

На правах рукописи



СУХОРУКОВА Карина Владимировна

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ТЕРРИГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ
НА ОСНОВЕ СОВМЕСТНОЙ ЧИСЛЕННОЙ ИНВЕРСИИ
ДАННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА
В ВЕРТИКАЛЬНЫХ И НАКЛОННЫХ СКВАЖИНАХ**

25.00.10 – геофизика, геофизические методы
поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Новосибирск – 2018

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

Официальные оппоненты:

Каринский Александр Дмитриевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры геофизики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе";

Дашевский Юлий Александрович, доктор физико-математических наук, директор Новосибирского технологического центра компании "Бейкер-Хьюз";

Тригубович Георгий Михайлович, доктор технических наук, профессор, директор ЗАО "Аэрогеофизическая разведка".

Ведущая организация:

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

Защита состоится 18 апреля 2018 г. в 10 час. на заседании диссертационного совета Д 003.068.03 на базе ИНГГ СО РАН, в конференц-зале.

Отзыв в двух экземплярах, оформленный в соответствии с требованиями Минобрнауки России, просим направлять по адресу:

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

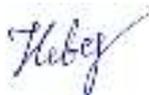
факс (8-383) 330-28-07, e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru.

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

<http://www.ipgg.sbras.ru/ru/education/commettee/Sukhorukova2017>.

Автореферат разослан 15 февраля 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.г.-м.н., доцент
8(383)3331639



Неведрова
Нина Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования – сигналы высокочастотного электромагнитного каротажного зондирования (ВЭМКЗ) и бокового каротажного зондирования (БКЗ) при изучении нефтенасыщенных терригенных коллекторов и их покрышек, с учётом анизотропии электропроводности и повышенной диэлектрической проницаемости.

Актуальность

При изучении всё чаще встречающихся на практике сложнопостроенных нефтяных коллекторов снижается достоверность заключений об их нефтесодержании по данным скважинной электрометрии. Одна из причин этого – несоответствие методик интерпретации сложности реальных разрезов. Преобладает упрощенный подход, основанный на трансформации сигналов в рамках однородной модели. Для определения электрофизических параметров пластов в недостаточной мере применяется численная инверсия данных на базе реалистичных геоэлектрических моделей. Практически не освоено новое окно возможностей, технологически связанное с синхронным применением разнотипных зондов электрокаротажа. В этих условиях может быть построена согласованная по постоянному и переменному токам информационно достоверная геоэлектрическая модель пространственного распределения не только удельного электрического сопротивления, но и диэлектрической проницаемости.

Таким образом, в настоящее время необходимы как разработка новых способов совместной инверсии всего набора одновременно измеренных сигналов электрокаротажа с построением согласованной геоэлектрической модели, так и создание основы для визуального анализа практических данных ВЭМКЗ и БКЗ с учётом траектории скважины и параметров бурения.

Цель исследования – повысить достоверность и информативность количественной интерпретации сигналов БКЗ и ВЭМКЗ в нефтяных скважинах на основе построения согласованной геоэлектрической модели с применением:

- двумерной инверсии сигналов БКЗ в вертикальных скважинах с учётом электрической анизотропии;
- совместной инверсии сигналов БКЗ и ВЭМКЗ в вертикальных скважинах с определением удельного электрического сопротивления (УЭС) и диэлектрической проницаемости (ДП);
- инверсии сигналов ВЭМКЗ в субгоризонтальных скважинах, совместной инверсии сигналов БКЗ и ВЭМКЗ с учётом электрической анизотропии.

