как от толщины пласта, контраста УЭС пласта и вмещающих пород, так и от параметров скважины. Переход градиент-зондов через границу отмечается экстремумами на диаграммах кажущегося сопротивления (КС). Это существенно упрощает их выделение. Но в разрезах с переслаиванием дифференцированных по УЭС пород на диаграммах возникает большое число экстремумов, не связанных с пересечением границы. Это не позволяет напрямую использовать их в качестве индикаторов границ. Дискретность точек измерения сигналов по глубине смещает положения экстремумов и уменьшает их значения. Влияние вертикального УЭС также изменяет форму диаграмм при подходе к анизотропным пластам. Таким образом, с одной стороны, для метода БКЗ трудно сформулировать надежный формальный критерий выделения границы, а с другой, пропуск тонкого, но электрически контрастного слоя – характерная ошибка градиентного и дисперсионного методов – может критически сказаться на результатах инверсии.

В настоящее время искусственные нейронные сети и машинное обучение широко используются при обработке и интерпретации геофизических данных. Например, для совместной корреляции данных каротажа и сейсморазведки [Transforming seismic..., 2018],

выделения геологических объектов на сейсмических изображениях [Zhang, Wang, Chen, 2018] и ускорения прямых и обратных задач БКЗ [Агбаш, Соболев, 2016].

Для решения задачи автоматической расстановки границ по данным БКЗ совместно со старшим научным сотрудником ИНГГ СО РАН Г.Н. Логиновым разработан алгоритм на основе полносвязной свёрточной нейронной сети [Логинов, Петров, 2019]. При создании этого алгоритма личный вклад диссертанта – создание генератора моделей, расчет синтетических данных, подготовка и разбивка практических данных, формирование обучающей выборки, анализ результатов. Разработка архитектуры, реализация и обучение нейронной сети осуществлена Г.Н. Логиновым.

Обучающая выборка и процесс обучения

Для решения задачи автоматизации выделения границ с помощью свёрточной нейронной сети необходимы представительные модели, содержащие горизонтальные границы между слоями различной толщины всех типов радиального строения. Обучение искусственной нейронной сети проводилось на синтетических сигналах БКЗ комплекса СКЛ-76 (НПП ГА «Луч», Новосибирск) [Аппаратурный комплекс..., 2015] и практических сигналах комплексов СКЛ-76 и К1А-723 (НПФ «Геофизика», Уфа). Все данные были представлены с шагом дискретизации измерений по глубине 0.2 м.

Обучение проводилось в два этапа. На первом этапе использовались синтетические сигналы БКЗ комплекса СКЛ-76, рассчитанные с помощью конечно-элементного алгоритма комплекса AlondraWL [Эпов, Шурина, Нечаев, 2007] с учетом влияния скважины и вытеснения прибором проводящего раствора. Пять случайно сгенерированных моделей геологического разреза содержали по 500 пластов (суммарная толщина от 400 до 650 м), соответствующих по УЭС терригенным отложениям Западной Сибири (Таблица 3.2.1). Параметры пластов внутри литотипов распределены равномерно. Толщина пластов распределена логнормально со сдвигом на 0.15 м. Выделение пропластков толщиной менее шага дискретизации обычно считается невозможным, однако при практических измерениях они могут присутствовать в разрезе и влиять на сигналы. Поэтому, для того, чтобы сделать выборку более приближенной к регистрируемым на практике данным, в синтетические модели добавлены прослойки толщиной менее шага дискретизации. Добавление таких тонких слоев можно рассматривать как дополнительное зашумление данных.

Таблица 3.2.1 – Параметры синтетических моделей терригенных отложений Западной Сибири

№	Литотип	ЗП		ОЗ		Неизмененный пласт
		УЭС, Ом·м	h, м	УЭС, Ом·м	h, м	УЭС, Ом·м
1	Песчаник нефтенасыщенный	15–30	0.2–0.7	–	–	16–30
2	Песчаник нефтеводонасыщенный	15–30	0.2–0.6	3–6	0.1– 0.25	7–20
3	Песчаник водонасыщенный	12–20	0.2–0.7	–	–	3–8
4	Песчаник карбонатизированный	–	–	–	–	$\rho_h=20-500 / \lambda=1.0-1.2$
5	Глинистые отложения	–	–	–	–	$\rho_h=3-8 / \lambda=1.0-3.5$
6	Анизотропный песчано-глинистый коллектор	*	*	*	*	*

Примечание. Параметры анизотропных песчано-глинистых коллекторов определялись по формулам для переслаивания песчаных (№ 1–3) и глинистых (№ 5) отложений [Hagiwara, 2013].

Модели различаются распределением толщин пластов, соотношением числа пластов различных литотипов, значением УЭС бурового раствора. Разделение на литотипы условное: дифференцировать отложения по данным БКЗ можно лишь по величине УЭС и типу его радиального изменения. Поэтому используемые модели следует рассматривать как геоэлектрические: они хорошо описывают большинство вероятных форм сигналов вблизи границ между разными терригенными породами, но не являются литологическим описанием разреза. Фрагмент модели и пример синтетических сигналов приведен на рисунке 3.2.1.

Для создания обучающей выборки отрезки диаграмм БКЗ и соответствующие им положения границ пластов формировались случайным образом из синтетических и практических данных. Пластовая разбивка практических измерений проводилась по данным комплекса скважинной электрометрии. Общее количество используемых практических данных составило 1 км (5000 отчетов по глубине). Формируемые из одной модели отрезки могли частично перекрываться. Обучающая выборка составила 4000 примеров записи сигналов БКЗ и соответствующих им границ, по 64 отсчета каждая. Пример такого от-

резка приведен на рисунке 3.2.2. Число отсчетов в примерах для обучения выбрано экспериментально. На вход нейронной сети данные подавались в логарифмическом масштабе, дополнительной обработки или масштабирования не проводилось. В результате применения нейронной сети ко входным данным, каждой отметке глубины присваивается вероятность наличия границы. Поскольку применяется сверточная модель нейронной сети, это позволяет применять обученную модель к данным произвольной длины.

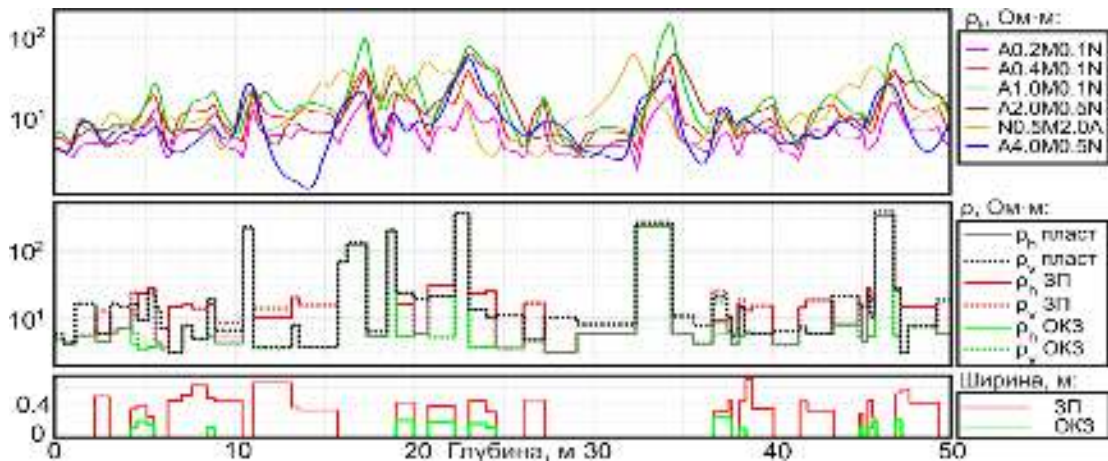


Рисунок 3.2.1 – Фрагмент модели терригенных отложений и рассчитанные в ней сигналы БКЗ

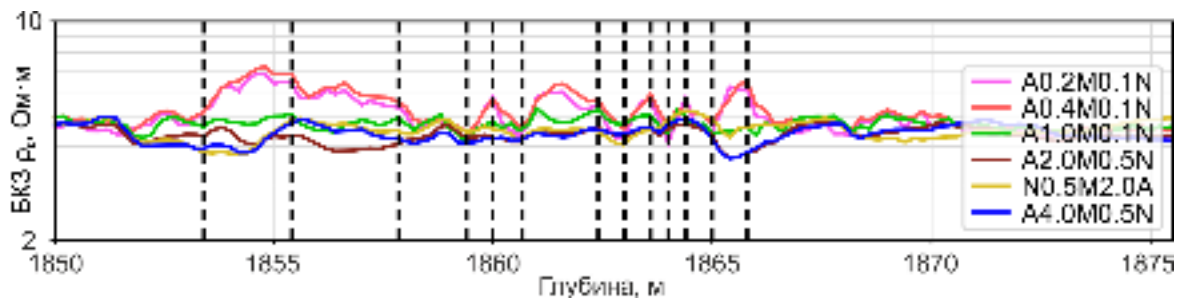


Рисунок 3.2.2 – Пример интервала практических диаграмм, измеренных в скважине Федоровского месторождения, использованных для обучения сети. Черным пунктиром – границы пластов

Для выбора оптимальных параметров нейронной сети проведена серия экспериментов. Эксперименты заключались в подборе оптимальных длины и числа фильтров. В таблице 3.2.2 представлен сравнительный анализ качества работы обученных нейронных сетей на полном имеющемся наборе модельных и реальных данных, состоящем из 17000

точек измерений по глубине. Для большинства методов машинного обучения и нейронных сетей в частности, выбор метрик качества работы не очевиден, поэтому в таблице приведены 2 метрики, по которым можно оценить эффективность предложенного подхода: площадь под кривой ROC (Receiver Operating Characteristic, рабочая характеристика приемника) и минимальная точность по всем рассмотренным тестовым моделям разрезов. Под точностью понимается процент правильных ответов по отношению к общему числу примеров. Такой подход к анализу результатов в таблице 3.2.2 был выбран с целью определения минимального порога работоспособности подхода для разных разрезов.

Таблица 3.2.2 – Результаты экспериментов по выбору параметров нейронной сети

Количество фильтров / длина фильтра	3 слоя	4 слоя	5 слоев	6 слоев
16 / 16	89.4 / 66.4	87.9 / 60.9	87.9 / 67.9	89.4 / 66.1
16 / 32	88.9 / 60.9	91.9 / 64.2	85.4 / 60.2	90.0 / 65.3
32 / 16	87.0 / 60.4	83.1 / 59.2	77.3 / 51.2	75.7 / 51.4
32 / 32	87.2 / 61.4	80.8 / 58.9	77.9 / 53.8	75.1 / 56.5

Примечание. В ячейках указана площадь под кривой ROC и точность.

По результатам экспериментов выбрана нейронная сеть из четырех слоев с 16 фильтрами, каждый длиной 32 отсчета. Необходимо отметить, что в случае модельных данных точность в среднем составляла выше 90%, тогда как на реальных данных могла составлять около 60%. Такой результат, помимо прочего, связан с высокой степенью неоднозначности выделения границ на реальных данных. Так, метрика точности может значительно снизиться, если нейросеть детектирует границу в соседнем отсчете от указанного интерпретатором. Очевидно, что при практическом использовании алгоритма этот эффект не будет иметь существенного значения.

Обученная нейронная сеть была применена к каждой модели скважины по отдельности. В качестве основного критерия успешности работы обученной нейронной сети использовалась площадь под графиком кривой ROC для разных моделей околоскважинного пространства (Рисунок 3.2.3). Кривая ROC демонстрирует соотношение верных положительных (True, наличие границы) срабатываний алгоритма к ложным положительным срабатываниям. Верным положительным срабатыванием называется случай, когда алгоритм правильно указывает положение границы. Ложным положительным срабатыванием

называется случай, когда алгоритм указывает наличие границы там, где её нет. По вертикальной оси откладывается процент верных положительных ответов, по горизонтальной – процент ложноположительных ответов. Скорость верных положительных срабатываний – это отношение верно предсказанных положительных ответов к общему числу положительных значений (True, наличие границы). Скорость ложных положительных срабатываний – это отношение числа ложных положительных срабатываний к общему числу негативных значений (False, отсутствие границы).

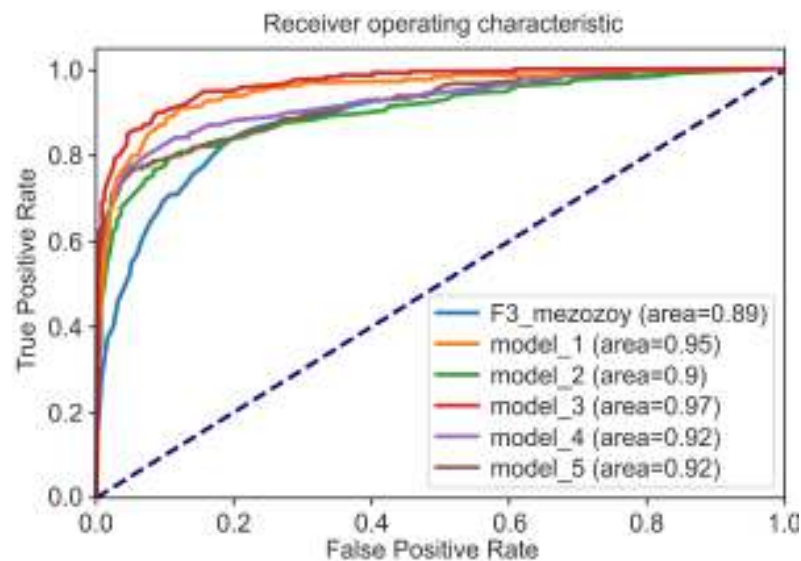


Рисунок 3.2.3 – ROC кривые применения сверточной полносвязной нейронной сети для разных синтетических моделей околоскважинного пространства (*model_1* – *model_5*) и реальных данных. В легенде указана площадь под графиком ROC-кривой (*area*)

Для синтетических данных (*model_1* – *model_5*) площадь под кривой составляет не менее 90%, что соответствует высокой точности работы алгоритма. Для реальных данных с Федоровского месторождения (*F3_mezozoy*), площадь составляет 89% от максимально возможной площади под кривой ROC, что также демонстрирует высокую надежность предлагаемого подхода.

Применение и результаты

Обученная нейронная сеть протестирована на модельных и реальных данных. На рисунке 3.2.4 представлены результаты тестирования алгоритма на практических данных,

измеренных на Рускинском месторождении. Сопоставление выделенных границ с данными высокочастотного изопараметрического каротажного индукционного зондирования (ВИИКЗ) и бокового каротажа (БК) показывает работоспособность предложенного подхода.

Тем не менее, на этом примере можно выделить пропущенную границу (показана пунктирной линией) и неоднозначную работу на интервале с плавным изменением УЭС с глубиной (хх70 – хх72 м). В таких условиях алгоритм аппроксимирует плавное изменение достаточно частым кусочно-постоянным разбиением. Такое поведение может быть как верным, поскольку большинство существующих алгоритмов инверсии БКЗ основаны на кусочно-постоянной параметризации среды, так и приводить к выделению слишком тонких прослоев там, где в этом нет необходимости.

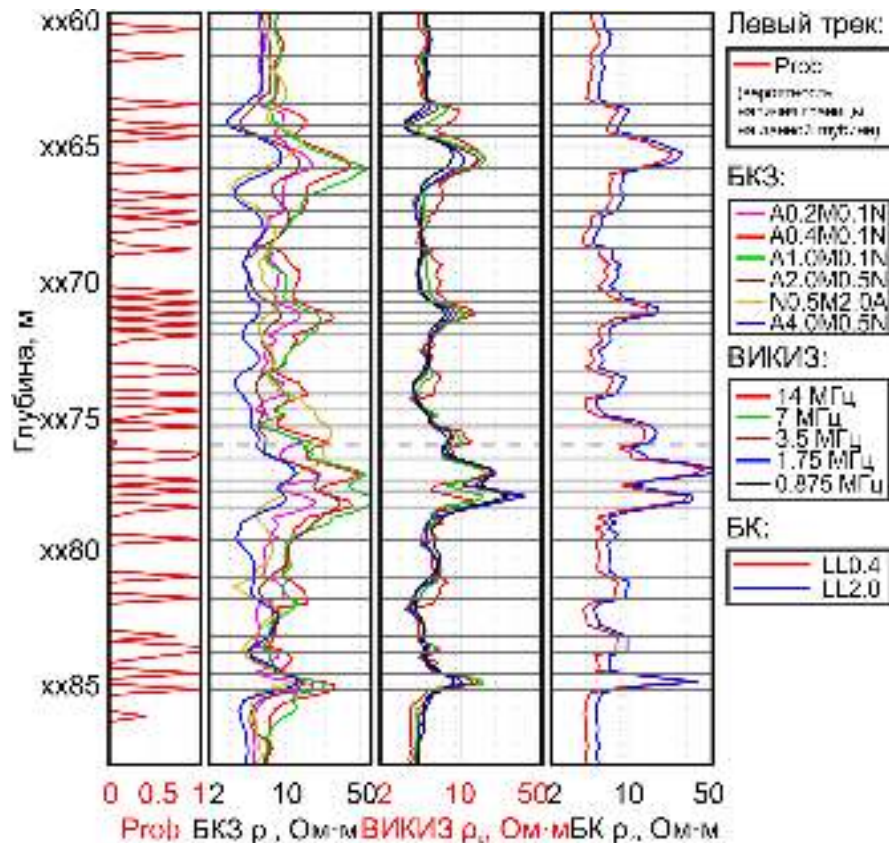


Рисунок 3.2.4 – Результат применения алгоритма к практическим данным, измеренным на Рускинском месторождении. Сплошными серыми горизонтальными линиями показаны геоэлектрические границы, выделенные алгоритмом. Пунктиром показана граница, пропущенная алгоритмом

В обучающей выборке акцент сделан на интервалы переслаивания достаточно тонких прослоев, так как именно такие разрезы наиболее сложны для ручной расстановки границ, а для корректного восстановления их параметров необходима двумерная инверсия. Для расширения условий применимости алгоритма и повышения его точности желательно увеличить представительность обучающей выборки примерами сигналов, измеренных в разных геологических условиях. Рассматриваемая архитектура нейронной сети не требует больших вычислительных ресурсов для обучения. Это позволяет выполнить обучение заново или провести дообучение для адаптации под конкретные геологические условия.

Следует отметить, что применительно к практическим данным в разрезах, где изменение УЭС по вертикали может отличаться от кусочно-постоянного, само понятие границы не всегда применимо в полной мере. Результатом работы разработанного алгоритма является вероятность нахождения границы в каждой точке измерений по глубине, её преобразование в пластовую разбивку производится с помощью порогового коэффициента. Поэтому вопрос о правильности расстановки границ в том или ином случае всегда будет зависеть от мнения конкретного интерпретатора. Но даже в самых сложных средах с тонким переслаиванием или градиентным изменением УЭС по глубине ручная работа сводится к исправлению относительно небольшого числа допущенных алгоритмом ошибок на основе анализа значений вероятности, что по сравнению с ручной расстановкой значительно ускоряет процесс и минимизирует ошибки в сложных разрезах.

Таким образом, разработанный алгоритм способен выделять в разрезе как достаточно мощные пласты, так и тонкие, но контрастные по УЭС пропластки, поэтому его использование позволяет генерировать применимую для двумерной инверсии данных пластовую разбивку сложных разрезов с минимальным участием интерпретатора. Существенно, что работа нейронной сети не требует серьезных вычислительных ресурсов и времени. Помимо этого, для применения нейронной сети не требуется выполнять предварительную подготовку данных: алгоритм может работать с необработанными измеренными данными, представленными в формате .las.

3.3. Оценка качества подбора измеренных данных

Стандартной практикой оценки качества подбора каротажных кривых при двумерной инверсии является поточечная невязка между наблюдаемыми и рассчитанными кривыми. При инверсии данных БКЗ и ВЭМКЗ обычно используется относительная невязка $\delta_{ij} = \frac{|\rho_{ij} - \rho_{ij}^a|}{\rho_{ij}} \cdot 100$, при инверсии данных ВЭМКЗ – абсолютная невязка $\Delta_{ij} = |\varphi_{ij} - \varphi_{ij}^a|$, где ρ_{ij} – кажущееся УЭС j -того зонда БКЗ в точке i по глубине, ρ_{ij}^a – кажущееся УЭС по j -тому зонду в этой точке, рассчитанное в подобранной модели; аналогично φ_{ij} – разность фаз для j -того зонда ВИКИЗ в точке i по глубине, φ_{ij}^a – разность фаз в точке i j -того зонда ВИКИЗ, рассчитанная по модели.

При инверсии данных одного метода такой подход является полностью оправданным, так как единственной информацией о положении горизонтальных границ являются сами подбираемые диаграммы, измеренные одним прибором и за одну спускоподъемную операцию. Такие данные естественным образом увязаны между собой и не содержат внутреннего противоречия относительно положения горизонтальных границ. Однако при совместной инверсии данных различных методов, в данном случае методов БКЗ и ВЭМКЗ, измеренных одновременно, вопрос взаимной увязки данных по глубине стоит очень остро и зачастую не может быть решен с достаточной для двумерной инверсии точностью.

Работая с каротажными кривыми, увязанными сторонними специалистами, интерпретатор, с одной стороны, не может гарантировать достаточно точной увязки, а с другой, не имеет возможности оценить точность увязки при отсутствии резких геоэлектрических границ. При этом, даже если факт неувязки точно установлен, дополнительная увязка возможна лишь на величину, кратную шагу измерения, так как в противном случае возникает необходимость интерполяции данных, что приводит к потере информации. Также данные крайне нежелательно подвергать растяжению или сжатию, так как зачастую метод БКЗ имеет настолько сложный отклик, что достоверно определить необходимость масштабирования данных может быть невозможно.

Взаимная неувязка данных приводит к тому, что при минимизации стандартного функционала невязки алгоритм инверсии будет находить некое среднее значение, максимально отвечающее данным обоих методов, однако при этом будут возникать резкие

«пички» поточечной невязки в областях границ, так как поточечная невязка не учитывает возможность ошибки определения глубины измерений.

Таким образом, в данном случае поточечная невязка отражает не качество инверсии, а лишь неустранимую неувязку практических данных. На рисунке 3.3.1 приведен пример: данные ВИКИЗ и БКЗ, рассчитанные с шагом 0.2 метра, не увязаны между собой на половину шага дискретизации. Псевдонаблюденные данные БКЗ сдвинуты по разрезу на 0.05 м вниз, а синтетические данные ВИКИЗ – на 0.05 м вверх относительно истинного положения, соответствующего модели. В такой ситуации поточечная невязка не отражает качества подбора модели, значительно превышая погрешности измерения реальных приборов. Если провести совместную инверсию таких данных, алгоритм «предпочтет» один из методов, тот, в котором неувязка по глубине порождает большее относительное расхождение сигналов. В случае высокоомного слоя это будет метод БКЗ, в случае низкоомного – ВИКИЗ, что обусловлено чувствительностью методов и особенностями зависимости сигналов от УЭС среды.

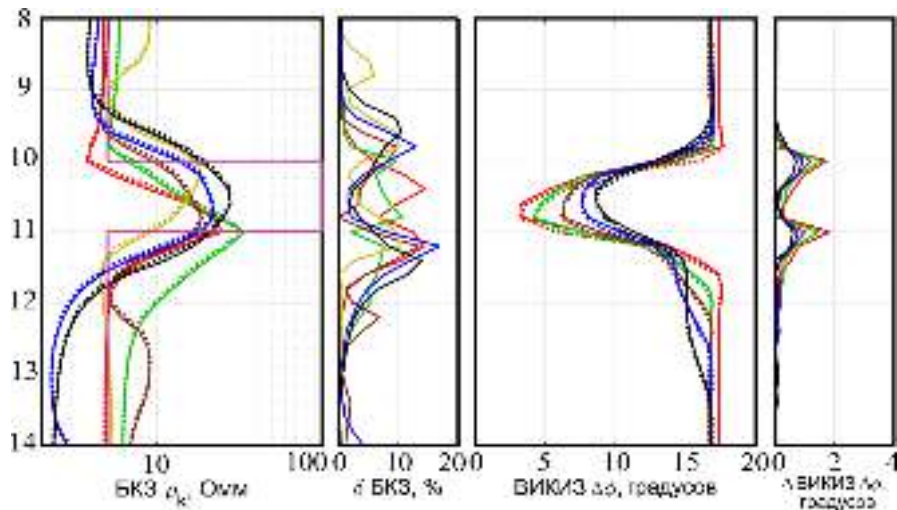


Рисунок 3.3.1 – Пример влияния неувязки данных БКЗ и ВИКИЗ на поточечную невязку. Пунктирными линиями показаны псевдонаблюденные данные, плохо увязанные по глубине, сплошными – рассчитанные в истинной модели. Лиловым цветом слева показано УЭС модели среды

В данном случае при минимизации невязки сигналов в модели с высокоомным слоем получается результат, изображенный на рисунке 3.3.2. Несмотря на максимально

точный подбор сигналов БКЗ, неувязка данных по глубине привела к «пичкам» поточечной невязки данных ВИКИЗ в областях границ амплитудой до 4 градусов, что значительно превышает погрешность измерения сигналов.

Учитывая сложность точной увязки кривых между собой и тот факт, что поточечная невязка отражает в большей степени качество увязки практических данных, а не качество подбора, для количественной оценки качества инверсии необходим критерий, который слабо зависит от неувязки данных по глубине менее, чем на половину шага дискретизации.

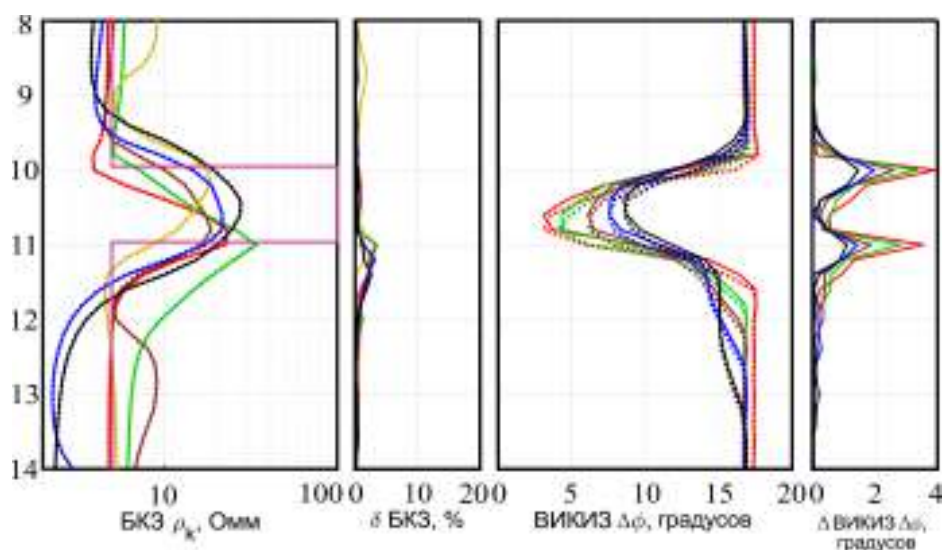


Рисунок 3.3.2 – Пример влияния неувязки данных БКЗ и ВИКИЗ по глубине на поточечную невязку. Пунктирными линиями показаны псевдонаблюденные данные, плохо увязанные по глубине, сплошными – рассчитанные для подобранной в ходе инверсии модели. Лиловым цветом слева показано УЭС модели среды

В качестве такого критерия предлагается использовать невязку на основе расстояния между наблюдаемыми и рассчитанными диаграммами сигналов. Различие с классической поточечной невязкой заключается в том, что в качестве меры разницы между измеренными и практическими данными принимается не разница между одноглубинными точками практических и синтетических данных, а минимальное расстояние между рассчитанным на заданной глубине значением и практическими данными, восстановленными с помощью линейной интерполяции в окрестностях соответствующей по глубине точки измерений (Рисунок 3.3.3).

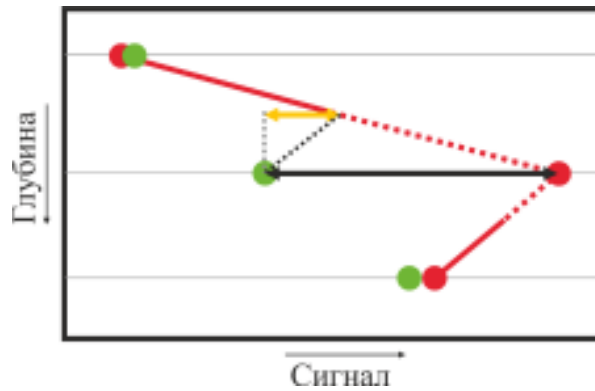


Рисунок 3.3.3 – Сравнительная схема классической поточечной невязки и невязки, основанной на расстоянии между рассчитанными и измеренными данными. Красными кружками показаны практические данные, зелеными – рассчитанные. Красные линии – интерполированные значения практических данных, пунктиром показан интервал поиска для невязки на основе расстояния, равный ± 0.5 шага дискретизации. Черная пунктирная линия – минимальное расстояние от точки рассчитанных данных до практической кривой в интервале поиска. Черная стрелка – разница между измеренными и рассчитанными данными в постановке классической поточечной невязки, желтая – в невязке на основе расстояния между кривыми

На рисунке 3.3.4 приведен пример невязки на основе расстояния, рассчитанной для данных, рассмотренных выше. Пример демонстрирует её преимущество перед традиционной поточечной невязкой для совместной инверсии данных различных методов: невязка на основе расстояния позволяет исключать из анализа расхождения, вызванные дискретностью данных и их неувязкой по глубине в пределах половины дискрета. В случае более сильной неувязки или расхождения из-за неточности модели определенная таким образом невязка будет вести себя очень схожим с классической поточечной невязкой образом.

Несмотря на очевидные преимущества, невязка на основе расстояния между диаграммами не очень хорошо подходит для оценки качества подбора данных, измеренных на интервалах очень тонких контрастных прослоев (мощность слоев менее 2 шагов дискретизации данных). При этом в таких случаях чем шире интервал поиска, тем меньше значение невязки на основе расстояния будет отражать степень схожести данных. Поэтому предлагается использовать интервал с шириной, равной максимальной точности увязки данных. Поскольку невозможно без применения интерполяции увязать данные

точнее, чем на величину дискрета, этот интервал составляет ± 0.5 шага дискретизации данных.

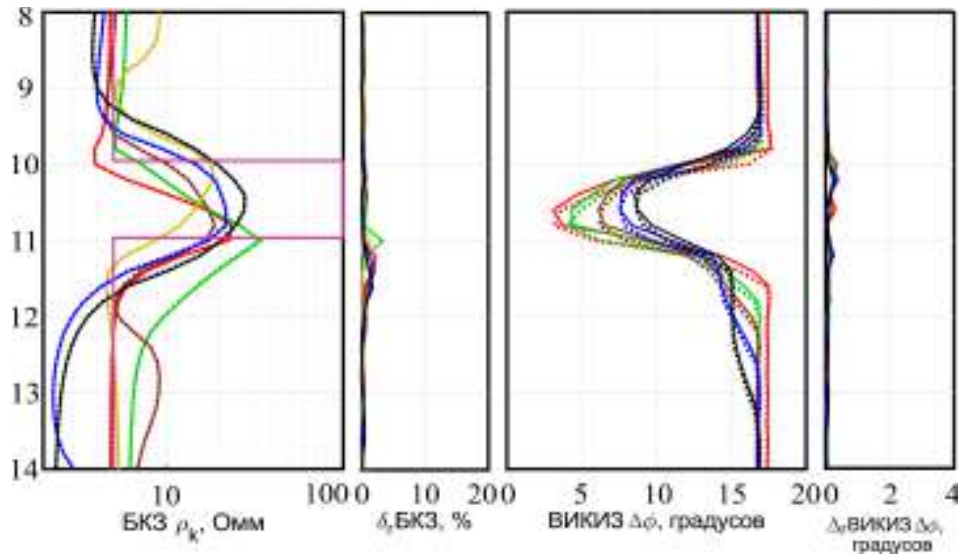


Рисунок 3.3.4 – Невязка на основе расстояния между диаграммами для рассматриваемых данных (δ_r , Δ_r). Пунктирными линиями показаны псевдонаблюдённые данные, плохо увязанные по глубине, сплошными – рассчитанные в подобранной в ходе инверсии модели. Лиловым цветом слева показано УЭС модели среды

В завершение следует отметить, что для обеспечения наилучшего качества подбора и наиболее репрезентативной оценки качества инверсии в работе используется смешанный подход: в процессе минимизации применяется критерий на основе обычной поточечной невязки, что позволяет корректно подбирать данные, измеренные на интервалах тонкого контрастного переслаивания, а на этапе оценки качества подбора при совместной инверсии данных БКЗ и ВЭМКЗ – невязка на основе расстояния, что позволяет исключить сильное влияние недостаточно точной увязки данных. При инверсии только данных БКЗ, измеренных за одну спускоподъемную операцию, используется классическая поточечная невязка.

3.4. Методические приемы совместной численной инверсии данных БКЗ и ВЭМКЗ с применением программного комплекса AlonrdaWL

Из-за отсутствия фокусировки тока и несимметричного строения зондов чувствительность сигналов БКЗ к модельным параметрам является очень сложной функцией.

Например, зачастую максимальная чувствительность сигнала градиент-зонда к вертикальному УЭС пласта проявляется не напротив точки измерения, а на интервале пласта, находящегося выше или ниже по разрезу [Петров, Сухорукова, Нечаев, 2017а]. Дополнительно ситуация осложняется в проницаемых пластах, где сложный профиль проникновения (ЗП+ОЗ) приводит к необходимости оценки 6 параметров, не считая уточнения положения горизонтальных границ (ширины и УЭС ЗП и ОЗ, ρ_h и ρ_v неизменённой части пласта).

В таких условиях простой направленный перебор параметров часто не приводит не только к нахождению реалистичной модели пластов разреза, но и просто к подбору сигналов с необходимой точностью. Для решения этой проблемы разработаны методические приемы, позволяющие получать реалистичные модели среды, учитывающие априорную информацию о разрезе и объясняющие поведение сигналов БКЗ и ВЭМКЗ с практически важной точностью.

Для успешной совместной инверсии данных предлагается использовать следующие приемы.

1. Процесс подбора удобно осуществлять в оконном режиме. При анализе процесса и результатов инверсии установлено, что для корректного подбора сигналов достаточная ширина скользящего окна составляет чуть менее двух длин самого длинного зонда БКЗ (при наличии 8-метрового зонда достаточно ширины окна в 15 метров). Смещать окно можно по глубинам, соответствующим центрам пластов. Если в разрезе присутствуют мощные пласты, то следует разбить интервал на несколько более мелких или увеличить ширину окна. В противном случае в оконном режиме подобрать сигналы может быть невозможно.

2. При отсутствии в модели пластов с измененными зонами (непроницаемые отложения, бурение без репрессии, малые времена между бурением и каротажем) целесообразно последовательное вовлечение сигналов в инверсию для сокращения времени подбора. В таком случае следует сначала подобрать резистивную модель по БКЗ, затем добавить в инверсию сигналы ВЭМКЗ для уточнения параметров и определения значений эффективной диэлектрической проницаемости.

3. При наличии в модели пластов с проникновением фильтрата бурового раствора более эффективно сразу использовать в инверсии сигналы обоих методов. Это связано с

различными областями чувствительности методов: определяемые параметры проникновения могут очень сильно отличаться, для точной оценки необходимо комплексирование.

3.1. Итерация 1. В проницаемых пластах с измененными фильтрацией прискважинными зонами на первой итерации инверсии следует подбирать УЭС зон проникновения и ρ_h и ρ_v неизменённых частей пластов (здесь и далее под итерацией подразумевается достижение алгоритмом локального минимума функционала невязки). Положения всех границ (как горизонтальных, так и вертикальных) следует зафиксировать из-за высокой чувствительности к ним сигналов. В противном случае минимизация функционала невязки от стартовой модели может привести к их быстрому смещению от близкого к истинному положения, которое было определено по комплексу методов, и, как следствие, к невозможности подобрать сигналы в дальнейшем.

Также, при наличии, следует зафиксировать определенные по результатам 1D инверсии сопротивления окаймляющих зон. Чувствительность сигналов БКЗ к параметрам ОЗ практически отсутствует, поэтому их варьирование на первой итерации может привести к определению нереалистичных значений и невозможности подбора сигналов ВЭМКЗ в дальнейшем. Это связано с тем, что сигналы ВЭМКЗ более локальные, что приводит к их лучшему подбору по результатам 1D инверсии. Поэтому обычно общая невязка определяется в большей мере невязкой БКЗ, и в начале 2D инверсии невязка ВЭМКЗ может расти по сравнению с невязкой для стартовой модели.

УЭС зон проникновения следует ограничить исходя из априорной информации. В терригенном разрезе Западной Сибири для скважин, пробуренных на глинистом буровом растворе УЭС ЗП обычно находится в пределах от 10 до 35 Ом·м.

Горизонтальное УЭС неизменённой части пласта является хорошо определяемым параметром, поэтому в большинстве случаев не требует использования интервальных ограничителей. На вертикальное же УЭС следует наложить ограничение по коэффициенту анизотропии ($\lambda^2 = \frac{\rho_v}{\rho_h}$). Для глин в большинстве случаев рационально ограничение $1.0 < \lambda < 3.0-3.5$, для коллекторов – $1.0 < \lambda < 1.5-2.0$. Значения являются ориентировочными и могут отличаться в зависимости от априорной информации. В обоих случаях нижний ограничитель является обязательным, так как обычно в песчано-глинистых отложениях λ больше единицы, а верхний служит по большей части для ускорения и направления процесса инверсии.

На данном этапе значения $\varepsilon_{\text{эфф}}$ непроницаемых слоев фиксированы: их подбор возможен, однако это существенно замедляет инверсию, увеличивая пространство параметров.

3.2. Итерация 2. После достижения алгоритмом локального минимума следует добавить в подбор горизонтальные границы и провести еще один цикл минимизации. Интервальные ограничители на горизонтальные границы не требуются, так как после первой итерации минимизации параметры УЭС обычно подобраны уже достаточно хорошо для того, чтобы сигналы БКЗ, имеющие характерные «пички» на границах, не позволяли границам смещаться далеко от истинного положения.

3.3. Итерация 3. На третьем этапе следует добавить в подбор радиальные границы, УЭС ОЗ и $\varepsilon_{\text{эфф}}$ непроницаемых слоев.

Характерные ширины ЗП и ОЗ зависят от свойств пород, условий бурения и времени между бурением и измерением. Грубая оценка в тонких (менее 1.0–1.5 м) пластах, полученная по результатам 1D инверсии, может быть неточной. В таком случае можно ориентироваться по результатам 1D инверсии в мощных пластах, схожих по свойствам с исследуемыми. Если есть сомнения в оценке глубины проникновения, интервальные ограничители можно ставить достаточно широкими, однако их наличие обязательно, так как положение границ определяется не очень хорошо и при отсутствии ограничителей минимизация невязки может привести к определению очень глубокого или очень незначительного проникновения, т.е. фактически, к модели непроницаемого пласта, и, как следствие, к невозможности подобрать измеренные сигналы.

Ограничители $\varepsilon_{\text{эфф}}$ непроницаемых слоев не являются обязательными, но желательны для ускорения процесса инверсии.

3. После третьей итерации инверсии выявляются интервалы неудовлетворительного подбора сигналов. Для улучшения качества подбора ограничивается интервал подбираемых пластов, и на этом интервале проводится инверсия до получения удовлетворительного результата. Также, если построение стартовой модели была выполнено недостаточно качественно, может понадобиться дополнительная разбивка некоторых пластов, добавление или удаление измененных фильтрацией бурового раствора зон или ручная коррекция отдельных параметров модели и диапазонов их значений.

3.5. Выводы и результаты

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 проецируются на вертикаль.

Стартовая модель строится способом одномерной инверсии, например, в программе EMF Pro, модель радиального изменения УЭС в проницаемых пластах задается на основе априорной информации о технологии бурения.

Для автоматизированного расчленения пластов разреза разработаны алгоритм и программное обеспечение расстановки горизонтальных геоэлектрических границ по данным БКЗ на основе искусственной нейронной сети.

Для высококонтрастных по УЭС разрезов предложен подход и создана программа расчета невязки измеренных и подобранных сигналов с учетом их слабой взаимной неувязки по глубине (в пределах шага дискретизации данных по глубине).

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, 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 $\varepsilon_{\text{эфф}}$.

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

Глава 4

ДВУМЕРНАЯ ИНВЕРСИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ИЗ СКВАЖИН ШИРОТНОГО ПРИОБЬЯ И НИЖНЕЕНИСЕЙСКОГО НЕФТЕГАЗОНОСНОГО РАЙОНА

4.1. Каротажный материал и проверка его кондиционности

Большая часть обработанного материала передана компанией ОАО «Сургутнефтегаз» и представлена данными модулей БКЗ и ВЭМКЗ приборов СКЛ различных модификаций или приборов ВИКИЗ и К1А-723М с Федоровского и Рускинского месторождений. Отдельно предоставлены данные расширенного комплекса по трем скважинам с территории Широтного Приобья без привязки к месторождениям и из одной скважины нефтегазоконденсатного месторождения Нижнеенисейского нефтегазоносного района (Ванкорская группа месторождений). Все скважины субвертикальные, пробурены на глинистом растворе, номинальный диаметр скважин в большинстве случаев составляет 0.216 м. В таблице 4.1.1 приведен перечень скважин с условными номерами, в которых были проанализированы данные ГИС с указанием их качества.

Для проверки кондиционности материала в каждой скважине выбирались мощные интервалы однородных глин, находящиеся как можно ближе к целевому интервалу по глубине. Инверсией данных БКЗ и ВЭМКЗ в модели «скважина – пласт» оценивалось возможное смещение уровней сигналов, например, резистивиметрии (Рисунок 4.1.1).

Также достаточно часто в обработанном каротажном материале встречается смещение уровня сигнала самого короткого зонда (А0.2М0.1N) некоторых комплексов СКЛ (Рисунок 4.1.2), что, вероятно, связано со сложностью его калибровки, так как в другой аппаратуре БКЗ зонд такой длины отсутствует (наименьшим обычно является А0.4М0.1N). В случае обработки данных, измеренных на интервалах непроницаемых отложений, в процессе инверсии истинный уровень сигнала зонда А0.2М0.1N восстанавливается единственным образом и при необходимости его можно исключить из подбора без существенного ухудшения результата. В случае же сложного строения прискважинной зоны некондиционность данных этого зонда может приводить к достаточно большим ошибкам определения УЭС измененных проникновением зонд проницаемых пород.

Практически во всех скважинах наблюдалась небольшая неувязка сигналов разных методов по глубине (в среднем на величину шага по глубине ~0.2 м), в данных БКЗ из

одной скважины (R4) наблюдалось большое количество выбросов точек данных, вероятно, связанных с неисправностью аппаратуры.