Научные задачи – разработать и обосновать комплекс методических приёмов количественной интерпретации сигналов БКЗ и ВЭМКЗ с учётом

условий в скважине, её наклона и конструктивных особенностей аппаратуры для определения электрофизических свойств терригенных отложений:

– анизотропии УЭС по сигналам БКЗ в вертикальных скважинах при несоответствии зон проникновения, полученных в изотропных моделях по данным БКЗ и ВЭМКЗ;

– диэлектрической проницаемости и её частотной дисперсии по сигналам ВЭМКЗ в вертикальных скважинах с предварительным построением резистивной модели по данным БКЗ;

– УЭС отложений в результате инверсии сигналов ВЭМКЗ в субгоризонтальных скважинах, а также их электрической анизотропии по данным ВЭМКЗ и БКЗ.

Фактический материал, методы и программно-алгоритмические средства

Основной метод исследования – анализ результатов численного моделирования сигналов БКЗ и ВЭМКЗ в сравнении с практическими данными из нефтяных скважин на месторождениях Западной Сибири.

Численное моделирование и инверсия выполнялись с использованием верифицированных программ, разработанных сотрудниками Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (Л.А. Табаровский, В.П. Соколов, М.И. Эпов, М.Н. Никитенко, А.Б. Черяука, С.В. Мартаков, И.Н. Ельцов, Э.П. Шурина, И.В. Суродина, О.В. Нечаев, В.Н. Глинских и др.) на основе полученных ими теоретических результатов. Программы тестировались на представительном расчетном и практическом материале.

Значения параметров, описывающих условия измерения (УЭС бурового раствора, диаметр и траектория скважины, характерный размер неровности её стенки, диаметр и эксцентриситет прибора), являются типичными для вертикальных, наклонных и субгоризонтальных скважин. Значения параметров геоэлектрической модели терригенных отложений установлены по данным комплекса исследований в скважинах Западной Сибири.

Выводы базируются на результатах сравнительного анализа синтетических сигналов и практических данных, предоставленных компаниями "Сургутнефтегаз", "Нижневартовскнефтегеофизика", "Ноябрьскнефтегеофизика" и НПП ГА "Луч". Они включают данные ВИКИЗ и ВЭМКЗ, БКЗ, БК, кавернометрии, ГК, НК, ПС и др. Практические данные БКЗ и ВЭМКЗ измерены калиброванной и сертифицированной каротажной аппаратурой К1А-723М (Научно-производственное объединение "ГЕОПРОМ", г. Уфа); ВИКИЗ, "Алмаз", СКЛ и ВИК-ПБ (Научно-производственное предприятие геофизической аппаратуры "Луч", г. Новосибирск). Высокочастотное индукционное каротажное изопараметрическое зондирование (ВИКИЗ) в 1997 г. включено Государственной комиссией по запасам Министерства

природных ресурсов РФ в основной комплекс ГИС при изучении терригенных разрезов Западной Сибири.

Защищаемые научные результаты

1. Методические приёмы количественной интерпретации сигналов БКЗ в вертикальных скважинах с определением УЭС терригенных отложений и его анизотропии на основе двумерной инверсии. Анизотропные глинистые пласты выявляются по фиктивной прискважинной зоне повышенного (БКЗ) и пониженного (ВЭМКЗ) УЭС.

2. Методические приёмы количественной интерпретации сигналов ВЭМКЗ в вертикальных скважинах с определением ДП терригенных отложений на основе инверсии с предварительным построением резистивной модели по данным БКЗ. Получены оценки ДП пород глинистых покровов и баженовской свиты, зависящие от частоты в диапазоне 0.875–14.0 МГц.

3. Методические приёмы количественной интерпретации низкочастотных сигналов ВЭМКЗ в субгоризонтальных скважинах с определением УЭС терригенных отложений на основе инверсии в горизонтально-слоистой модели и электрической анизотропии при изменяющемся зенитном угле или по комплексу данных БКЗ и ВЭМКЗ.

Научная новизна и личный вклад

Разработаны, теоретически и экспериментально обоснованы методические приёмы совместной интерпретации одновременно измеренных в скважинах сигналов БКЗ и ВЭМКЗ, в том числе для количественного определения электрической анизотропии и диэлектрической проницаемости.