Таблица 4.1.1 – Каталог фактического материала

	№ скв.	Аппаратура	Дата каротажа	Примечание
Федоровское месторождение				
1	F1	СКЛ-76	31/01/11	Завышен сигнал А02М01N (исключен из инверсии)
2	F3	СКЛ-76	18/05/11	Кондиционные данные. Нет НК и резистивиметрии. УЭС по БКЗ 1.7 Ом·м
3	F5	СКЛ-76	29/03/11	Кондиционные данные
4	F6	СКЛ-76	12/05/11	УЭС раствора ниже, чем по резистивиметрии (определено по БКЗ как 1.7–1.9 Ом·м). Завышен сигнал А0.2М0.1N (не учитывался при инверсии)
5	F11	СКЛ-76	21/04/11	Кондиционные данные. Нет резистивиметрии. УЭС по результатам инверсии ~1.3 Ом·м
6	F12	СКЛ-76	11/11/11	Завышен сигнал А0.2М0.1N (исключен из инверсии)
7	F13	СКЛ-76	13/08/11	Кондиционные данные, нет данных ГК и НК
8	F14	К1А-723М, ВИКИЗ	10/10/09	Кондиционные данные
Русскинское месторождение				
9	R1	СКЛ-76	25/02/11	Некорректные уровни сигналов БКЗ, некорректная калибровка 4-х метрового зонда
10	R2	К1А-723М, СКЛ-76	21/01/11 22/01/11	4 часа между измерениями; разные показания резистивиметров; лучше подходит стандартный, уровни сигналов БКЗ нормальные
11	R3	СКЛ-76	08/03/11	Кондиционные данные
12	R4	СКЛ-76	09/03/11	Неверная калибровка зонда А4.0М0.5N, УЭС по результатам инверсии 2 Ом·м, наблюдаются выбросы точек данных
13	R5	СКЛ-76	12/02/11	Кривая БКЗ подбирается при УЭС раствора 2.2 Ом·м
14	R6	К1А-723М, ВИКИЗ, СКЛ-102	28/10/11 29/10/11	Кондиционные данные ВИКИЗ, ВЭМКЗ, БКЗ стандартный. Данные БКЗ СКЛ неправильно отмасштабированы
15	R7	К1А-723М, ВИКИЗ	03/11/11	Кондиционные данные
Месторождение Ванкорской группы				
16	M1	К1А-723М, ВИКИЗ, МК, АК, МКВ	–	Кондиционные данные
Данные без привязки к месторождениям				
17	N1	К1А-723М, ВИКИЗ, МК, АК, МКВ	–	Некондиционные данные зонда А8.0М1.0N
18	N2	К1А-723М, ВИКИЗ, БК, МК, АК, МКВ	–	Кондиционные данные
19	N3	К1А-723М, ВИКИЗ, МК, АК, МКВ	–	Некондиционные данные зонда А0.4М0.1N

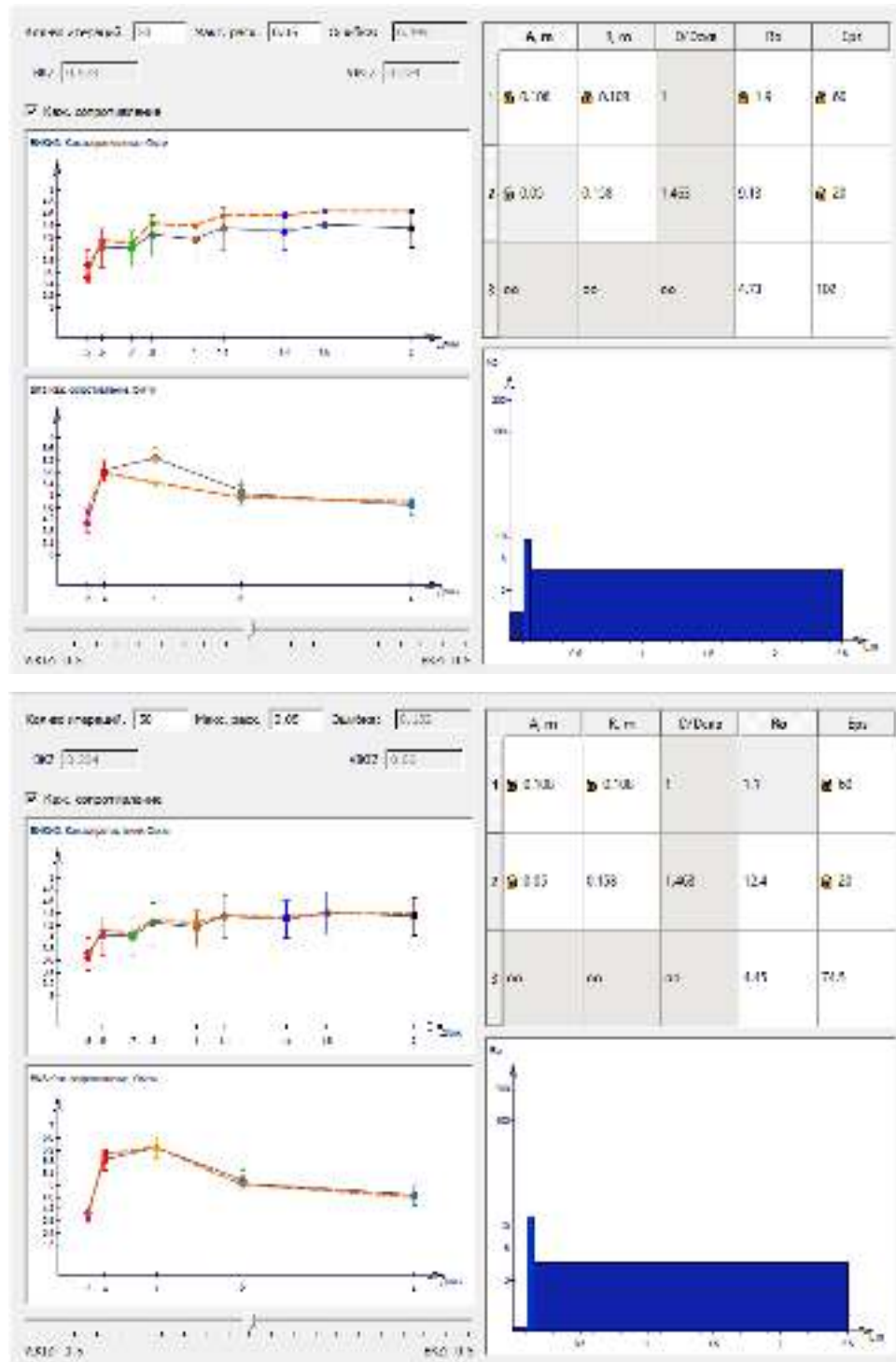


Рисунок 4.1.1 – Пример выявления некондиционности данных резистивиметрии и определения УЭС бурового раствора с помощью одномерной инверсии данных БКЗ на интервале однородных глин (скважина F11). Сверху – окно программы EMF Pro с подбором кривых зондирований ВЭМКЗ и БКЗ при УЭС бурового раствора, равном показаниям резистивиметра, снизу – при УЭС раствора, подобранном в процессе инверсии. Тонкая повышающая зона проникновения (ЗП) введена для имитации смещения уровня сигналов БКЗ под влиянием естественной анизотропии глин

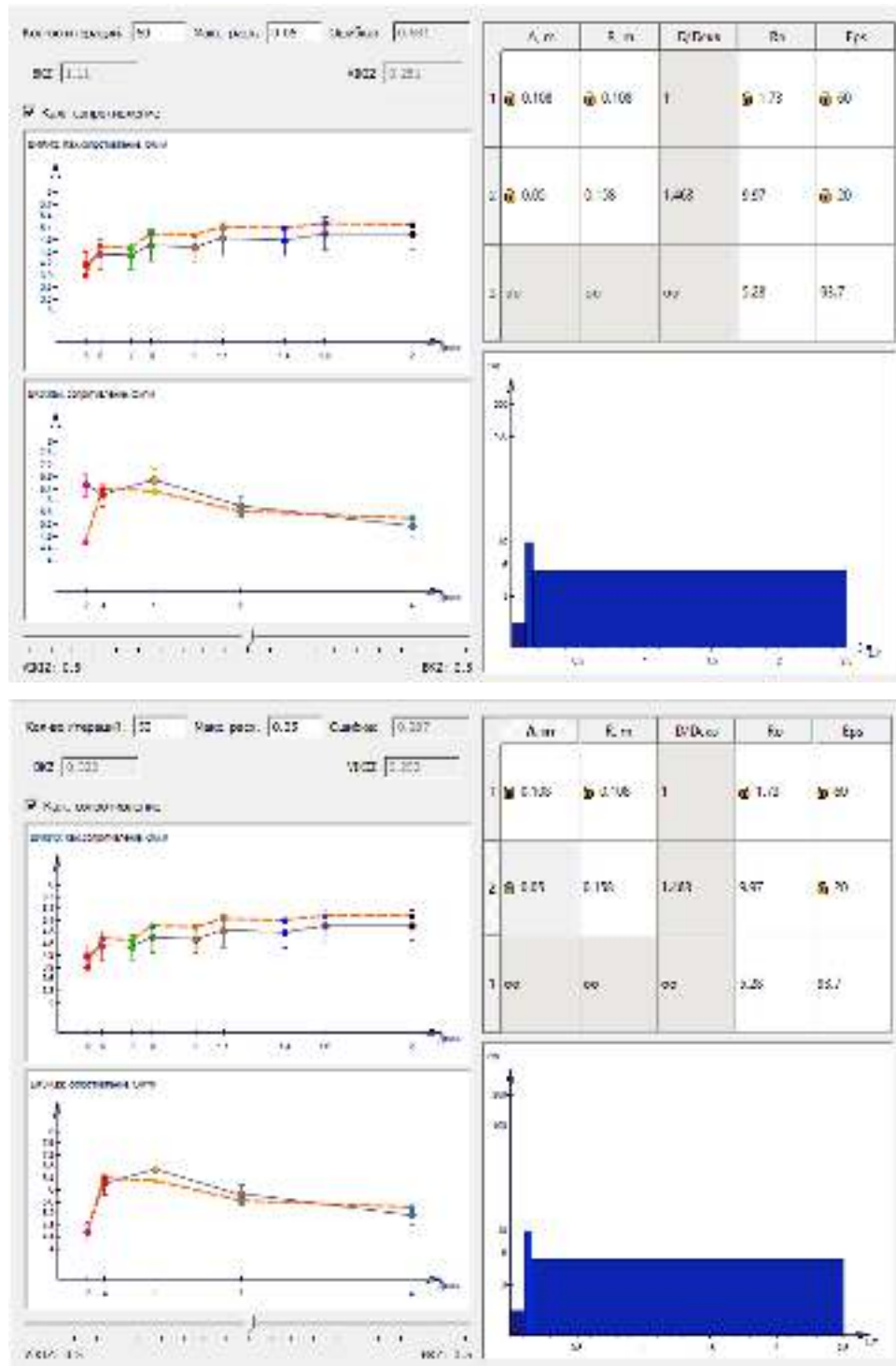


Рисунок 4.1.2 – Пример выявления и коррекции неверного уровня сигнала зонда A0.2M0.1N (Скв. F12). Снизу – окно программы EMF Pro с подбором кривых зондирований ВЭМКЗ и БКЗ с исходными данными, сверху – со скорректированным уровнем сигнала зонда A0.2M0.1N. Тонкая повышающая зона проникновения введена для имитации смещения уровня сигналов БКЗ под влиянием естественной анизотропии глин

4.2. Интерпретация данных БКЗ на интервалах непроницаемых отложений баженовской свиты

Физические свойства баженовской свиты

Физические свойства баженовской свиты по данным открытых источников

Баженовская свита представляет собой битуминозную глинистую нефтематеринскую породу сложного состава. Сложность исследования интервалов баженовской свиты с коллекторскими свойствами обусловлена тем, что пласт меняет свои свойства в процессе разработки, практически не контролируется структурными формами, не выдержан по простиранию и весьма плохо поддается изучению с помощью геофизических методов [Добрынин, 1982]. Тем не менее, в силу высокой актуальности проблемы неоднократно предпринимались попытки оценки физических свойств и характеристик свиты (в том числе электрофизических: диэлектрической проницаемости, удельного электрического сопротивления (УЭС) вдоль и перпендикулярно плоскости напластования) [Камкина, 2013; *Модель баженовской...*, 2015].

Баженовская свита представлена аргиллитами битуминозными черными с коричневым оттенком, массивными, плитчатыми, листоватыми, с прослоями радиоляритов, глинистых известняков, остатками морских фоссилий. Аргиллиты баженовской свиты отличаются от подстилающих и перекрывающих пород повышенным содержанием органического вещества и, соответственно, высокими значениями УЭС и естественной радиоактивности [Прошляков, Гальянова, Пименов, 1987]. Свита характеризуется крайне неоднородным строением, в ее разрезе содержатся многочисленные тонкие (0.4–0.6 м, реже до 1.0 м) прослои карбонатных и кремнистых пород. Для центральной части Западно-Сибирской плиты выделяется три основных типа разреза баженовской свиты: сургутский, нижневартовский и вахский [*Баженовский горизонт...*, 1986].

Отложения свиты резко выделяются значительно меньшими, по сравнению со вмещающими породами, значениями плотности (~ 2.15 г/см³ [Лебедев, 1983]) и скоростей сейсмических волн. К кровле баженовской свиты приурочен основной отражающий сейсмический горизонт Б, прослеживающийся почти на всей территории развития верхнеюрских битуминозных отложений.

Исследования упругих свойств пород баженовской свиты показали, что выделяемые по акустическому каротажу прослои с большими значениями интервального времени

(ΔT) и низкой плотностью коррелируют с содержанием органического вещества [*Измерения параметров...*, 1998], также наблюдается корреляция ΔT с трещиноватыми смешанными породами, распространяющимися преимущественно в средней части свиты [Козяр, Глебочева, Медведев, 1999]. В работе [Koksharov, Volkova, Pervuhin, 2006] в качестве одной из причин уменьшения значений сейсмических скоростей на интервале баженовской свиты отмечено аномально высокое поровое давление. Несмотря на сложность разреза, предпринимаются попытки разделить эти эффекты для выделения коллекторов и оценки хрупкости пород, необходимой для обеспечения стабильного притока нефти в условиях баженовской свиты [Куляпин, Соколова, 2015].

В Сколковском институте науки и технологий с помощью метода оптического сканирования проведены измерения тепловых свойств (теплопроводности вдоль и поперек слоистости, температуропроводности и объемной теплоемкости) на 126 образцах керна с интервала баженовской свиты. По результатам измерений выявлена значительная тепловая анизотропия (коэффициент анизотропии теплопроводности неэкстрагированных образцов до 2.1), связанная с содержанием в образцах органического вещества. Наилучшая корреляция наблюдается между содержанием керогена и теплопроводностью, измеренной параллельно слоистости, причем «при высоком $C_{орг}$ имеет место тонкое переслаивание ориентированных слоев органического вещества в породах баженовской свиты» [*Тепловые свойства...*, 2015].

Независимо от первой группы ученых, схожее исследование было проведено петрофизиками ИНГГ СО РАН на коллекции образцов керна с Салымской площади. Установлено, что аргиллиты баженовской свиты характеризуются аномально низкой теплопроводностью (от 1.0 до 2.3 Вт/м/К в направлении слоистости и от 0.8 до 1.9 Вт/м/К перпендикулярно ей), при этом величина теплопроводности коррелирует с содержанием органического вещества, а коэффициент тепловой анизотропии уменьшается с увеличением содержания в породе керогена, вероятно вследствие того, что такие породы менее подвержены разрушению при декомпрессии [Аюнов, Дучков, Соколова, 2015].

Этими и многими другими исследованиями кернового материала установлено, что для баженовской свиты характерно горизонтальное переслаивание пород разного УЭС, а внутри отдельных пластов также наблюдается тонкая слоистость. Поэтому для пород свиты должно быть характерно наличие электрической анизотропии, УЭС которой одинаково в горизонтальном направлении и отлично в вертикальном. Однако исследования

свиты методами электрокаротажа традиционно исчерпывались измерением потенциала самополяризации и кажущегося сопротивления, чаще всего одним фокусированным зондом бокового каротажа и/или стандартным градиент-зондом А2.0М0.5N. Интерпретация этих материалов заключалась в анализе значений только кажущегося сопротивления.

В последнее время возросший интерес к баженовской свите привел к расширению комплекса применяемых методов электрометрии. Например, в скважинах месторождений с нефтепродуктивными баженовскими отложениями проводится каротажное зондирование комплексом градиент-зондов и комплексом индукционных зондов. Данные таких исследований целесообразно подвергать численной инверсии с целью получить более полный комплекс электрофизических параметров баженовских отложений, чем кажущееся сопротивление по данным одного зонда.

В опубликованных работах встречаются примеры изучения электрофизических параметров методами с возбуждением постоянным и переменным электрическим током (БК, БКЗ и ВЭМКЗ) [*Нефтегазоносные комплексы...*, 2014]. Выявлена следующая особенность пород баженовской свиты: кажущееся УЭС по методам БК и БКЗ изменяется в пределах от 50 до 4000 Ом·м, а по методу ВЭМКЗ – от 30 до 1000 Ом·м. Уменьшение значений кажущегося УЭС для электромагнитного каротажа предположительно вызвано поляризацией глинистых частиц и вкрапленных зерен пирита [Сухорукова, Эпов, 2010].

Одними из первых исследователей, посвятивших работы исследованиям диэлектрической релаксации в породах баженовской свиты, были Ц.М. Левицкая и И.А. Ворсина. В своей работе [Левицкая, Ворсина, 1988] они проанализировали результаты измерений на керне в диапазоне частот 1 кГц – 100 МГц. Установлено, что ассиметричная форма диаграммы Коул-Коул, характерная для пород баженовской свиты, обусловлена содержанием в этих породах органического вещества.

Детальное исследование значений относительной диэлектрической проницаемости кернов баженовской свиты и её зависимости от типа и содержания насыщающего флюида (нефти и воды) было проведено группой исследователей под руководством А.В. Репина. В ходе этой работы были исследованы образцы, изготовленные из керна Южно-Ракитинского месторождения, и получены частотные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) при температуре 25°C [Репин, Бобров, Голиков, 2014].

Физические свойства баженовской свиты на месторождениях Широтного Приобья
по данным ГИС

Во всех рассматриваемых в работе скважинах интервал баженовской свиты является непродуктивным. Рассмотрим для примера данные из скважины F1 (Рисунок 4.2.1). Интервал высокоомных отложений 26 м (3180–3206 м), по данным БК отложения представлены пластами мощностью от 0.5 м до 1.5 м, диапазон КС составляет от 10 до 500 Ом·м.

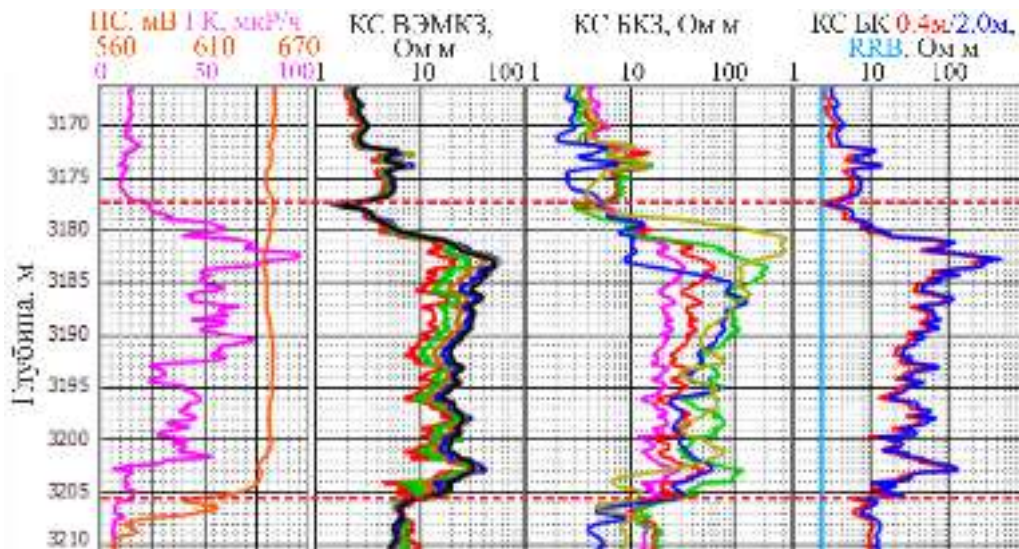


Рисунок 4.2.1 – Данные электрометрии и гамма-каротажа из скважины F1. Пунктирными линиями показаны границы баженовской свиты. КС по данным зондов ВЭМКЗ: красным цветом – зонд 14 МГц, зеленым – 7 МГц, коричневым – 3.5 МГц, синим – 1.75 МГц, черным – 0.875 МГц. КС по данным зондов БКЗ: розовым – зонд A0.2M0.1N, красным – A0.4M0.1N, зеленым – A1.0M0.1N, оливковым – N0.5M2.0A, синим – A4.0M0.5N. КС по данным зондов БК: красным – короткий зонд, синим – длинный зонд, голубым – резистивиметрия

Кажущееся УЭС высокоомной части баженовской свиты по ВЭМКЗ примерно в 5–10 раз меньше, чем по данным бокового каротажа. Наибольшее кажущееся сопротивление средней части высокоомного интервала определяется по БКЗ. В работах [Камкина, 2013; Модель баженовской..., 2015; Сухорукова, 2018] расхождение БКЗ и БК связывается с наличием в породах сильной электрической анизотропии. Расхождение кривых ВЭМКЗ, соответствующее понижающей зоне проникновения, объясняется частотной

дисперсией диэлектрической проницаемости пород свиты, а несоответствие данных БК и зонда ВЭМКЗ DF2.0 – ее повышенными значениями [Сухорукова, Эпов, 2010]. Высокие значения гамма-каротажа отражают повышенное содержание радиоактивных элементов, прежде всего урана, которое в среднем коррелирует с содержанием керогена в верхней части высокоомного интервала.

Баженовская свита характеризуется сильной латеральной изменчивостью, поэтому в исследуемом наборе данных с довольно большой площади Федоровского месторождения можно выделить три группы скважин с принципиально различным её строением (Рисунок 4.2.2).

В первой (верхней на рисунке) группе насыщение органическим веществом по данным ГК максимально в верхней половине свиты, что приводит к максимальным значениям УЭС в кровле и их снижению с глубиной. В средней группе кажущееся сопротивление максимально как в кровле, так и в подошве, в кровле – за счет содержания керогена, в подошве – за счет уплотнения и карбонатизации пород смешанного состава. В нижней группе резко уменьшаются и толщина свиты, и радиоактивность и УЭС пород. По данным ГК выделяются всего три небольших интервала с повышенным содержанием органического вещества.

Данные с Русскинской площади гораздо менее изменчивы: каротажные диаграммы выглядят весьма похоже на диаграммы средней группы, выделенной на Федоровском месторождении. С учётом этого вместо их описания имеет смысл проанализировать данные, предоставленные без привязки к месторождениям, так как они содержат более полный набор методов, позволяющий обосновать выбор моделей для численной инверсии данных БКЗ.

Данные из скважин без привязки по характеру поведения диаграмм очень похожи на первый (верхний) тип данных с Федоровского месторождения (Рисунок 4.2.3, скважина N3, глубина относительная). Анализ поведения сигналов, а также гидрофобность пород баженовской свиты приводят к выводу о том, что проникновение существенного количества фильтрата бурового раствора в породу мало вероятно, что позволяет проводить инверсию данных электрометрии в модели без зоны проникновения. Эти выводы в полной мере подтверждаются и данными из других скважин с расширенным набором методов и повторными измерениями, а также стабильностью диаметра скважины на интервале свиты по данным кавернометрии.