1. Определение анизотропии УЭС в вертикальных скважинах по сигналам БКЗ (с учётом ВЭМКЗ) базируется на следующих принципах:

- чувствительности сигналов БКЗ достаточно для определения горизонтального и вертикального УЭС;
- идентификация анизотропных интервалов проводится по фиктивной прискважинной зоне в рамках изотропной модели;
- в стартовой геоэлектрической модели значение вертикального УЭС оценивается по соотношению значений УЭС пласта и фиктивной прискважинной зоны в изотропной модели.

2. При оценке ДП и её частотной дисперсии по сигналам ВЭМКЗ и БКЗ в вертикальных скважинах установлено, что:

- определение ДП следует проводить путём инверсии пластовых значений сигналов;
- интервалы с проявлением электрической поляризации определяются по превышению значений УЭС по данным БКЗ над значениями УЭС по данным ВЭМКЗ;
- при совместной инверсии сигналов БКЗ и ВЭМКЗ резистивная модель строится по данным БКЗ, ДП определяется по данным ВЭМКЗ.

3. При построении геоэлектрической модели осадочных отложений

по сигналам ВЭМКЗ в субгоризонтальных скважинах:

- для инверсии низкочастотных сигналов применяется расчет сигнала наклонного зонда в горизонтально-слоистой модели;

- с использованием инверсии разности фаз и отношения амплитуд определяются толщины и УЭС пластов, соответствующие вертикальному распределению нефтенасыщения в коллекторе;

- электрическая анизотропия пласта оценивается: при инверсии данных ВЭМКЗ в интервале с изменяющимся зенитным углом; по УЭС изотропных моделей, построенных по данным БКЗ и ВЭМКЗ;

- субвертикальные неоднородности выделяются по данным БКЗ.

Теоретическая и практическая значимость

Построение согласованной геоэлектрической модели увеличивает достоверность и сужает диапазон неоднозначности УЭС пластов-коллекторов с уточнением подсчётных параметров (пористости, флюидонасыщения и эффективных толщин).

Введением модели с расширенным набором электрических параметров (с анизотропией УЭС и диэлектрической проницаемостью) устраняется кажущееся противоречие между сигналами ВЭМКЗ и БКЗ.

Для пластов с толщиной, меньшей длины зондов, удается определить УЭС и его анизотропию, а также диэлектрическую проницаемость и её частотную дисперсию, что существенно увеличивает информативность комплекса электрических и электромагнитных методов ГИС.

По результатам инверсии измеренных аппаратурой СКЛ сигналов БКЗ определена анизотропия УЭС, а по сигналам ВЭМКЗ получены оценки ДП и определена её зависимость от частоты в диапазоне 875 кГц – 14 МГц на интервалах глинистых покрышек и баженовской свиты, что расширяет комплекс известных электрофизических свойств этих отложений.

Оценка горизонтального и вертикального УЭС позволяет определить эффективную толщину коллектора, а также УЭС проницаемых прослоев, что повышает достоверность заключения о типе флюидонасыщения. Выявление участков субгоризонтальных скважин, вскрывших отложения с сильной электрической анизотропией, позволяет локализовать интервалы, потенциально опасные для проведения гидроразрыва.

По результатам анализа сигналов ВЭМКЗ в субгоризонтальных скважинах, пересекающих кровлю коллектора или приближающихся к его границам, выявлены их особенности, которые при традиционной интерпретации могут привести к ошибочному заключению о повышенном нефтесодержании в исследуемых интервалах.

Полученные научные результаты используются в ИНГГ СО РАН и в НПП ГА «Луч» для интерпретации данных исследования в вертикальных, наклонных и субгоризонтальных скважинах и в курсе лекций для студен-

тов ГГФ НГУ и специалистов-интерпретаторов треста "Сургутнефтегеофизика", входят в отчёты по договорам с производственными организациями (Сургутнефтегаз, Нижневартовскнефтегеофизика, Ноябрьскнефтегеофизика и НПП ГА "Луч").