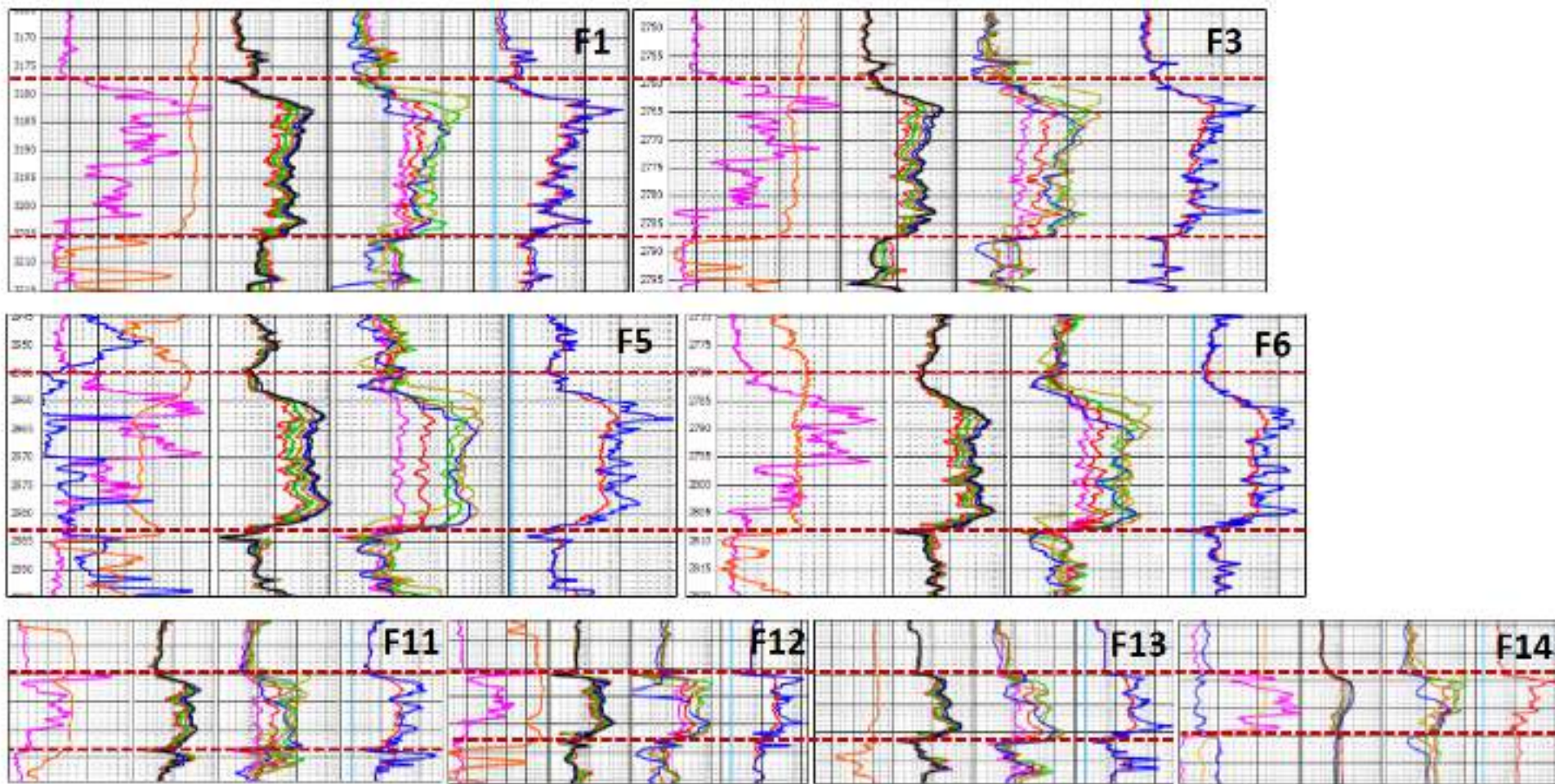


Рисунок 4.2.2 – Три типа баженовской свиты на Федоровском месторождении. Пунктирными линиями показаны границы баженовской свиты

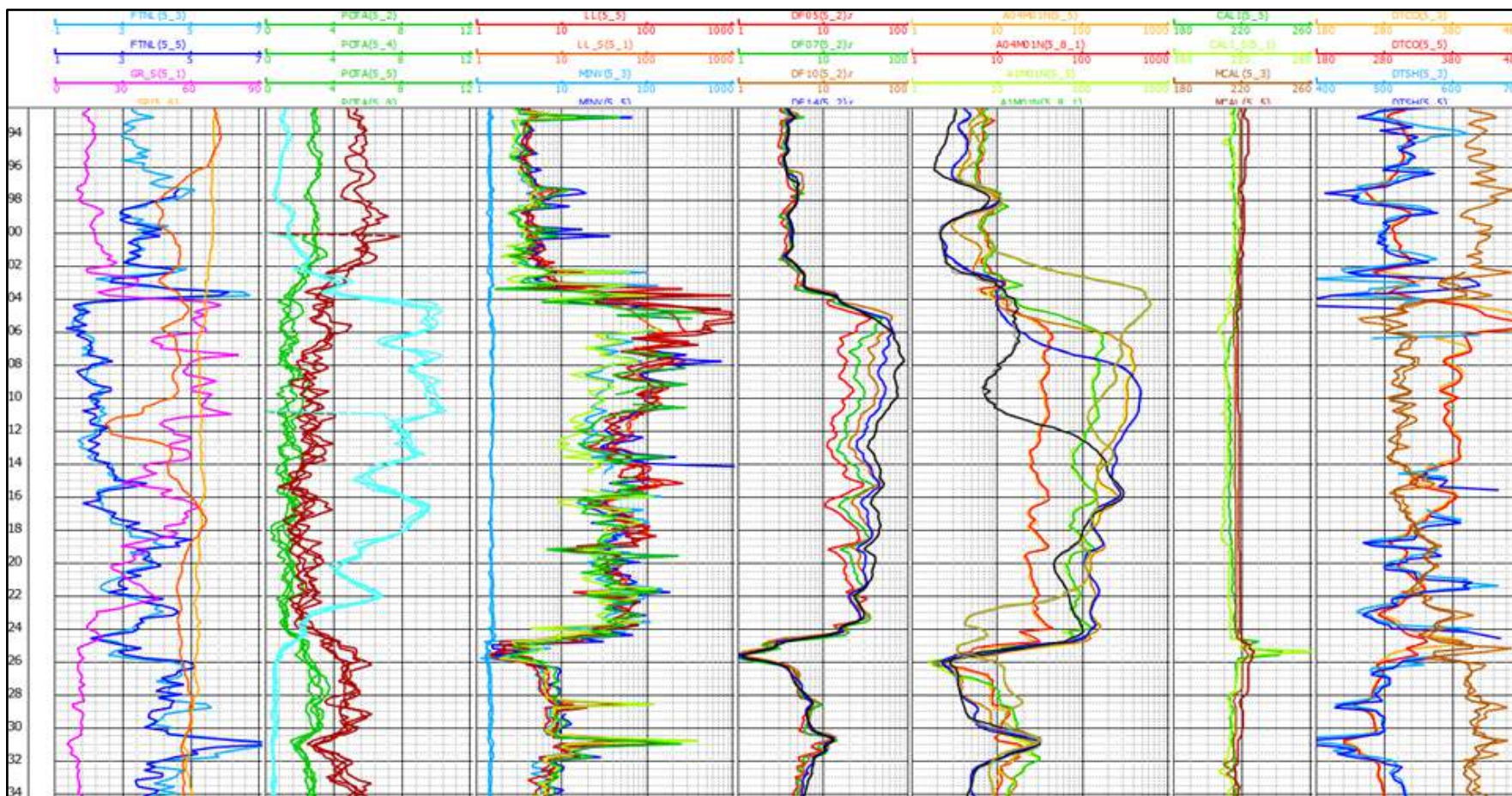


Рисунок 4.2.3 – Данные, измеренные в скважине N3 на интервале бажендовской свиты: интегральный ГК (мкР/ч; розовый цвет), НК (у.е.; синий) и ПС (мВ; оранжевый); содержание калия (%; зеленый), тория (ррт; темно-коричневый) и урана (ррт; бирюзовый); ρ_k (Ом·м; БК – красный, микроградиент-зонд – синий, микропотенциал – зеленый, микро БК – красно-коричневый), УЭС бурового раствора (Ом·м; голубой); ρ_k по ВЭМКЗ (Ом·м, цвета как на рисунке 4.2.1); ρ_k по БКЗ (Ом·м, цвета как на рисунке 4.2.1); кавернометрия и микрокавернометрия (мм; красный и красно-коричневый); интервальное время (мкс/м) продольной (красный) и поперечной (синий) волн и плотность (г/см³; коричневый)

Сигналы ВЭМКЗ на интервале баженовской свиты подвержены сильному влиянию дисперсии диэлектрической проницаемости отложений по частоте. В результате этого совместная двумерная инверсия данных БКЗ и ВЭМКЗ затруднительна. С другой стороны, благодаря отсутствию в рассматриваемых скважинах изменения прискважинной зоны на интервале баженовской свиты, оценку вертикальной и горизонтальной компонент УЭС можно провести путем инверсии данных БКЗ без привлечения сигналов ВЭМКЗ.

Анизотропия УЭС по данным из скважин Федоровского месторождения

Прежде чем анализировать распределение коэффициента анизотропии в полученных моделях и их латеральную корреляцию, рассмотрим подробно процесс инверсии с применением разработанной методики на примере данных из скважины F3.

На рисунке 4.2.4 приведена стартовая модель, полученная при помощи анализа данных БК (границы расставлены вручную по комплексу каротажных данных). Несмотря на небольшую неувязку данных БК и БКЗ по глубине, сигналы коротких зондов, рассчитанные по этой модели, достаточно хорошо для стартового приближения повторяют измеренные. Между рассчитанными и наблюдаемыми диаграммами для длинных зондов наблюдаются сильные расхождения, связанные с влиянием вертикального сопротивления и неточностью стартовой модели.

Под интервалом свиты находится водонасыщенный коллектор (интервал 2788.3–2792.4 м), поэтому модель, созданная в предположении об отсутствии проникновения, неудовлетворительна. Для получения реалистичной модели коллектора и предотвращения больших погрешностей в определении параметров слоев, являющихся для него вмещающими, необходимо определить тип этого слоя как изотропный с проникновением. На рисунке 4.2.5 приведено окно программы EMF Pro с определением параметров слоя на основе 1-D модели.

Помимо корректного определения класса модели для каждого из слоев, для успешной инверсии необходимо наличие чувствительности данных БКЗ ко всем подбираемым параметрам. Рассмотрим производные сигналов градиент-зондов по вертикальному и горизонтальному сопротивлениям модели с помощью алгоритма анализа чувствительности пакета Alondra WL.

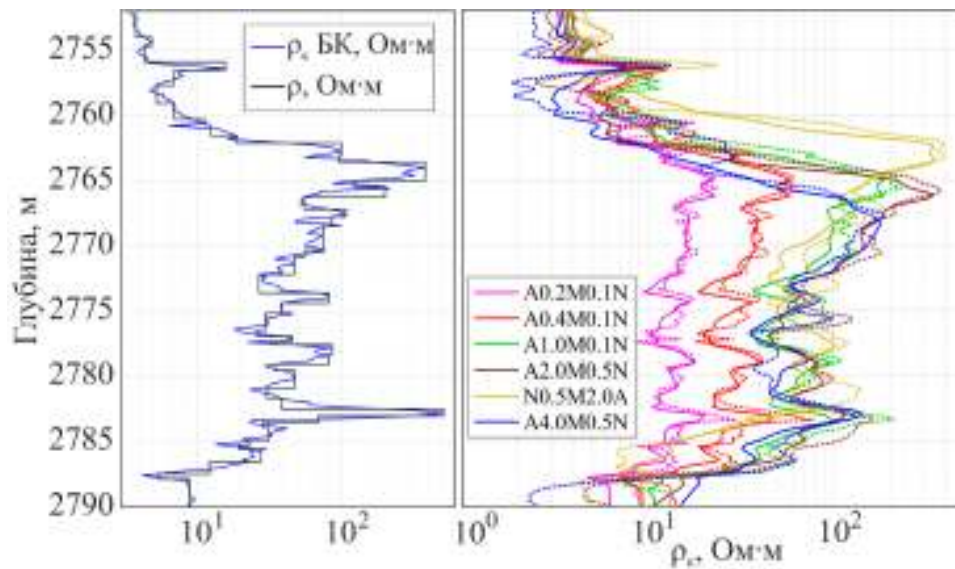


Рисунок 4.2.4 – Слева стартовая модель интервала баженовской свиты и данные БК, справа сплошными линиями – данные, рассчитанные по стартовой модели и пунктирными – наблюдаемые

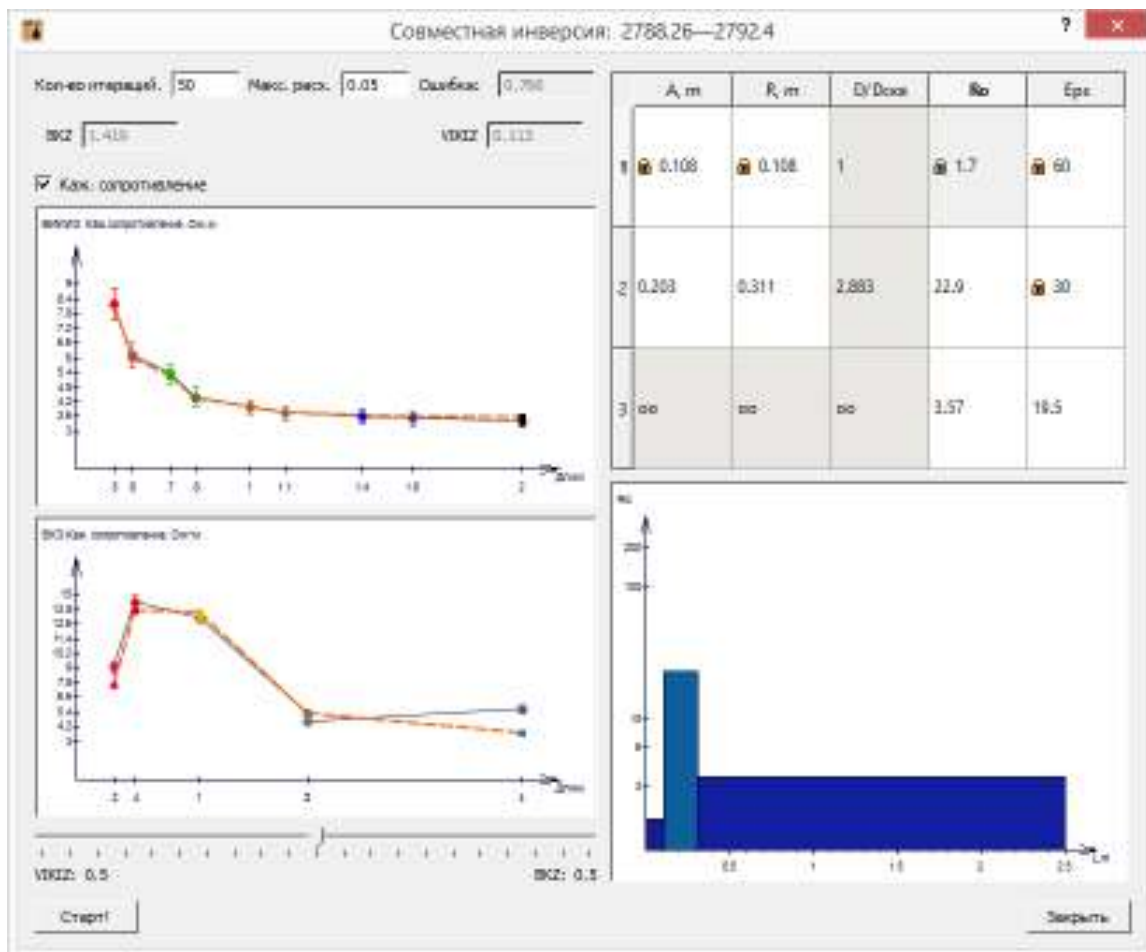


Рисунок 4.2.5 – Окно программы EMF Pro с определением параметров коллектора под баженовской свитой путем совместной 1-D инверсии данных БКЗ и ВЭМКЗ

Численными экспериментами было установлено, что, вне зависимости от стартового приближения, ρ_h в финальной модели хорошо совпадает с показаниями зонда БК. По этой причине для анализа чувствительности представляется целесообразным провести расчеты не для стартовой модели, а для модели, созданной на основе финальной путем приравнивания ρ_v к ρ_h . Таким образом, мы получим изотропную модель, близкую к стартовой, однако содержащую более тонкие прослой, чувствительность к которым заведомо меньше, чем к слоям стартовой модели.

На рисунке 4.2.6 приведены производные сигналов градиент-зондов по параметрам такой модели для данных, измеренных в скважине F3. При расположении точки расчета в средней части свиты (Рисунок 4.2.6 а) производные сигналов по компонентам УЭС модели отражают сильную зависимость сигнала кровельного градиент-зонда от параметров пластов, расположенных ниже его приемных электродов, а подошвенных зондов – от ρ_v пласта, в котором находится точка записи, и от сопротивлений вышележащих пластов на расстоянии 5–6 м. Чувствительность сигналов к ρ_v примерно вдвое ниже, чем к ρ_h , характер зависимости сигнала от компонент УЭС принципиально различен, что обуславливает принципиальную возможность определения анизотропии. В условиях высокого контраста УЭС бурового раствора и породы максимальная чувствительность к ρ_v смещается в сторону больших длин зондов [Петров, Сухорукова, Нечаев, 2016], что отражается в максимальном значении $\partial\rho_k/\partial\rho_v$ в слое, в котором расположена точка расчета.

Если точка расчета находится в нижней части свиты (Рисунок 4.2.6 б) вблизи кровли самого высокоомного слоя, чувствительность к горизонтальному сопротивлению расположенных выше пластов резко возрастает, притом что чувствительность к вертикальной составляющей остается примерно на том же уровне. Это связано с влиянием изолирующего слоя.

В кровле свиты (Рисунок 4.2.6 в), вблизи перехода от высокоомных отложений к низкоомным, чувствительность резко падает при высоком контрасте сопротивлений. Этот пример иллюстрирует особую важность данных обращенного градиент-зонда при инверсии сигналов, записанных на этом интервале: в связи с обратным расположением электродов, в условиях полного отсутствия симметрии в модели кровельный зонд обладает очень высокой чувствительностью по сравнению с подошвенными.

Таким образом, анализ производных сигналов по параметрам модели подтверждает принципиальную возможность определения ρ_v высокоомных тонкослоистых отложений баженовской свиты по сигналам БКЗ в вертикальных скважинах.

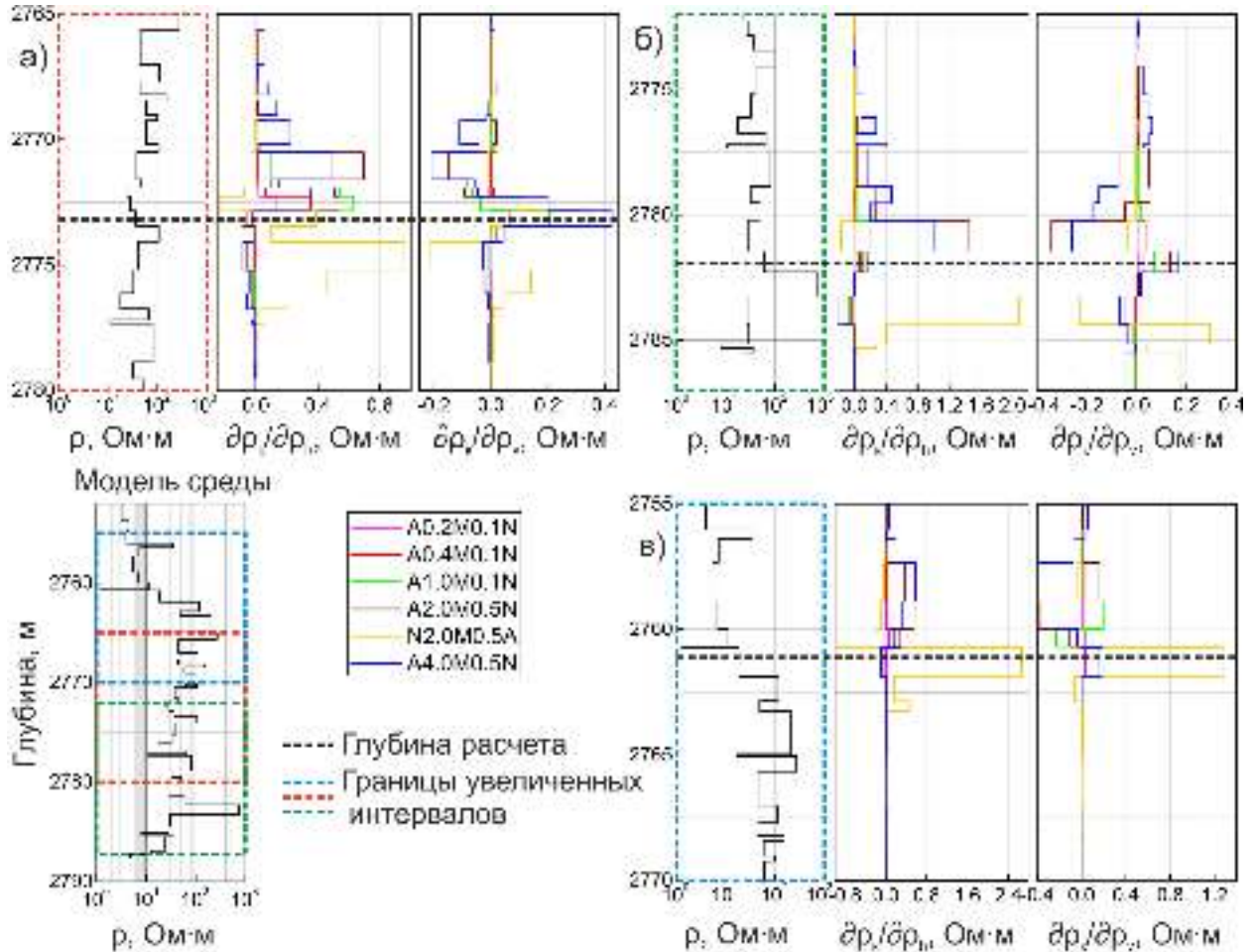


Рисунок 4.2.6 – Производные сигналов градиент-зондов по параметрам модели для точек расчета, расположенных в кровле, средней части и подошве высокоомного интервала. Слева внизу – модель среды, полученная из финальной путем приравнивания ρ_v к ρ_h . Цветными пунктирными рамками показаны границы рассматриваемых интервалов для разных глубин точки расчета

Перейдем к рассмотрению результатов инверсии. На рисунке 4.2.7 представлена состоящая из тонких контрастных по УЭС анизотропных пластов модель баженовской свиты. Модель обеспечивает хорошее совпадение диаграмм на всем интервале высокоомных отложений и вмещающих их пород, удовлетворяет данным БК и корректно отображает свойства проницаемых пластов под интервалом свиты [Сухорукова, Петров, Нечаев,

2017]. Доверительные интервалы параметров модели получены с помощью разработанного алгоритма на основе статистического подхода (пункт 4 главы 2).

Максимальные значения коэффициента анизотропии УЭС фиксируются в верхней части высокоомных отложений (более 5). С увеличением λ чувствительность к ρ_v быстро уменьшается, поэтому судить о конкретных значениях ρ_v на интервале 2763–2767 м не представляется возможным, однако можно утверждать, что они наибольшие. К средней части свиты происходит уменьшение λ (до 1.5–2.0) и после – плавное увеличение к подошве (до ~3). Как будет показано далее, подобное распределение наблюдается для большинства скважин указанных площадей.

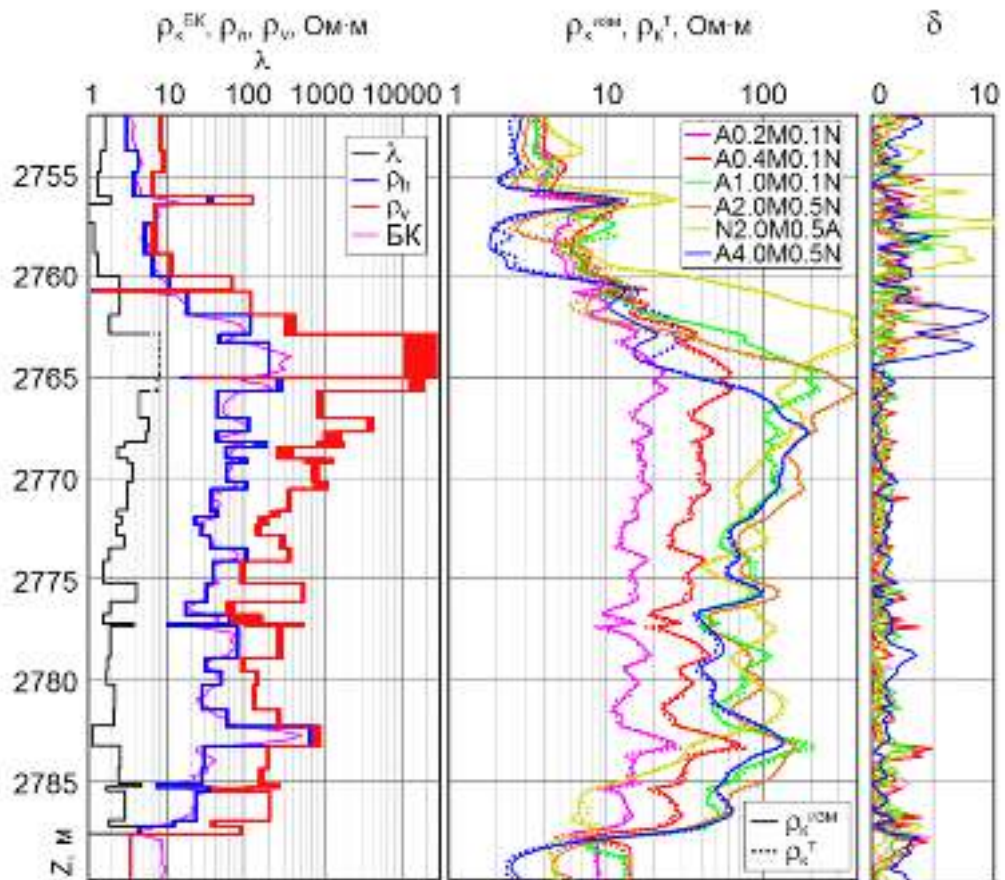


Рисунок 4.2.7 – Результат инверсии данных БКЗ на интервале баженовской свиты с оценкой горизонтального и вертикального УЭС. Слева – 95% доверительные интервалы параметров геоэлектрической модели, коэффициент анизотропии, соответствующий модели, характеризующейся наименьшими невязками измеренных и подобранных сигналов (пунктиром – интервал, на котором невозможно точно оценить λ) и данные БК. Справа – измеренные и подобранные (сплошные и пунктирные линии) сигналы градиент-зондов. δ – невязка, рассчитанная в точке скважины i для зонда j и нормированная на погрешность измерения $\Delta\rho$ (принята равной 5%): $\delta_{ij} = |\rho_{ij} - \rho_{ij}^a(\bar{x})| / (\Delta\rho \rho_{ij})$

Полученное распределение коэффициента анизотропии УЭС коррелирует с основными литотипами горных пород, выделенными по данным радиоактивного каротажа аналогично работе [Модель баженовской..., 2015]. Наименьшая в пределах высокоомных отложений анизотропия ($\lambda \sim 1.1$) определяется для карбонатного пласта (2782.3–2783.2 м), наибольшая ($\lambda > 3.5$) соответствует высокорadioактивным микститам, средние значения (1.5–2.5) – кремнисто-глинистым породам и силицитам; значения 1.7–3.6 – низкорadioактивным смешанным породам.

Аналогично приведенному примеру были обработаны данные БКЗ из всех имеющихся скважин [Petrov, 2017]. Рассмотрим латеральную корреляцию данных с Федоровского месторождения, где на стадии анализа фактического материала были выделены три группы скважин с принципиально различным строением баженовской свиты. На рисунке 4.2.8 приведены результаты инверсии сигналов БКЗ.

Из приведенных на рисунке данных видно, что для групп 1 и 2 (деление аналогично рисунку 4.2.2), характерно очень схожее распределение коэффициента анизотропии, за исключением скважины F1. Это отличие объясняется тем, что несмотря на то, что при проверке кондиционности данных из скважины F1 на низкоомных интервалах не было обнаружено отклонений, при 2-D моделировании на интервалах высокоомных отложений выявлено существенное несоответствие уровней рассчитанных и наблюдаемых сигналов для всех зондов, которое не удалось устранить при подборе. Вероятнее всего, это расхождение связано с неверной калибровкой прибора. Таким образом, данные являются некондиционными и приведены лишь для того, чтобы еще раз продемонстрировать важность точности измерения при решении подобных задач.

В скважинах, отнесенных к третьей группе, резко уменьшаются и толщина свиты, и радиоактивность и УЭС пород. Распределение λ несколько иное, что подтверждает предполагаемую связь насыщения пород органическим веществом и коэффициента анизотропии. При этом в скважинах F9 и F12 наблюдается распределение λ , переходное от характерного для мощной высокорadioактивной баженовской свиты к характерному для тонкой низкорadioактивной.

Распределение λ по глубине, подобное распределению в скважинах F3, F5 и F6, имеет место и в подавляющем большинстве рассмотренных скважин с Русскинского месторождения, так как строение баженовской свиты в них похожее.

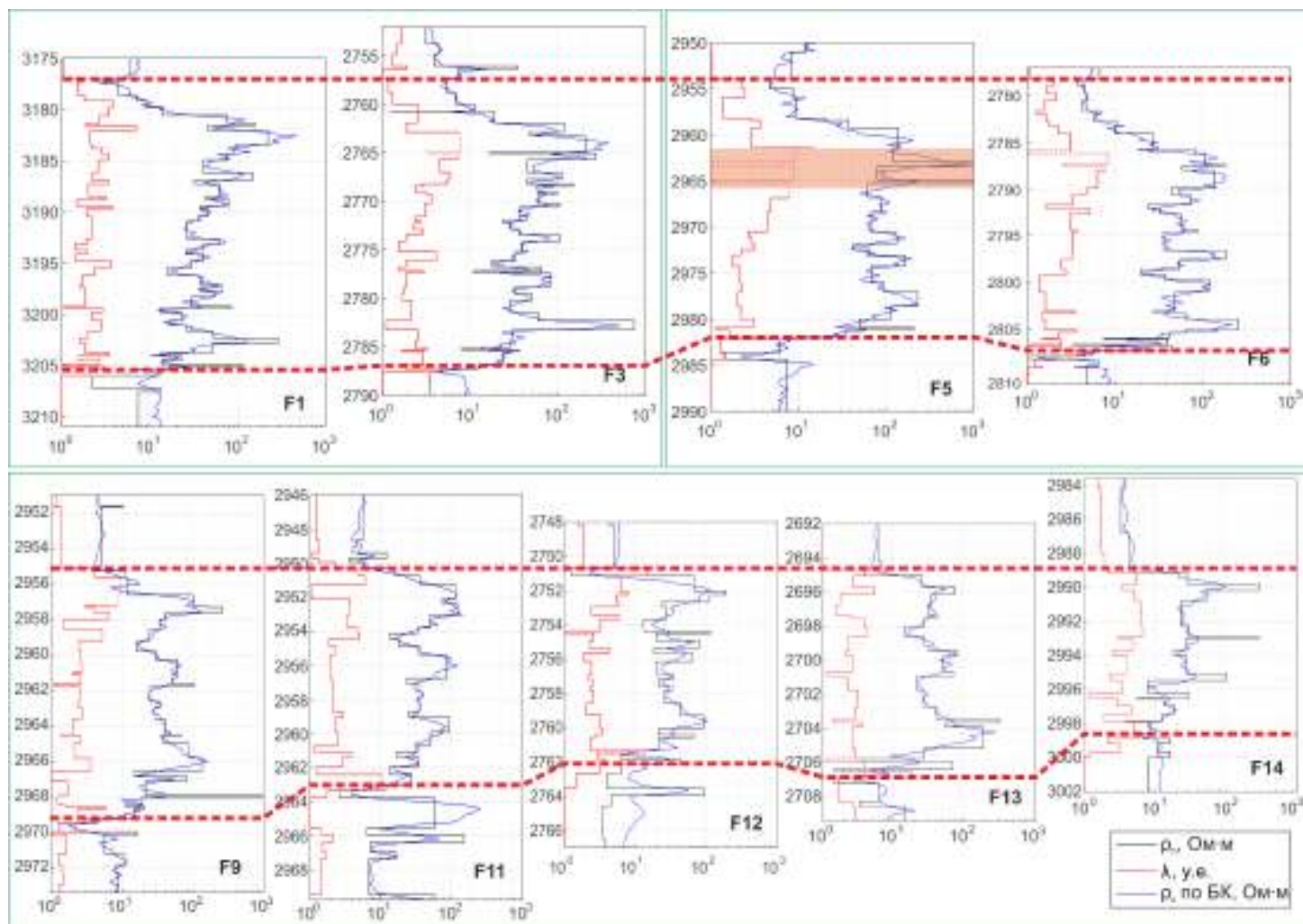


Рисунок 4.2.8 – Латеральная корреляция результатов инверсии данных БКЗ, измеренных в скважинах Федоровского месторождения. Красным цветом в скважине F5 выделен интервал некондиционных данных. Пунктирными линиями показаны границы баженовской свиты. Зелеными рамками разделены группы скважин (см. рисунок 4.2.2)

Во всех случаях минимальный коэффициент анизотропии определяется в карбонатных прослоях, а максимальные значения (вплоть до потери чувствительности БКЗ к ρ_v) – в кровле высокоомных отложений при переходе к низкоомным.

Коэффициент анизотропии и основные литотипы баженовских отложений

По результатам инверсии данных БКЗ, измеренных на интервалах баженовской свиты в 18 скважинах, получены геоэлектрические модели сред, различия между которыми могут быть объяснены латеральными изменениями.

На рисунке 4.2.9 представлен планшет с данными, измеренными в скважине N1, литотипы, выделенные аналогично работе [*Модель баженовской...*, 2015], и геоэлектрическая модель баженовской свиты, полученная путем инверсии данных БКЗ. Исследования в этой скважине проводились наиболее представительным комплексом ГИС, при этом все измеренные данные являются кондиционными.

Помимо уже упомянутой корреляции λ с данными гамма-каротажа в верхней и средней частях свиты, очень интересным представляется сравнение с данными акустического каротажа, а именно, с интервальным временем пробега поперечной волны. Насыщенность пород свиты органическим веществом приводит к тому, что поперечная волна затухает очень быстро, и зачастую чувствительности приемника не хватает для ее выделения. При этом интервалы, на которых S-волна не регистрируется, совпадают с интервалами максимальных значений λ . Эта корреляция гораздо теснее, чем с горизонтальным сопротивлением или ρ_k по БК.

Наиболее ярко эта связь проявляется на двух интервалах.

Первый интервал (2720.0–2723.5 м) представлен тремя слоями с разным УЭС. Верхние два слоя (высокорadioактивные микститы) по данным гамма-каротажа насыщены керогеном, S-волна на интервалах этих слоев не регистрируется, коэффициенты анизотропии практически равны, но при этом их горизонтальное сопротивление существенно различно (около 400 и 100 Ом·м). В третьем карбонатизированном слое горизонтальное сопротивление такое же высокое (~380 Ом·м), как и в первом, однако λ гораздо ниже (~2.1), а амплитуда S-волны достаточна для регистрации.

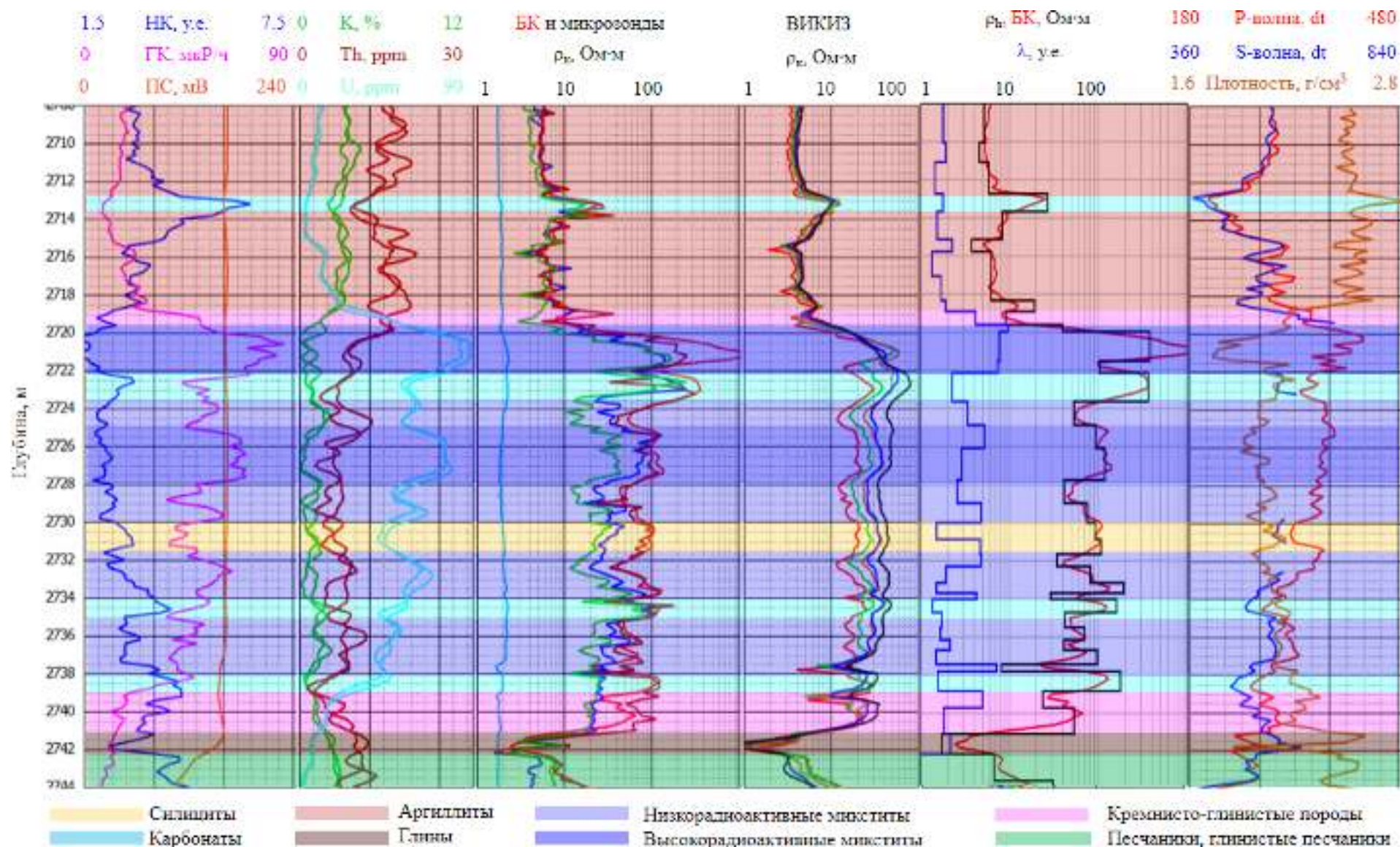


Рисунок 4.2.9 – Планшет ГИС, выделенные литотипы и геоэлектрическая модель баженовской свиты, полученная путем инверсии данных БКЗ по данным из скважины N1

Второй интервал – пласт силицитов (2730.0–2731.5 м) – интересен тем, что по кажущимся характеристикам представляется однородным, однако подбор вертикальной компоненты показывает, что он сложен из двух прослоев с разным вертикальным сопротивлением. S-волна регистрируется в прослое с низким значением λ ($\lambda \approx 1.6$; 2730.0–2730.9 м), но пропадает в прослое с сильной анизотропией ($\lambda \approx 5$; 2730.9–2731.5 м).

В среднем по интервалу свиты наименьшие значения коэффициента анизотропии (1.3–2.1) соответствуют аргиллитам и карбонатным прослоям, а наибольшие (7.0–9.0) – наиболее радиоактивным микститам в кровельной части.

Очевидно, что такие электрические свойства отложений обусловлены не столько содержанием керогена, сколько структурированностью его размещения в породах. На рисунке 4.2.10 представлен керн баженовской свиты после экстракции органического вещества [Емкостные свойства..., 2012]. В связи с высоким содержанием керогена, расположенного в породе послойно, после экстракции керн расслаивается на отдельные слои твердого вещества.



Рисунок 4.2.10 – Керн баженовской свиты после экстракции [Емкостные свойства..., 2012]

На шлифах отложений баженовской свиты из интервалов, насыщенных органическим веществом, также можно наблюдать характерную тонкослоистую структуру (Рисунок 4.2.11). Темные полосы – кероген и нефть, круглые пятна – нефть в радиоляриях [Брехунцов, Нестеров, 2011].

Органическое вещество, как известно, является практически изолятором (удельное электрическое сопротивление порядка 10^{16} Ом·м), поэтому отложения, образованные чередованием прослоев изолятора и относительно проводящих слоев горной породы, могут характеризоваться очень высокими значениями λ . Подобные отложения являются практически непроводящими в направлении, перпендикулярном плоскости напластования, но сохраняют некоторую электропроводность вдоль нее.

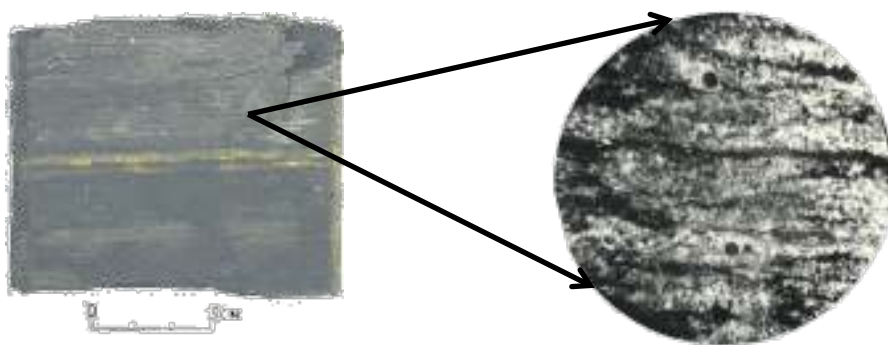


Рисунок 4.2.11 – Шлиф породы баженовской свиты скв. Салымская 10-Р. Увеличение 160 раз [Брехунцов, Нестеров, 2011]

Таким образом, полученные значения коэффициента анизотропии УЭС находят подтверждение в структуре отложений, и определение λ позволяет в условиях баженовской свиты получить новую информацию, недоступную при использовании традиционной методики интерпретации данных электрометрии.

Стоит отдельно отметить, что несмотря на хорошую корреляцию, напрямую связывать распределение коэффициента анизотропии исключительно с наличием структурированного органического вещества некорректно, так как на значения вертикального сопротивления может влиять множество факторов. Так, например, в подошве свиты, где радиоактивность пород резко падает, характер распределения λ существенно меняется, что может свидетельствовать о влиянии трещиноватости или иных причин, не рассматриваемых в данной работе.

Поскольку в других скважинах распределение λ носит схожий характер, сформулированные для скважины N1 закономерности в полной мере справедливы и для них. Поэтому вместо анализа очень схожих и объемных результатов, достигнув некоторого логического завершения в работе с данными БКЗ, перейдем к рассмотрению совместной инверсии сигналов БКЗ и ВЭМКЗ на интервалах песчано-глинистых отложений.

4.3. Инверсия сигналов БКЗ и ВЭМКЗ на интервалах меловых отложений

В отличие от интерпретации данных БКЗ на интервале непроницаемых отложений баженовской свиты, апробация методики совместной обработки данных БКЗ и ВЭМКЗ в

нормальном терригенном разрезе не была привязана к конкретному объекту или глубинам. В качестве объектов выделялись интервалы разного строения, сложенные относительно тонкими прослоями и осложненные карбонатизацией. Электрофизические свойства таких отложений на территории Широкого Приобья Западной Сибири были рассмотрены в пункте 2 второй главы. Свойства терригенных пород на рассматриваемом месторождении Ванкорской группы близки как по генезису, так и по свойствам. Рассмотрим три примера, хорошо иллюстрирующих преимущество разработанного подхода перед традиционными методами интерпретации данных электротометрии.

Пример 1. Совместная инверсия сигналов БКЗ и ВЭМКЗ, измеренных на интервале коллектора БС10 в скважине Федоровского месторождения

Рассмотрим набор каротажных данных, измеренных на интервале коллектора БС₁₀ и вмещающих его пород в вертикальной скважине Федоровского месторождения [Сухокурова, Петров, Нечаев, 2020] (Рисунок 4.3.1). Данные представляют интерес по двум причинам. Во-первых, весь комплекс каротажа проведен за одну спускоподъемную операцию прибором СКЛ-76. Именно при одновременном измерении можно наиболее точно восстановить параметры модели среды с помощью совместной инверсии ВЭМКЗ и БКЗ, так как изменение во времени параметров зоны проникновения может оказывать на сигналы БКЗ и ВЭМКЗ существенное влияние. Во-вторых, визуальные признаки проникновения в данных ВЭМКЗ выражены слабо, за исключением нижней части коллектора, где характерное расхождение значений кажущегося УЭС (ρ_k) для зондов ВЭМКЗ соответствует понижающей зоне проникновения, что при бурении на глинистом буровом растворе отвечает влиянию развитой окаймляющей зоны [Антонов, Сметанина, Михайлов, 2012] при небольшой толщине зоны проникновения.