Степень достоверности результатов

Высокая степень достоверности численных результатов определяется использованием надежных программно-алгоритмических средств решения прямых задач электрического и электромагнитного каротажа, которые прошли тщательную верификацию, многократное тестирование на внутреннюю сходимость, многократное сравнение с данными, измеренными в физических моделях сред и в нефтяных вертикальных и субгоризонтальных скважинах. Приемы коррекции влияния бурового раствора, эксцентриситета прибора, неровности стенки и ствола скважины прошли проверку на практических данных. Коэффициенты анизотропии УЭС глинистых отложений, полученные с применением предложенных способов в вертикальных и горизонтальных скважинах, близки между собой. Зависимость ДП от частоты в диапазоне от 875 кГц до 14 МГц аналогична полученным независимо при лабораторных исследованиях керна и водосодержащих смесей твердых компонентов горных пород. Результаты опубликованы, а также неоднократно обсуждались и получили одобрение специалистов на научно-практических конференциях.

Надежность тестирования на практических материалах обеспечивается представительностью используемых в работе данных комплекса геофизических исследований в открытом стволе вертикальных, сильнонаклонных и субгоризонтальных скважин, высокой точностью лабораторного тестирования отдельных электронных узлов аппаратуры ВЭМКЗ и последующей ее калибровки в тестовых физических моделях электропроводящей среды, а также многолетнего опыта использования разных модификаций аппаратуры при исследовании разрезов Западной Сибири и обширной базы накопленных данных.

Апробация работы и публикации

Выносимые на защиту результаты изложены в 26 рецензируемых журнальных публикациях, в том числе в 19 статьях, опубликованных в 6 рецензируемых научных журналах, рекомендованных перечнем ВАК.

Результаты работы успешно докладывались на международных, российских и региональных конференциях и семинарах (около 50), в том числе в Токио (Япония, 2001), Пекине (Китай, 2008, 2013), Уфе (2010), Иркутске (2012), Киеве (Украина, 2009, 2012), Варшаве (Польша, 2014), Мадриде (Испания, 2015), Вене (Австрия, 2016), Москве (2012, 2015, 2017), Санкт-Петербурге (2010, 2012, 2014), Новосибирске (1999, 2007–2009, 2011–2017), Перми (2007), Тюмени (2009, 2012, 2013, 2015, 2016); Ханты-

Мансийске (2011, 2012), Геленджике (2016), а также на научно-практических совещаниях в ведущих производственных организациях (Сургутнефтегаз, Сургутнефтегеофизика, Нижневартовскнефтегеофизика, Когалымнефтегеофизика) и входили в отчеты по договорным работам.

Благодарности

Проведению исследований способствовало доброжелательное отношение со стороны всех сотрудников лабораторий электромагнитных полей и скважинной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Автор благодарен всем коллегам за всестороннюю помощь и внимание к разрабатываемой тематике. Представленные результаты не были бы получены без теоретических и методических достижений Ю.Н. Антонова, Л.А. Табаровского, М.И. Эпова, В.П. Соколова, Ю.А. Дашевского, В.С. Могилатова, В.Н. Глинских; разработанного М.Н. Никитенко, О.В. Нечаевым и И.В. Суудиной уникального и надежного программного обеспечения численного моделирования; высоконадежных данных каротажа новейшими приборами, разработанными в ННП ГА "Луч" под руководством К.Н. Каюрова, В.Н. Еремина и А.Н. Петрова; системы инверсии данных электрокаротажа, поддерживаемой коллективом под руководством И.Н. Ельцова, А.Ю. Соболева и А.А. Власова; высокого уровня подготовки студентов-геофизиков ГГФ НГУ А.М. Петрова, Е.В. Копытова, Д.А. Литвиченко и аспирантов А.А. Горбатенко и В.С. Аржанцева, участвовавших в решении научных задач; содержательных обсуждений физических аспектов работы с А.К. Манштейном, Е.Ю. Антоновым и Г.В. Нестеровой; а также без консультаций по оформлению диссертации и документов Н.Н. Неведровой и В.И. Самойловой.