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

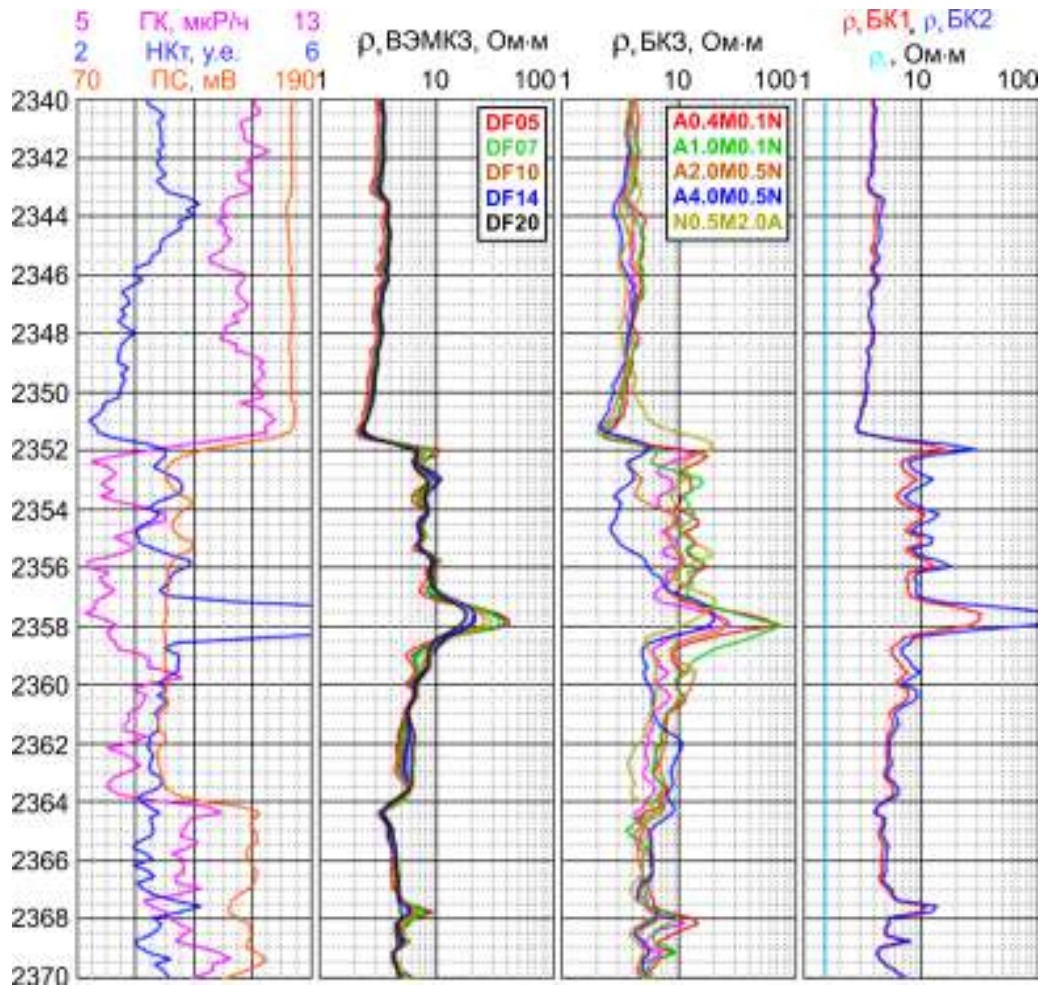


Рисунок 4.3.1 – Диаграммы ГИС, интервал коллектора БС10 и глинистой покрышки. Вертикальная скважина, глинистый буровой раствор

Совместная инверсия данных БКЗ и ВЭМКЗ выполнена согласно разработанной методике. Стартовая модель создана с помощью инверсии данных ВЭМКЗ на базе цилиндрически-слоистой модели с учетом данных ПС, ГК и НКт. В глинистых отложениях варьировались вертикальная и горизонтальная компоненты УЭС и диэлектрическая проницаемость. В проницаемых – УЭС и ширина ЗП и ОЗ, ρ_h и ρ_v неизменной части пласта. Уплотненные карбонатизированные пласты считались изотропными, так как широкая эквивалентность не позволяет в данных условиях определить их ρ_h и ρ_v независимо.

Полученная геоэлектрическая модель и сравнение рассчитанных в ней сигналов БКЗ и ВЭМКЗ с измеренными приведены на рисунке 4.3.2. Результат инверсии характеризуется высокой точностью подбора практических данных: рассчитанные по всем точкам интервала средние относительные невязки подбора сигналов БКЗ $\delta_{\text{avg}} = 5.22\%$, разности фаз ВЭМКЗ – $\Delta_{\text{avg}} = 0.52^\circ$.

Наибольший коэффициент анизотропии УЭС определен для глинистых отложений ($\lambda \sim 1.3-1.7$). В большей части песчаных пластов анизотропия более низкая ($\lambda \sim 1.0-1.3$). В двух пластах в нижней части разреза λ превышает значение 1.5: в обоих случаях рядом находятся контрастные границы, поэтому это повышение может быть обусловлено нелокальностью откликов градиент-зондов и небольшой неувязкой сигналов. В рассматриваемом примере подбирается одно эффективное значение относительной диэлектрической проницаемости (ϵ), определяемое самой высокой частотой ВЭМКЗ. В проницаемых пластах значения ϵ зафиксированы на характерном для этих песчаников значении, равном 10, так как корректно восстановить значения при наличии зон проникновения нельзя из-за широкой модельной эквивалентности и слабой чувствительности к ϵ при невысоком УЭС отложений.

Совместная инверсия восстанавливает детальную модель среды со сложным профилем изменения УЭС от стенки скважины вглубь пласта. При инверсии только данных ВЭМКЗ широкая эквивалентность между шириной и УЭС окаймляющей зоны позволяют использовать её наличие лишь как качественный признак наличия в пласте подвижной нефти. При инверсии совместно с БКЗ эта эквивалентность значительно сужается, что позволяет, с использованием дополнительной априорной информации о разрезе и процессе бурения, судить также и о проницаемости пластов-коллекторов [*Новый аппаратный...*, 2010]. При двумерной инверсии сигналов БКЗ и ВЭМКЗ учитывается существенное влияние вышележащего высокоомного уплотненного прослоя на сигналы, измеренные ниже по разрезу, и восстанавливаются параметры измененных фильтрацией бурового раствора зон в проницаемых пластах.

По радиальному профилю УЭС коллектор делится на две части: 2352.2–2355.7 м и 2355.9–2363.8 м. В интервале 2353.8–2355.7 м породы уплотненные глинистые. Под ними находится высокоомный карбонатизированный пласт, ниже – нефтеводонасыщенные песчаные породы, УЭС которых снижается с глубиной, отражая гравитационное распределение нефти и пластовой воды. Почти во всех нефтеводонасыщенных пластах определяются выдержанные по ширине зоны проникновения и окаймляющие зоны. УЭС окаймляющих зон уменьшается с глубиной, а ширина увеличивается. Последнее также соответствует гравитационному распределению флюидов: явно выраженная окаймляющая зона

формируется в пласте с подвижной нефтью, и чем больше содержание нефти, тем выше УЭС и меньше толщина этой зоны.

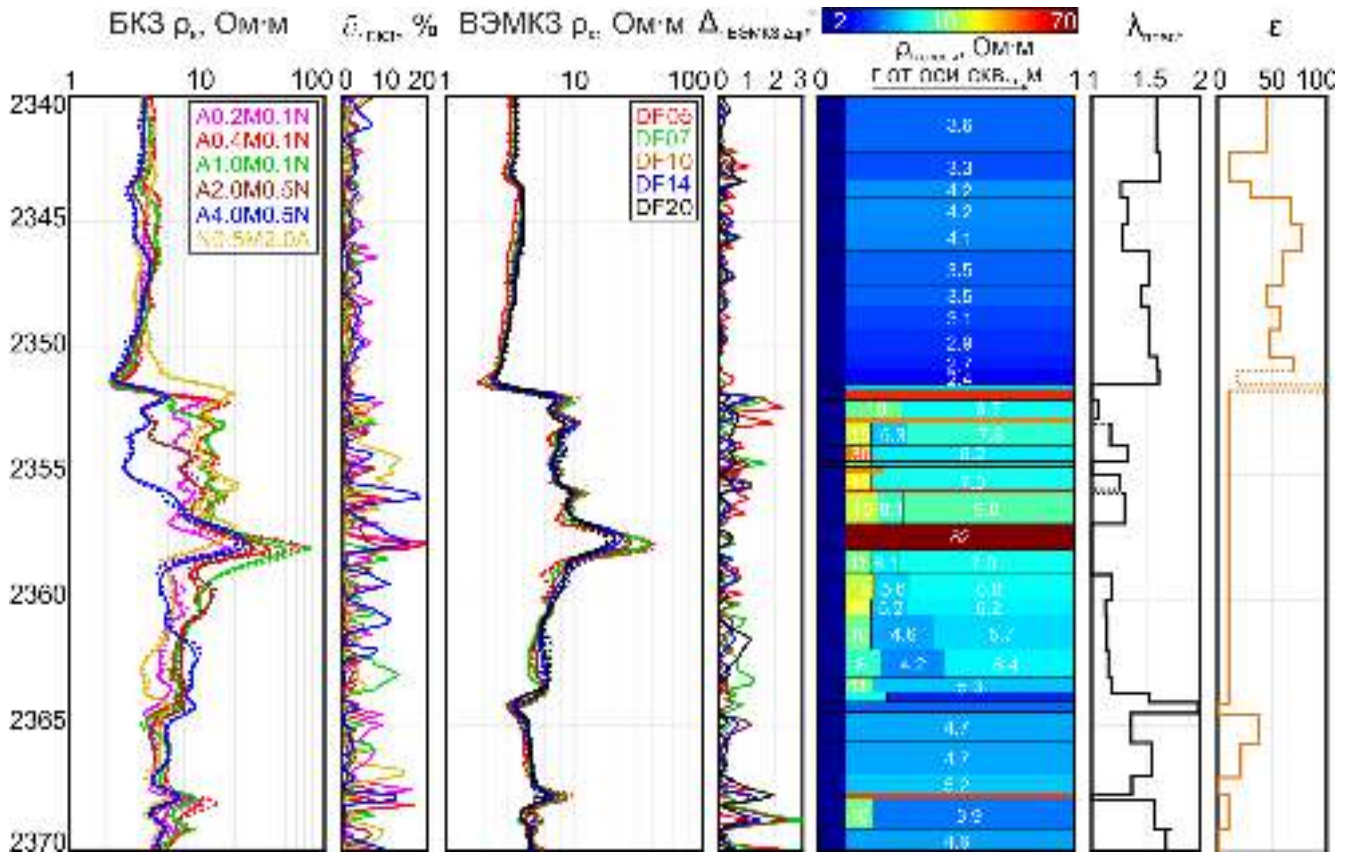


Рисунок 4.3.2 – 2D геоэлектрическая модель коллектора BC10. Слева направо: диаграммы измеренных (пунктир) и рассчитанных (сплошные линии) сигналов БКЗ (кажущееся УЭС); поточечные невязки измеренных и рассчитанных сигналов БКЗ; диаграммы ρ_k ВЭМКЗ (измерение и расчет); поточечные невязки для ВЭМКЗ; распределение горизонтального УЭС в пластах модели; коэффициент электрической анизотропии λ ; относительная диэлектрическая проницаемость ϵ . Пунктиром на диаграммах $\lambda_{\text{пласт}}$ и ϵ отмечены слои, для которых чувствительность сигналов к параметрам недостаточна для их определения с допустимой погрешностью

Наибольший интерес представляет часть коллектора в интервале глубин 2358–2364 м. В этом проницаемом интервале по данным ВЭМКЗ кажущееся УЭС увеличивается с длиной зонда с 4.6 до 6.4 Ом·м, то есть не наблюдается повышающей зоны проникновения, характерной для вскрытия на глинистом растворе. Монотонно возрастающая

кривая зондирования характерна для однофазного флюидонасыщения. При этом кажущееся УЭС 4.6 Ом·м соответствует насыщению преимущественно пластовой водой, а 6.4 Ом·м – смешанному насыщению. По этой причине оценить нефтесодержание по значению ρ_k и его радиальному распределению невозможно. Окаймляющая зона по результатам совместной инверсии выявляется во всех пластах этого интервала, что подтверждает наличие подвижной нефти.

Пример 2. Совместная инверсия сигналов БКЗ и ВЭМКЗ, измеренных на интервале меловых отложений в скважине месторождения Ванкорской группы

Для совместной инверсии, с некоторыми допущениями, можно использовать и комплекс разновременных измерений БКЗ и ВЭМКЗ, если между измерениями прошло не очень большое время и не проводились операции в скважине, связанные с дополнительной фильтрацией в проницаемые пласты. Пример диаграмм таких данных в меловом разрезе показан на рисунке 4.3.4.

По данным кавернометрии (DS, MDS) и микрозондов (МБК, МРЗ, МГЗ) отчетливо выделяются признаки проникновения фильтрата бурового раствора в пласты песчаника. В то же время на данных ВИКИЗ напротив этих пластов расхождение сигналов отсутствует. Напротив непроницаемых глинистых пластов кривые зондирования ВИКИЗ соответствуют модели с понижающим проникновением. Определяемая на основе кажущегося УЭС по ВИКИЗ модель среды очевидным образом противоречит данным других методов.

Совместная обработка данных ВИКИЗ и БКЗ с применением разработанной методики позволяет устранить это кажущееся несоответствие, учесть влияние на сигналы карбонатизированных пропластков повышенного электрического сопротивления, определить УЭС проницаемых пластов-коллекторов с выделением окаймляющей зоны, являющейся прямым признаком наличия в пластах подвижной нефти. Восстанавливается детальная модель среды со сложным профилем радиального изменения УЭС. Достоверность полученной модели подтверждается как точностью подбора измеренных сигналов (относительное среднеквадратическое расхождение рассчитанных и измеренных данных БКЗ и ВИКИЗ по всем точкам измерений составляет 6.1%), так и соответствием результата инверсии другим методам ГИС, измеренным в скважине.

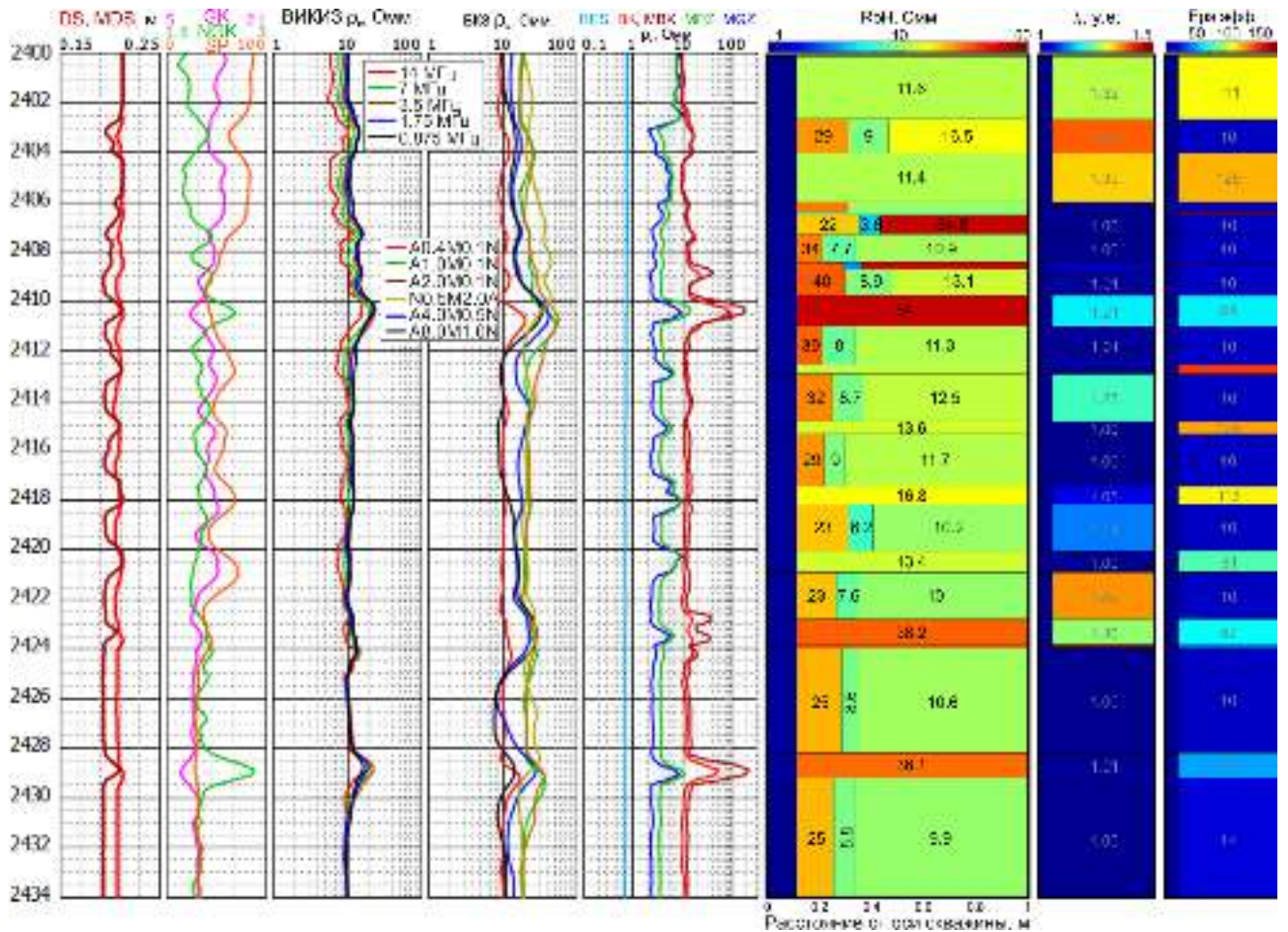


Рисунок 4.3.3 – Данные ГИС, измеренные на интервале переслаивания песчано-глинистых отложений (слева), и результат совместной двумерной инверсии БКЗ и ВИКИЗ (справа)

Пример 3. Оценка вертикального УЭС песчано-глинистого коллектора по данным БКЗ, измеренных в скважине Федоровского месторождения

В качестве последнего примера представляется важным рассмотреть возможности методики в случае несовместности данных БКЗ и ВЭМКЗ.

Рассмотрим пример инверсии практических данных БКЗ, измеренных на интервале песчано-глинистого нефтеводонасыщенного коллектора юрского возраста в скважине Широкого Приобья [Петров, Сухорукова, 2020] (Рисунок 4.3.4). Выраженная дисперсия диэлектрической проницаемости вмещающих коллектор глинистых отложений и большое время между измерениями не позволяют применить инструменты совместной инверсии данных БКЗ и ВЭМКЗ. Тем не менее, согласно выводам, полученным в работе (глава 2, пункт 4), относительно простое строение интервала позволяет оценить вертикальное УЭС отложений, используя в инверсии только данные БКЗ.

По результатам двумерной инверсии данных БКЗ (Рисунок 4.3.5) вмещающие коллектор глинистые отложения характеризуются сильной анизотропией: среднее значение $\frac{\rho_v}{\rho_h} \sim 12$. По данным гамма-каротажа (ГК) коллектор заглинизирован, что подтверждается результатами обработки данных БКЗ: в изотропной модели невозможно подобрать сигналы длинных зондов. В то же время добавление вертикального УЭС в пласты коллектора позволяет добиться хорошего совпадения рассчитанных и измеренных сигналов: среднее значение относительной невязки сигналов δ в рассматриваемой модели составляет 3.8%.

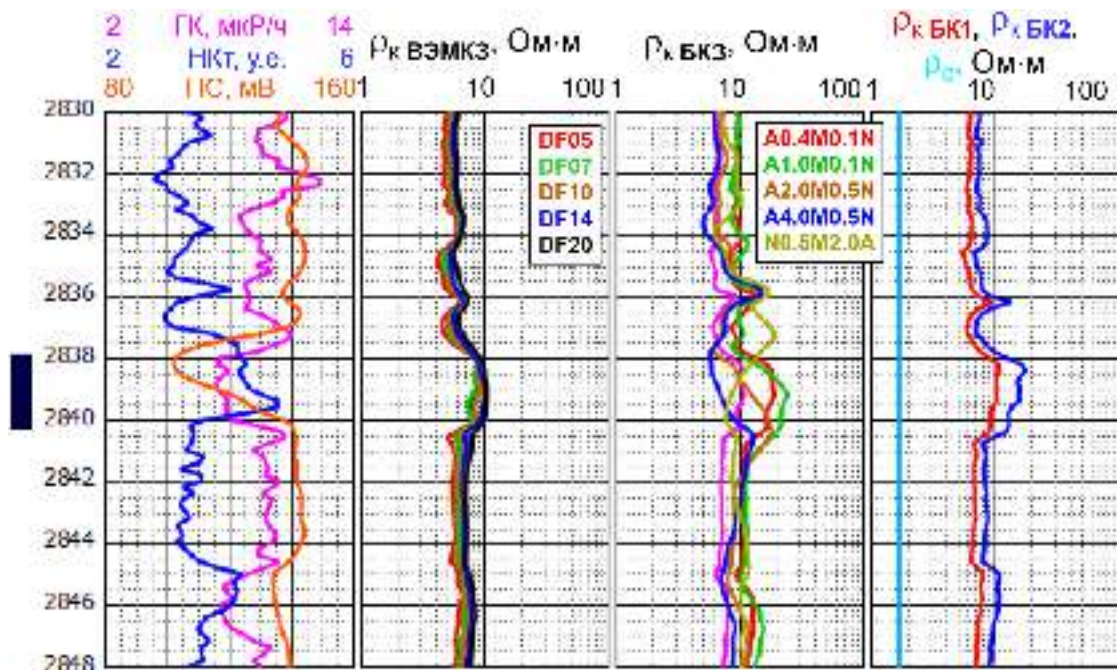


Рисунок 4.3.4 – Данные ГИС, измеренные на интервале песчано-глинистого коллектора юрского возраста и вмещающих его отложений: ГК – гамма-каротаж, НКТ – нейтронный каротаж, ПС – потенциал самополяризации, кажущееся УЭС по методам ВЭМКЗ, БКЗ, БК и УЭС бурового раствора. Синим прямоугольником отмечен интервал коллектора

Анализ устойчивости найденного решения, проведенный с использованием разработанного алгоритма (глава 2 пункт 4), показывает, что медианные значения и максимумы полученных распределений всех параметров не соответствуют значениям модели, использованной для анализа (при работе алгоритма варьировались параметры всех пластов). Это несоответствие демонстрирует важность оценки погрешностей и недостаточную

представительность единичного результата инверсии данных БКЗ, измеренных в пронизаемых анизотропных разрезах.

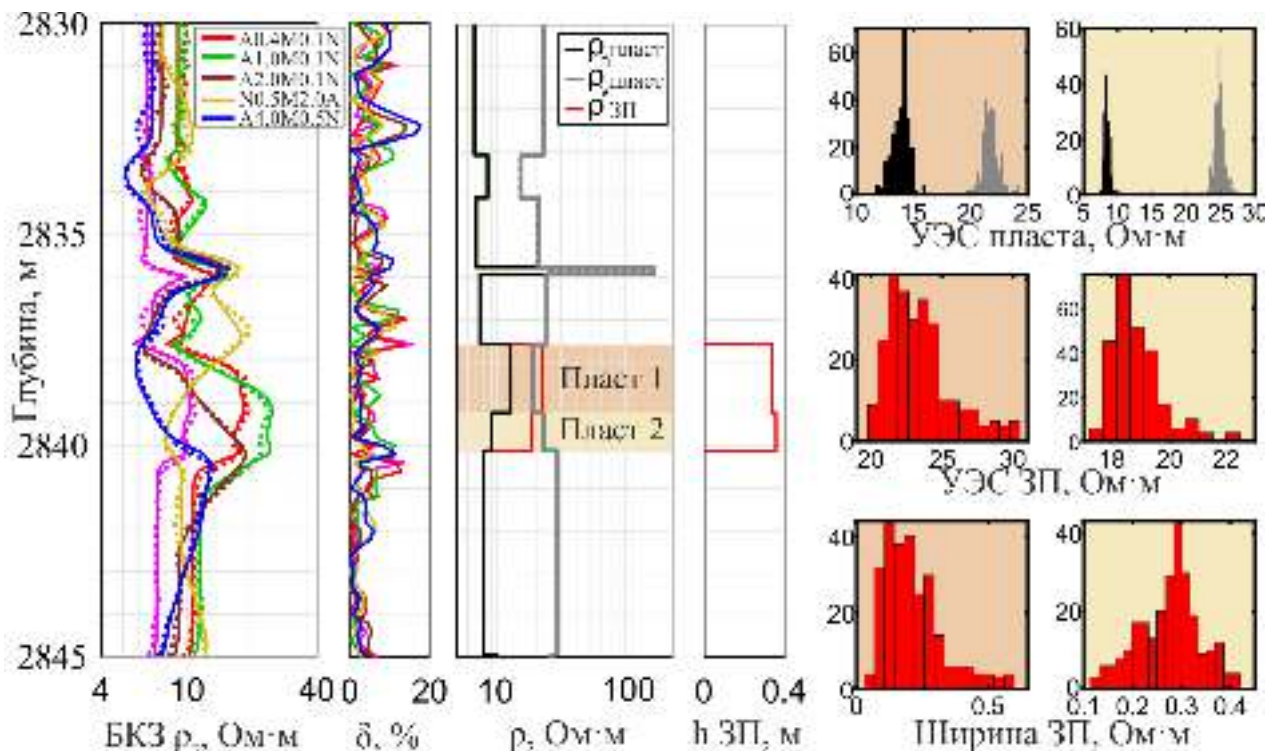


Рисунок 4.3.5 – Слева результат двумерной инверсии практических данных БКЗ. Справа оценка погрешности восстанавливаемых параметров коллектора с применением разработанного алгоритма

Наименее устойчивым параметром в обоих пластах коллектора является ширина зоны проникновения. Это отражает эквивалентность параметров ЗП: практически идентичные сигналы можно получить при разном соотношении ее УЭС и ширины. УЭС верхнего пласта коллектора с вероятностью 95% определяется в пределах $12 \text{ Ом}\cdot\text{м} \leq \rho_h \leq 15 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $20 \text{ Ом}\cdot\text{м} \leq \rho_v \leq 23.3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ с медианными значениями $\rho_h = 13.7 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_v = 23.3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. УЭС нижнего – $7.7 \leq \rho_h \leq 9.4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $23.5 \text{ Ом}\cdot\text{м} \leq \rho_v \leq 26.6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ с медианными значениями $\rho_h = 8.3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_v = 24.7 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Полученные медианные значения ρ_h и ρ_v в верхнем пласте коллектора соответствуют переслаиванию анизотропных глин, аналогичных по электрическим свойствам вмещающим глинистым отложениям, и изотропного песчаника с УЭС $19 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при доле глинистых прослоев $\approx 25\%$, что не противоречит уровню ГК. Соотношение УЭС в нижнем пласте коллектора несколько выше, что может быть вызвано уплотнением песчаника

или его карбонатизацией, чему отвечает увеличение значений нейтронного каротажа. Для более точного анализа необходимо привлечение дополнительной информации о разрезе, например, данных пластовых микроимджеров.

В рамках апробации подобным образом было обработано более 1000 м практических данных, на основе которых построены геоэлектрические модели коллекторов разного насыщения и вмещающих их отложений. С применением разработанной методики в большинстве случаев удалось построить непротиворечивые модели прискважинного пространства, удовлетворяющие не только данным БКЗ и ВЭМКЗ, но и другим методам ГИС, измеренным в скважинах. В случае невозможности построения согласованной по данным БКЗ и ВЭМКЗ модели объяснены причины несогласования: выраженное влияние диэлектрической дисперсии или эксцентриситета прибора на высокочастотные сигналы ВИКИЗ/ВЭМКЗ, большое время между измерениями, приведшее к существенному изменению прискважинной зоны, несоблюдение технологии измерений и др.

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.

Подход протестирован на большом количестве реалистичных изотропных и анизотропных моделей песчано-глинистых отложений со сложным радиальным профилем УЭС. Результаты тестирования показывают хорошую точность восстановления практически значимых модельных параметров в типичных для западносибирского терригенного разреза условиях. Сигналы наиболее чувствительны к параметрам неизмененных частей пластов и их мощности, наименее – к параметрам окаймляющей зоны. При этом ошибки определения параметров измененных зон не приводят к существенному увеличению погрешности определения пластовых параметров.

Рассмотрено влияние на сигналы ВЭМКЗ и БКЗ аппроксимации плавного изменения УЭС грубым кусочно-постоянным приближением как в радиальном, так и в вертикальном направлении. Обоснована применимость кусочно-постоянной параметризации прискважинной области для совместной инверсии данных БКЗ и ВЭМКЗ с определением вертикального УЭС.

С применением новейших высокоточных алгоритмов численного моделирования сигналов БКЗ в трехмерных моделях анизотропных сред с учетом влияния скважины и корпуса прибора, рассмотрено влияние на измеряемые параметры и результаты инверсии отклонения угла пересечения скважины и поверхности напластования от нормального как

в моделях бесконечно-мощных пластов, так и в моделях, сложенных относительно тонкими пластами. Обосновано применение разработанной методики в терригенном разрезе при отклонении угла пересечения скважины и поверхности напластования от нормального до 15 градусов.

Разработан алгоритм для оценки погрешности определения параметров среды при одномерной и двумерной инверсии данных гальванических и индукционных зондирований. Результаты тестирования на синтетических данных показывают значительное преимущество разработанного алгоритма перед подходом на основе анализа функций чувствительности. Алгоритм опробован на результатах инверсии практических сигналов БКЗ, измеренных на интервале песчано-глинистого коллектора юрского возраста и вмещающих его отложений. Результаты демонстрируют недостаточную представительность единичного результата инверсии данных БКЗ в проницаемых анизотропных разрезах.

С применением разработанной методики количественной интерпретации данных БКЗ построены реалистичные геоэлектрические модели баженовских отложений по данным, измеренным в 15 скважинах Федоровского и Рускинского месторождений. Модели характеризуются достаточно хорошей латеральной корреляцией распределения коэффициента анизотропии УЭС по глубине.

Установлена связь анизотропии УЭС с основными типами пород свиты в пределах высокоомных отложений. Наименьшая анизотропия характерна для карбонатных пропластков, наибольшая – для высокорadioактивных смешанных пород, средние значения – для кремнисто-глинистых пород, силицитов и низкорadioактивных микститов. Полученные высокие значения анизотропии УЭС обусловлены структурой отложений: органическое вещество является практически изолятором, поэтому отложения, образованные чередованием прослоев изолятора и относительно проводящих слоев твердой породы, могут характеризоваться очень высокими значениями λ . Подобные отложения являются практически непроводящими в направлении, перпендикулярном плоскости напластования, но сохраняют свойства проводника вдоль нее. Связь подтверждена данными акустического каротажа. Насыщенность пород свиты органическим веществом приводит к тому, что поперечная волна затухает очень быстро и, зачастую, чувствительности приемника не хватает для ее выделения. Интервалы, на которых S-волна не регистрируется, совпадают с интервалами максимальных значений λ . При этом связь с коэффициентом анизотропии гораздо теснее, чем с горизонтальным сопротивлением или ρ_k по БК.

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. Построены детальные геоэлектрические модели коллекторов с определением электрофизических параметров пластов и измененных фильтрацией бурового раствора зон и с выявлением нефтесодержащих интервалов.

Дальнейшее развитие предложенной методики 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. Также использование нейросетевых аппроксимаций прямых задач позволит без существенной потери производительности вычислений привлекать для совместной инверсии данные низкочастотного индукционного и фокусированного бокового каротажа.

Еще одним перспективным направлением представляется автоматизация создания стартовой модели для инверсии на основе комплекса данных ГИС. Автоматическое создание стартового приближения геоэлектрической модели может значительно упростить работу интерпретатора и снизить требования к его квалификации. Стоит отметить, что на данном этапе развития технологий создание универсального алгоритма представляется маловероятным, однако возможны решения для отдельно взятых площадей.

С исследовательской точки зрения представляет интерес анализ сигналов каротажа в средах с наклоном осей тензора электропроводности. По некоторым данным, путем совместной инверсии сигналов БКЗ и БК возможно восстановление не только горизонтальной и вертикальной составляющих тензора, но и угла наклона его главных осей [Нечаев, Глинских, 2018]. Углубленный анализ данных различных методов электрокаротажа и возможностей их инверсии в таких моделях может открыть новые перспективы для исследования трещиноватых коллекторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агбаш, И. А. Построение быстрых аналогов прямых и обратных задач бокового электрического зондирования скважин с использованием технологии нейронных сетей / И. А. Агбаш, А. Ю. Соболев // Интерэкспо ГЕО-Сибирь–2017. XI Междунар. науч. конгр., 18–22 апреля 2016 г., Новосибирск, сб. материалов в 4 т. – Т. 2. – Новосибирск: СГУГиТ – 2016. No. 1. – С. 196-200.
2. Аксельрод, С.М. Влияние частотной дисперсии электрических свойств горных пород на результаты определения удельного сопротивления пластов (по материалам зарубежной литературы) / С.М. Аксельрод // НТВ «Каротажник». – 2007. – Вып. 163. – С. 103-126.
3. Алгоритмы обработки и инверсии данных электромагнитного зонда с тороидальными катушками при изучении макроанизотропных свойств пластов-коллекторов / М.И. Эпов, И.В. Михайлов, В.Н. Глинских, М.Н. Никитенко, И.В. Суродина // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. – Т. 330. – № 6. – С. 187–197.
4. Альпин, Л.М. Дипольные электрические зондирования / Л.М. Альпин // Разведка недр. – 1941 – № 1.
5. Альпин, Л.М. Определение поперечного удельного сопротивления пластов по измерениям в скважине / Л.М. Альпин // Изв. вузов. Геология и разведка. – 1978. – № 4. – С. 81-95.
6. Антонов, Ю.Н. Окаймляющая зона как признак подвижной нефти в терригенных коллекторах / Ю.Н. Антонов, Л.В. Сметанина, И.В. Михайлов // Каротажник. – 2012. – № 6. – С. 16-40.
7. Аппаратура высокочастотного индукционного каротажного изопараметрического зондирования: Руководство по эксплуатации. ЛУЧ. 6.00.00.00 РЭ, Новосибирск. 2005. – 16 с.
8. Аппаратурный комплекс СКЛ для каротажа в нефтегазовых скважинах и его интерпретационная база / К.Н. Каюров, В.Н. Еремин, А.Н. Петров, К.В. Сухорукова, М.Н. Никитенко, В.С. Аржанцев // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 9. – С. 38-43.

9. Аржанцев, В.С. Чувствительность к геоэлектрическим параметрам и двумерная инверсия сигналов бокового каротажного зондирования / В.С. Аржанцев, К.В. Сухорукова, О.В. Нечаев // Каротажник. – 2012. – Вып. 220. – С. 105-115.

10. Аюнов, Д.Е. Теплопроводность пород баженовской свиты / Д.Е. Аюнов, А.Д. Дучков, Л.С. Соколова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь–2015. XI Междунар. науч. конгр. (г. Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.): Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»: Сб. материалов в 3 т. – Т. 2. – 2015 – С. 14-19.

11. Баженовский горизонт Западной Сибири (стратиграфия, палеогеография, экосистема, нефтеносность) / Ю.В. Брадучан, В.Ф. Гришкевич, В.Г. Елисеев и др. // Новосибирск: Наука. – 1986. – 217 с.

12. Бердов, В.А. Выделение пластов межскважинного пространства по данным каротажа в программном комплексе Petrel / В.А. Бердов, А.А. Власов, В.В. Лапковский // Интерэкспо ГЕО-Сибирь–2012. VIII Междунар. науч. конгр., 10–20 апреля 2012 г., Новосибирск, сб. материалов в 3 т. Т. 2. – Новосибирск: СГГА, – 2012. – С. 76-80.

13. Брехунцов, А.М. Нефть битуминозных глинистых, кремнистоглинистых и карбонатно-кремнисто-глинистых пород / А.М. Брехунцов, И.И. Нестеров // Горные ведомости. – 2011. – № 1. – С. 28-39.

14. Брылкин, Ю.Л. О диэлектрической проницаемости горных пород осадочного происхождения / Ю.Л. Брылкин, Л.И. Дубман // Геология и геофизика. – 1972. – № 1. – С. 117-121.

15. Геоэлектрические модели меловых коллекторов Западной Сибири и сигналы электрокаротажа / К.В. Сухорукова, А.М. Петров, И.А. Москаев, О.В. Нечаев, М.Н. Никитенко // Интерэкспо ГЕО-Сибирь–2019. XV Междунар. науч. конгр., 24–26 апреля 2019 г., Новосибирск, сб. материалов в 9 т. Т. 2. – Новосибирск : СГУГиТ, – 2019. – С. 79-88.

16. Глинских, В.Н. Линеаризованные решения прямых и обратных двумерных задач высокочастотного электромагнитного каротажа в проводящих средах с учетом токов смещения / В.Н. Глинских, М.Н. Никитенко, М.И. Эпов // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54. – № 12. – С. 1942-1951.

17. Глинских, В.Н. Моделирование диаграмм электромагнитного каротажа на графических процессорах / В.Н. Глинских, М.И. Эпов, И.Б. Лабутин // Вычислительные технологии. – 2008. – Т. 13, № 6. – С. 50-60.

18. Глинских, В.Н. Новый подход к моделированию и инверсии данных электромагнитного каротажа в тонкослоистых коллекторах / В.Н. Глинских, М.И. Эпов // Геофизический журнал. – 2009. – Т. 31. – № 4. – С. 119-127.
19. Глинских, В.Н. Численное моделирование диаграмм электромагнитного каротажа при описании электропроводности тонкослоистых коллекторов непрерывными функциями / В.Н. Глинских, М.И. Эпов // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50, № 8. – С. 941-949.
20. Губатенко, В.П. Эффект Максвелла-Вагнера в электроразведке / В.П. Губатенко // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1991. – № 4. – С. 88-89.
21. Дахнов, В.Н. Электрические и магнитные методы исследования скважин: Учебник для вузов / В.Н. Дахнов. – 12-е изд., перераб. – М.: Недра, – 1981. – 344 с.
22. Дашевский, Ю.А. Квазитрехмерное математическое моделирование диаграмм неосесимметричных зондов постоянного тока в анизотропных разрезах / Ю.А. Дашевский, И.В. Суродина, М.И. Эпов // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2002. – Т. V, № 3(11). – С. 76-91.
23. Дашевский, Ю.А. Определение коэффициента анизотропии установками бокового каротажного зондирования / Ю.А. Дашевский, Л.А. Табаровский // Геология и геофизика. – 1987, – № 9. – С. 131-132.
24. Добрынин, В.М. Проблема коллектора нефти в битуминозных глинистых породах баженовской свиты / В.М. Добрынин // Известия АН СССР. Серия геологическая. 1982. – № 3. – С. 120-126.
25. Друскин, В.Л. Об одном итерационном алгоритме решения двумерной обратной задачи бокового каротажного зондирования / В. Л. Друскин, Л. А. Книжнерман // Геология и геофизика. – 1987. – № 9. – С. 118-123.
26. Друскин, В.Л. Разработка методов интерпретации бокового каротажного зондирования в неоднородных осесимметричных средах : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.12 / В.Л. Друскин. – Москва. – 1984. – 121 с.
27. Ельцов, Т.И. Низкочастотные диэлектрические спектры пород, насыщенных водонефтяной смесью / Т.И. Ельцов, В.Н. Доровский, Д.Н. Гапеев // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 8. – С. 1270-1281.

28. Емкостные свойства пород баженовской свиты / Р.А. Хамидуллин, Г.А. Калмыков, Д.В. Корост, Н.С. Балушкина, А.И. Бакай // Тезисы докладов Российской технической нефтегазовой конференции и выставки SPE по разведке и добыче. МГУ, Москва. – 2012. – С. 1-11.

29. Журавлев, В.П. Кривые сопротивления анизотропного пласта конечной мощности / В.П. Журавлев // Прикладная геофизика. – 1971. – № 64. – С. 194-197.

30. Журавлев, В.П. Определение удельного сопротивления анизотропных пластов / В.П. Журавлев // Прикладная геофизика. – 1968. – № 51. – С. 170-186.

31. Игнатов, В.С. Учет влияния скважины и эксцентриситета на показания ВИКИЗ / В.С. Игнатов, К.В. Сухорукова // ГЕО-Сибирь–2009. Т. 2. Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых: сб. материалов V Международного научного конгресса (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.). – 2009. – С. 6-10.

32. Исследование возможностей электрического и электромагнитного каротажа в электрически макроанизотропных пластах, вскрытых наклонно-горизонтальными скважинами / М.И. Эпов, М.Н. Никитенко, К.В. Сухорукова, В.Н. Глинских // НТВ «Каротажник». – 2016. – № 2. – С. 64-79.

33. Камкина, А.Д. Литологический контроль нефтегазоносности в платформенных областях. Квалификационная работа на соискание степени магистра геологии / А.Д. Камкина // НГУ, Новосибирск. – 2013. – 54 с.

34. Каринский, А.Д. Математическое и лабораторное моделирование дипольных зондов каротажа КС в изотропных и анизотропных моделях среды / А.Д. Каринский, М.Д. Кауркин // Геофизика. Научно-технический журнал. – 2013. – № 4. – С. 36-42.

35. Каринский, А.Д. Результаты 2D-моделирования для зондов электромагнитного и электрического каротажа при различной толщине прослоев в макроанизотропных пластах / А.Д. Каринский, Д.С. Даев // Геофизика. – 2011. – № 3. – С. 32-42.

36. Каринский, А.Д. Решения прямых задач о поле тороидальной антенны в анизотропной среде / А.Д. Каринский // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. – 2003. – № 1. – С. 9-20.

37. Каринский, А.Д. Электромагнитное поле в осесимметричных моделях макроанизотропной и микроанизотропной среды / А.Д. Каринский // Геофизика. – 2006. – № 6. – С. 23-28.

38. Кауркин, М.Д. Лабораторное моделирование дипольных зондов каротажа сопротивления и зондов электромагнитного каротажа с тороидальными антеннами : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.10 / М.Д. Кауркин // РГГУ, Москва. – 2015. – 138 с.
39. Кашик, А.С. Анизотропия горных пород по их удельному электрическому сопротивлению / А.С. Кашик, М.К. Макарова // Изв. вузов. Геология и разведка. – 1970. – № 7. – С. 107-110.
40. Киндюк, В.А. Оценка проницаемости на основе многофизичной модели пласта / В.А. Киндюк, Г.В. Нестерова, И.Н. Ельцов // Каротажник. – 2017. – № 5 (275). – С. 60-69.
41. Кнеллер, Л.Е. Определение удельного электрического сопротивления пластов при радиальной и вертикальной неоднородности разреза скважин / Л.Е. Кнеллер, А.П. Потапов // Геофизика, – 2010. – № 1. – С. 52-64.
42. Козяр, В.Ф. Выделение проницаемых пород-коллекторов по параметрам волны Стоунли (результаты промышленных испытаний) / В.Ф. Козяр, Н.К. Глебочева, Н.Я. Медведев // НТВ Каротажник. – 1999. – № 56. – С. 52-59.
43. Козяр, В.Ф. Измерения параметров упругих волн зондами с монопольными и дипольными преобразователями / В.Ф. Козяр, Н.А. Смирнов, Д.В. Белоконь, Н.В. Козяр // НТВ «Каротажник». – 1998. – № 42. – С.14-30.
44. Комплекс геофизический скважинный автономный СКЛ-А: Руководство по эксплуатации. ЛУЧ. 452.00.00.00 РЭ, Новосибирск. – 2013. – 65 с.
45. Копытов, Е.В. Восстановление анизотропии удельного электрического сопротивления по данным высокочастотного электромагнитного каротажа в субгоризонтальных скважинах / Е.В. Копытов, К.В. Сухорукова // Науки о Земле. Современное состояние: Материалы V Всероссийской молодежной научно-практической школы-конференции. 30 июля - 5 августа 2018 г., Геологический полигон "Шира", Республика Хакасия. – 2018. – С. 44-45.
46. Кошкина, Ю.И. Разработка методов, алгоритмов и реализующего их программного обеспечения для выполнения многомерной инверсии данных индукционного каротажа : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.18 / Ю.И. Кошкина // НГТУ, Новосибирск. – 2016. – 165 с.

47. Куляпин, П.С. Прогноз коллекторов в разрезе баженовской свиты по материалам керн и геофизических исследований скважин / Куляпин П.С., Соколова Т.Ф. // Известия ТПУ. 2015. – Т. 326. – № 1. Ресурсы планеты. – С. 118-133.

48. Лебедев, Б.А. Литологический контроль нефтегазоносности в платформенных областях : автореферат дисс. ... докт. г.-м. наук / Б.А. Лебедев // – Москва: ВНИГРИ. – 1983. – 32 с.

49. Левицкая, Ц.М. Особенности диэлектрической релаксации в породах баженовской свиты / Ц.М. Левицкая, И.А. Ворсина // Физика Земли. – 1988. – № 9. – С. 100-105.

50. Литвиченко, Д.А. Влияние смещения прибора к стенке скважины на сигналы электромагнитного каротажа и их трансформации / Д.А. Литвиченко, К.В. Сухорукова, О.В. Нечаев // НТВ «Каротажник». – 2018. – № 9 (291). – С. 35-45.

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

52. Манштейн, А.К. Устройство для измерения удельной электропроводности и электрической макроанизотропии горных пород / А.К. Манштейн, В.Н. Глинских, В.Н. Еремин, А.Н. Петров, М.И. Эпов // Патент RU 2528276. Открытое акционерное общество «Нефтяная компания «Роснефть» 10.09.2014.

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

54. Модель баженовской свиты на примере данных участка Салымского месторождения / М.А. Павлова, В.Г. Эдер, А.Г. Замирайлова, А.Д. Камкина, В.Н. Глинских // Геология нефти и газа. – 2015. – № 3. – С. 57–62.

55. Нефтегазоносные комплексы юры Западной Сибири и их электрофизические модели / М.И. Эпов, Ю.Н. Кародин, П.Ю. Белослудцев и др. // Новосибирск: ИНГГ СО РАН. – 2014. – 171 с.

56. Нечаев, О.В. Быстрый прямой метод решения обратной задачи электрического каротажа в нефтегазовых скважинах / О.В. Нечаев, В.Н. Глинских // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2017. – № 15. – С. 53-63.

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

58. Новый аппаратный комплекс геофизического каротажа СКЛ и программно-методические средства интерпретации EMF Pro / М.И. Эпов, К.Н. Каюров, И.Н. Ельцов, А.Н. Петров, К.В. Сухорукова, А.Ю. Соболев, А.А. Власов // Бурение и нефть. – 2010 – № 2. – С. 16-19.

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

60. Павлова, Д.М. Интерпретация данных скважинной геоэлектрики на основе единой многофизической модели пласта на примере юрского нефтяного коллектора / Д.М. Павлова, И.Н. Ельцов, Г.В. Нестерова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь–2018. XIV Междунар. науч. конгр., 23–27 апреля 2018 г., Новосибирск, сб. материалов в 6 т. – 2018. – Т. 4. – С. 53-60.

61. Петров, А.М. Быстрая совместная двумерная инверсия данных электромагнитных и гальванических каротажных зондирований с определением вертикального сопротивления / А.М. Петров, О.В. Нечаев, К.В. Сухорукова // 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.

62. Петров, А.М. Возможности и ограничения восстановления параметров анизотропных осесимметричных моделей среды путем инверсии данных БКЗ / А.М. Петров, К.В. Сухорукова, О.В. Нечаев // Интерэкспо ГЕО-Сибирь–2017. XIII Междунар. науч. конгр., 17–21 апреля 2017 г., Новосибирск, сб. материалов в 4 т. Т. 3. – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. – С. 181–186.

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

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

65. Петров, А.М. Новый параллельный алгоритм совместной двумерной инверсии данных электромагнитных и гальванических каротажных зондирований и его тестирование на синтетическом и практическом материале / А.М. Петров, К.В. Сухорукова, О.В. Нечаев // Науки о Земле. Современное состояние: Материалы V Всероссийской молодежной научно-практической школы-конференции. 30 июля - 5 августа 2018 г., Геологический полигон "Шира", Республика Хакасия. – 2018. – С. 56-58.

66. Петров, А.М. Определение анизотропии удельного электрического сопротивления высокоомных отложений по данным бокового каротажного зондирования в вертикальных скважинах / А.М. Петров, К.В. Сухорукова, О.В. Нечаев // Интерэкспо ГЕО-Сибирь–2016. XII Междунар. науч. конгр., 18–22 апреля 2016 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология": сб. материалов в 4 т. Т. 1. – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – С. 229–233.

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

68. Петров, А.М. Совместная двумерная инверсия данных электрического и электромагнитного каротажных зондирований в анизотропных моделях песчано-глинистых отложений / А.М. Петров, К.В. Сухорукова, О.В. Нечаев // НТВ «Каротажник». 2019. – № 3 (297). – С. 85–103.

69. Петров, А.М. Электрическая анизотропия пород баженовской свиты по данным численной инверсии сигналов БКЗ на основе двухмерной анизотропной модели / А.М. Петров // Материалы 53-й Международной Научной Студенческой Конференции МНСК–2015, Геология, Новосибирск. – 2015. – С. 52. ISBN 978-5-4437-0349-7.

70. Прошляков, Б.К. Коллекторские свойства осадочных пород на больших глубинах / Прошляков Б.К., Гальянова Т.И., Пименов Ю.Г. // Москва: Недра. 1987. – 200 с.

71. Пудова, М.А. Оценка возможности одновременного определения удельной электропроводности и диэлектрической проницаемости разреза скважины по данным ВИКИЗ / М.А. Пудова, И.Н. Ельцов, А.Л. Карчевский // НТВ «Каротажник». 2010. – № 5. – С. 83-97.

72. Репин, А.В. Диэлектрическая проницаемость нефтеводонасыщенных кернов баженовской свиты / А.В. Репин, П.П. Бобров, Н.А. Голиков // Актуальные проблемы геологии нефти и газа Сибири: Материалы Всеросс. науч. конф. молодых ученых и студентов, посвящ. 80-летию акад. А.Э. Конторовича. – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2014. – 2014. – С. 228-231.

73. Сидорчук, А.И. Оценка влияния анизотропии на кривые КС в многослойных средах / А.И. Сидорчук, Е.В. Чадаев // Геология и геофизика. – 1972. – № 11. – С. 86-94.

74. Снегирев, А.М. Об экспериментальном определении «истинных» поперечных сопротивлений горных пород в сухих скважинах / А.М. Снегирев, С.А. Великий // Изв. вузов. Геология и разведка. – 1982. – № 9. – С. 157-159.

75. Совместная численная инверсия данных индукционных и гальванических каротажных зондирований в моделях геологических сред с осевой симметрией / И.В. Михайлов, В.Н. Глинских, М.Н. Никитенко, И.В. Суродина // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58. – № 6. – С. 935-947.

76. Суродина, И.В. Моделирование диаграмм высокочастотного электромагнитного каротажного зондирования в скважинах с высокопроводящим раствором / И.В. Суродина, М.И. Эпов // Каротажник. – 2013. – № 5. – С. 60-75.

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

78. Суродина, И.В. Синтетические диаграммы бокового каротажного зондирования в скважинах со сложной траекторией, заполненных биополимерным раствором / И.В. Суродина, М.И. Эпов // Каротажник. 2016. – № 8. – С. 59-69.

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

80. Сухорукова, К.В. Определение электрофизических параметров терригенных отложений на основе совместной численной инверсии данных электрического и электромагнитного каротажа в вертикальных и наклонных скважинах : дис. ... д. техн. наук : 25.00.10 / К.В. Сухорукова // ИНГГ СО РАН, Новосибирск. – 2018. – 357 с.

81. Сухорукова, К.В. Частотная дисперсия эффективной относительной диэлектрической проницаемости по данным БКЗ и ВЭМКЗ / К.В. Сухорукова, М.И. Эпов // 4 Международная научно-практическая конференция и выставка EAGE «Санкт-Петербург–2010. К новым открытиям через интеграцию геонаук», 5–9 апреля 2010, Санкт-Петербург, Россия [Электронный ресурс]. – Санкт-Петербург. – 2010. – В07. – 4 с. – <http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=38515>.

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

83. Сухорукова, К.В. Численная инверсия сигналов бокового каротажного зондирования на основе двухмерной анизотропной модели / К.В. Сухорукова, О.В. Нечаев, А.М. Петров // Интерэкспо ГЕО-Сибирь–2015. XI Междунар. науч. конгр., 13–25 апреля 2015 г., Новосибирск, сб. материалов в 3 т. Т. 2. – Новосибирск : СГУГиТ, – 2015. – С. 259-263.

84. Табаровский, Л.А. Боковое каротажное зондирование в наклонных скважинах / Л.А. Табаровский, Ю.А. Дашевский // Электромагнитные методы исследования скважин. – Новосибирск: Наука. – 1979. – С. 67-129.

85. Табаровский, Л.А. Способ электрического каротажа : Авторское свидетельство № 693314 (СССР). Бюлл. изобретений № 39 / Л.А. Табаровский, Ю.А. Дашевский // – 1979. – 4 с.

86. Талалов, А.Д. Взаимосвязь частотной дисперсии электрических параметров горных пород с их петрофизическими характеристиками / А.Д. Талалов, Д.С. Даев // Изв. Вузов. Геология и разведка. – 2003. – № 5. – С. 52-57.

87. Талалов, А.Д. О структурном механизме частотной дисперсии электрических свойств гетерогенных горных пород / А.Д. Талалов, Д.С. Даев // Физика Земли. – 1996. – № 8. – С. 56-66.

88. Тепловые свойства пород баженовской свиты / Е.Ю. Попов, Ю.А. Попов, М.Ю. Спасенных, Г.А. Калмыков, В.П. Стенин // Нефтяное хозяйство. 2015. – № 10. – С. 32–37.

89. Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ на кабеле в нефтяных и газовых скважинах // отв. ред. В.Ф. Козяр. Тверь: Изд-во «ГЕРС», 2001. – 271 с.

90. Трехмерный индукционный каротаж: старые измерения под новым углом / Б. Андерсон, Т. Барбер, Р. Леверидж и др. // Нефтегазовое обозрение. Schlumberger. – 2008. – Т. 19, – № 2. – С. 74-97.

91. Тюркишер, Р.И. Электрокаротаж в анизотропной среде / Р.И. Тюркишер // Известия АН СССР. Серия географическая и геофизическая. – 1945. – Т. IX, № 3. – С. 279-287.

92. 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.

93. Численное моделирование и анализ сигналов электромагнитного каротажа в процессе бурения / М.И. Эпов, М.Н. Никитенко, В.Н. Глинских, К.В. Сухорукова // НТВ «Каротажник». – 2014. – № 11. – С. 29-42.

94. Численное моделирование и инверсия данных электромагнитного каротажа в процессе бурения и шаблонирования нефтегазовых скважин / М.И. Эпов, В.Н. Глинских, К.В. Сухорукова, М.Н. Никитенко, В.Н. Еремин // Геология и геофизика. – 2015. – № 8. – С. 1520-1529.

95. Шайдуров, В.В. Многосеточные методы конечных элементов / В.В. Шайдуров // Москва: Наука. – 1989. – 288 с.

96. Шурина, Э.П. Моделирование электрического и магнитного квазистационарных полей с помощью смешанного векторного метода конечных элементов / Э.П. Шурина, О.В. Нечаева, О.В. Нечаев // Автометрия. – 2007. – Т. 43. – № 2. – С. 97-104.

97. Эйдман, И.Е. Способ индукционного каротажа скважин / Эйдман И.Е. // Авторское свидетельство 272448 СССР, МКИ G01V 3/04/G01V 3/18. – 1970.

98. Электрофизические свойства баженовской свиты на основе численной инверсии данных скважинной электрметрии [Электронный ресурс] / М.И. Эпов, К.В. Сухорукова, В.Н. Глинских, А.М. Петров, А.А. Федосеев // Геомодель-2019: 21-я конференция по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа. 9-13 сентября 2019 г., Геленджик. – Режим доступа: <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=99310>. – 4 с.

99. Эпов, М.И. Диэлектрическая температурная модель влажных нефтесодержащих пород в диапазоне частот от 0.5 до 15 ГГц / М.И. Эпов, И.В. Савин, В.Л. Миронов // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53. – № 7. – С. 912-919.

100. Эпов, М.И. Прямое трехмерное моделирование векторного поля для задач электромагнитного каротажа / М.И. Эпов, Э.П. Шурина, О.В. Нечаев // Геология и геофизика. 2007. – Т. 48. – № 9. – С. 989-995.

101. A New Multi Laterolog Tool with Adaptive Borehole Correction / Z. Zhou, B. Corley, R. Khokhar, H. Maurer, M. Rabinovich // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, USA, 21–24 September, 2008. – 2008. SPE 114704. – 18p.

102. Arps, J.J. Inductive resistivity guard logging apparatus including toroidal coils mounted on a conductive stem : US Patent No. 3,305,771 / J.J. Arps // Date of Patent: February 21, 1967. – 5 p.

103. Barber, T.D. Method and system for indicating anisotropic resistivity in an earth formation : United States Patent US 7,027,967 B1. / T.D Barber // Date of Patent: Apr. 11, 2006. – 28 p.

104. Better Saturation From New Array Laterolog / E. Legendre, I. Dubourg, J. Doduy, J.W. Smits, O. Faivre, R. Griffiths // SPWLA 40th Annual Logging Symposium, Oslo, Norway, May 30 – June 3, 1999. – 1999. – 14p.

105. Bittar, M.S. Electromagnetic wave resistivity tool having a tilted antenna for determining properties of earth formations. Patent US 7948238 B2 / M.S. Bittar // Date of Patent: May 24, 2011. – 20 p.

106. Comparison of the Russian and Western Resistivity Logs in Typical Western Siberian Reservoir Environments: A Numerical Study / М.И. Эпов, К.В. Sukhorukova, О.В.

Nechaev, A.M. Petrov, M. Rabinovich, H. Weston, E. Tyurin, G. L. Wang, A. Abubakar, Claverie M. // *Petrophysics*. – 2020. – № 1(61). – P. 38-71.

107. Davydycheva, S. A fast modeling method to solve Maxwell's equations in 1D layered biaxial anisotropic medium / S. Davydycheva, T. Wang // *Geophysics*. – 2011. – Vol. 76. – № 5, – P. 293-304.

108. Davydycheva, S. An efficient finite-difference scheme for electromagnetic logging in 3D anisotropic inhomogeneous media / S. Davydycheva, V. Druskin, T. Habashy // *Geophysics*. – 2003. – № 68. – P. 1525-1536. 10.1190/1.1620626.

109. Davydycheva, S. Review of 3D EM Modeling and Interpretation Methods for Triaxial Induction and Propagation Resistivity Well Logging Tools / S. Davydycheva, M.A. Frenkel // *PIERS Proceedings, Cambridge, USA, July 5–8, 2010*. – 2010. – P. 390-396.

110. Determining formation resistivity anisotropy in the presence of invasion / T. Barber, B. Anderson, A. Abubakar, T. Broussard, K.C. Chen, S. Davydycheva, V. Druskin, T. Habashy, D. Homan, G. Minerbo, R. Rosthal, R. Schlein, H. Wang // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, USA, September 26-29, 2004*. – 2004.

111. Dielectric-independent 2 MHz Propagation Resistivity / P.T. Wu, J.R. Lovell, B. Clark, S.D. Bonner, J.R. Tabanou // *Transactions of SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, USA, October 1999*. – 1999. SPE 56448. – 19 p.

112. Effective Electromagnetic Log Data Interpretation in Realistic Reservoir Models / M. Epov, V. Glinskikh, C. Suhorukova, M. Nikitenko, O. Nechaev, I. Surodina // *Open Journal of Geology*. – 2013. – Vol. 3. – № 2B. – P. 81-86.

113. Evance, H. Evaluating the Difference Between Wireline and MWD Systems / H. Evance // *World Oil*. – 1991. – V. 212. – P. 51-62.

114. Frenkel, M.A. Real-time Estimation of Resistivity Anisotropy Using Array Lateral and Induction Logs [Electronic resource] / M.A. Frenkel, I.M. Geldmacher // *Offshore Technology Conference, Houston, USA, May 5–8, 2003*. – 2003. – CD-ROM. – Pap. OTC-15125-MS. – 6 p.

115. Garrouh, A.A. A Comprehensive Study of the Relative Dielectric Permittivity in Porous Media [Electronic resource] / A.A. Garrouh // *SPE Western Regional Meeting, Bakersfield, California, March 26– 30, 2001*. – 2001. – CD-ROM. – Pap. SPE 68779. – 10 p.

116. Garrouh, A. A. A Systematic Study Revealing Resistivity Dispersion in Porous Media / A.A. Garrouh // *The Log Analyst*. – 1999. – Vol. 40. № 4. – P. 271-279.

117. Geometrical model for the high-frequency dielectric properties of brine-saturated sandstones / T. Tefhan, L.M. Schwartz, P.M. Sen, P. Wong // *Journal of Applied Physics*. – 1988. – Vol. 64, № 5. – P. 2575-2582.

118. Georgi, D. T. Biaxial Anisotropy: Its Occurrence and Measurement With Multicomponent Induction Tools / D. T. Georgi, J. H. Schoen, M. Rabinovich // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Denver, USA, September 21–24, 2008. – 2008, 18p. 10.2118/114739-MS.

119. Gianzero, S. Method and apparatus using one or more toroids to measure electrical anisotropy : US Patent No. 7,227,363 / S. Gianzero, M. Bittar // *Date of Patent: June 5, 2007*. – 20 p.

120. Glinskikh, V. High-Performance Simulation of Electrical Logging Data in Petroleum Reservoirs Using Graphics Processors / V. Glinskikh, A. Dudaev, O. Nechaev // *Communications in Computer and Information Science*. – 2017. – Vol. 753. – p 186-200.

121. Goodfellow, I. Deep learning / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville // *Cambridge: MIT press*. – 2016. – Vol. 1. – 774 p.

122. Hagiwara, T. Macroscopic Anisotropy at Multiple Scales / T. Hagiwara // *SPWLA 54th Annual Logging Symposium*, New Orleans, USA, June 22–26, 2013. – 2013. – 15 p.

123. Haugland, S.M. New Discovery with Important Implications for LWD Propagation Resistivity Processing and Interpretation [Electronic resource] / S.M. Haugland // *SPWLA 42 Annual Logging Symposium*, Houston, USA, June 17–20, 2001. – 2001. – CD-ROM. – Pap. LL. – 14 p.

124. Identifying potential gas-producing shales from large dielectric permittivities measured by induction quadrature signals [Electronic resource] / B. Anderson, T. Barber, M. Lüling, P. Sen, R. Taherian, J. Klein // *SPWLA 49th Annual Logging Symposium*, Austin, USA, May 25–28, 2008. – 2008. – CD-ROM. – Pap. HHHH. – 10 p.

125. Improving the Flexibility and Robustness of Model-Based Derivative-Free Optimization Solvers [Electronic resource] / C. Cartis, J. Fiala, B. Marteau, L.C. Roberts // *arXiv:1804.00154 [math.OC]*. – 2018.

126. Jackson, C. Improving Formation Evaluation by Resolving Differences between LWD and Wireline Log Data / C. Jackson, D. Heysse // *Transaction of 69th Annual Technical Conference and Exhibition*, New Orleans, USA. – 1994. SPE 28428. – 17p.

127. Karinski, A. Feasibility of vertical resistivity determination by the LWD sonde with toroidal antennas for oil-base drilling fluid [Electronic resource] / A. Karinski, A. Mousatov // SPWLA 43rd Annual Logging Symposium, Oiso, Japan, June 2–5, 2002. – 2002. – CD-ROM. – Pap. Q, – 13 p.

128. Karinski, A. Vertical resistivity estimation with toroidal antennas in transversely isotropic media [Electronic resource] / A. Karinski, A. Mousatov // SPWLA 42nd Annual Logging Symposium, Houston, Texas, June 17–20, 2001. – 2001. – CD-ROM. – Pap. BB. – 14 p.

129. Kingma, D. A method for stochastic optimization [Electronic resource] / D.P. Kingma, Ba J. Adam // arXiv preprint arXiv. – 2014. – 15p. <https://arxiv.org/abs/1412.6980>.

130. Koksharov, V.Z. Velocity Properties Analysis of Stratigraphic Sequences of Surgutsky and Tobolsky Hydrocarbon-Bearing Regions / V.Z. Koksharov, N.A. Volkova, A.N. Per-vukhin // 2nd EAGE St Petersburg International Conference and Exhibition on Geosciences «Saint Petersburg 2006». Saint Petersburg, Russia, October 16–19, 2006. – 2006. – P251. – 6 p.

131. Krizhevsky, A. Imagenet classification with deep convolutional neural networks / A. Krizhevsky, I. Sutskever, G. E. Hinton // Advances in neural information processing systems. – 2012. – № 25. – P. 1097-1105.

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

133. Lima, O.A.L. A generalized Maxwell-Wagner theory for membrane polarization in shaly sands / O.A.L. Lima, M.M. Sharma // Geophysics. – 1992. – Vol. 57. – No. 3. – P. 431-440.

134. Maiti, S. Automatic detection of lithologic boundaries using the Walsh transform: A case study from the KTB borehole / S. Maiti, R.K. Tiwari // Computers & Geosciences. № 31(8). – 2005. – P. 949-955.

135. Misra, S. Strange Sample-Thickness Dependence of Multi-frequency Complex Dielectric Permittivity of Shales and Sandstones / S. Misra, P. Tathed // AAPG Eastern Section Meeting, University of Oklahoma, Lexington, USA, September 26, 2016. – 2016.

136. Modeling of Maxwell-Wagner induced polarisation amplitude for clayey minerals / A. Tabbagh, P. Cosenza, A. Ghrohani, R. Guérin, N. Florsch // Journal of Applied Geophysics. – 2009. – № 67, – P. 109–113.

137. Moran, H. Electrical Anisotropy: Its Effect on Well Logs // in: Developments in geophysical exploration methods – 3 (The Developments series) / H. Moran, S. Gianzero / Edited by A. A. Fitch – Applied Science Publishers, London and New York. – 1982. – P. 195-238.

138. New directional electromagnetic tool for proactive geosteering and accurate formation evaluation while drilling [Electronic resource] / Q. Li, D. Omeragic, L. Chou, L. Yang et al. // SPWLA 46th Annual Logging Symposium, New Orleans, USA, June 26–29. – 2005. – CD-ROM. – Pap. UU. – 16 p.

139. New Tool and Programming and Methodological Software of Geophysical Propagation in Well [Electronic resource] / I.N. Eltsov, M.I. Epov K.N. Kayurov, A.N. Petrov, C.V. Sukhorukova, A.Y. Sobolev, A.A. Vlasov // EAGE – Saint Petersburg 2010. 4th Saint Petersburg International Conference and Exhibition, Saint Petersburg, Russia, 5–8 April 2010. –2010. – CD-ROM. – P. B06.

140. Nikitenko, M. Fast electromagnetic modeling in cylindrically layered media excited by eccentric magnetic dipole / M. Nikitenko, G. Itskovich, A. Seryakov // Radio Sci. – 2016. – V. 51 (6). – P. 573–588.

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

142. Simultaneous determination of formation angles and anisotropic resistivity using multi-component induction logging data : United States Patent US 6,643,589 B2 / Zh. Zhang, L. Yu, L.A. Tabarovsky, B. Kriegshauer // Date of Patent: Nov. 4, 2003. – 10 p.

143. Transforming seismic data into lateral sonic properties using artificial neural network: a case study of real data set / A. Haris, B.S. Murdianto, R. Sutattoyo, A. Riyanto // International Journal of Technology. – 2018. – Vol. 9, № 3, – P. 472-478.

144. Triaxial Induction Logging: Theory, Modeling, Inversion, and Interpretation / H. Wang, T. Barber, K. Chen, S. Davydycheva, M. Frey, D. Homan, G. Minerbo, C. Morriss, R. Rosthal, J. Smits, G. Tumbiolo // SPE International Oil & Gas Conference and Exhibition, Beijing, China, December 5–7, 2006. – 2006. – 19 p. SPE 103897.

145. Using array induction and array laterolog data to characterize resistivity anisotropy in vertical wells / O. Faivre, T. Barber, L. Jammes, D. Vuhoang // SPWLA 43th Annual Logging Symposium, Oiso, Japan, June 2-5, 2002. – 2002. – SPWLA-2002-M. – 12 p.

146. Wang, G.L. Triaxial induction tool response in dipping and triaxially anisotropic formations / G.L. Wang, A. Abubakar, D. Allen, // SEG International Exposition and Annual Meeting, Anaheim, USA, 14–19 October, 2018. – 2018. – 5p. 10.1190/segam2018-2997859.1.

147. Well logging apparatus having toroidal induction antenna for measuring, while drilling, resistivity of earth formations : US Patent No. 5,235,285 / B. Clark, D. Bonner, J. Jundt, M. Luling. – August 10, 1993. – 1993 – 22 p.

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

149. Zhang, G. Deep learning for seismic lithology prediction / G. Zhang, Z. Wang, Y. Chen // Geophysical Journal International. – 2018. – № 215 (2). – P. 1368-1387.

150. Zhang, Z. Investigation of Effects of Large Dielectric Constants on Triaxial Induction Logs / Z. Zhang, B. Yu, C. Liu, // Applied Mathematics. – 2012. – № 03. 2018. – P. 1811-1817. 10.4236/am.2012.331246.