Представленное исследование оформилось как тематически связанная научная работа благодаря профессиональной и дружеской поддержке д.т.н., профессора, академика РАН М.И. Эпова, замечания и советы которого трудно переоценить.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, содержит 357 страниц текста, в том числе 166 рисунков и библиографию из 357 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Особенности количественной интерпретации сигналов электрокаротажа осадочных отложений Западной Сибири. Методы, аппаратура и физические условия измерения

Приведены основные сведения о геоэлектрических параметрах базовых моделей осадочных горных пород и скважин, о типах зондов, измеряемых сигналах и рассчитываемых трансформациях, конструктивных параметрах аппаратуры, об используемых в исследовании программах численного моделирования и инверсии. Результативной частью является исследование влияния на сигналы ВЭМКЗ неровностей стенки скважины и сдвига прибора с оси скважины на стенку.

Известно, что одновременное измерение сигналов электрокаротажа разными типами зондов повышает точность геоэлектрической модели при совместной инверсии данных. Например, по комплексу данных БКЗ и ВЭМКЗ существенно уточняется строение прискважинной зоны, которое зависит от пористости, проницаемости и нефтенасыщенности коллектора, а также от механических свойств глубоко залегающих пород (М.И. Эпов, А.А. Кашеваров, И.Н. Ельцов, Л.А. Назаров, Л.А. Назарова, Г.В. Нестерова). Одновременность измерения обеспечивается современными комплексами каротажной аппаратуры, в числе которых – комплекс СКЛ (разработан и производится Научно-производственным предприятием геофизической аппаратуры "Луч" (НПП ГА "Луч", г. Новосибирск).

По измеряемым зондами ВЭМКЗ комплекса СКЛ разности фаз $\Delta\varphi$ и отношению амплитуд A_2/A_1 строится трансформация в кажущуюся диэлектрическую проницаемость (ДП) [Эпов, ..., Сухорукова и др., 2010]. ДП в общем случае зависит от состава породы, микроструктуры порового пространства и насыщения пласта. Возможность оценки ДП в измененной зоне и пласте небольшой толщины обеспечивается разной пространственной чувствительностью $\Delta\varphi$ и A_2/A_1 , что показано в работах В.Н. Глинских, М.И. Эпова, М.Н. Никитенко и др.

При количественной интерпретации, как правило, предполагается, что зонд соосен скважине, которая представляет собой цилиндр с ровными стенками, заполненный буровым раствором. При средних значениях УЭС раствора в скважине и окружающих пород (1–2 и 4–30 Ом·м) и типичных диаметрах скважин для большинства методов с практической точностью такое предположение выполняется, например, для нормальных зондов и градиент-зондов постоянного тока (S. Gianzero, R. Rau, E.B. Чаадаев). При высоком контрасте УЭС вытеснение части раствора корпусом прибора учитывается при измерениях в гранитах с высоким УЭС (H. Thunhed, O. Olsson). Но влияние неровности стенки скважины и смещения зонда с её оси становится значительным при использовании фокусирующих схем,

при повышении частоты электромагнитного поля, и тем больше, чем больше разница между диаметрами прибора и скважины и выше контраст УЭС бурового раствора и пласта. В таких случаях эксцентриситет обычно учитывается при моделировании сигналов, а алгоритмы коррекции влияния смещения в скважине с раствором встраиваются в системы обработки сигналов. В некоторых случаях эффект эксцентриситета снижают добавлением в прибор проводящих элементов корпуса или внутреннего проводника, замкнутого на буровой раствор специальной системой электродов, что позволяет избавиться от токов, возникающих в скважине в результате асимметрии положения зонда в скважине (S. Gianzero, R. Rau, G. Minerbo, J. Miles, T. Barber, X. Sun, J. Hou, R. Rosthal, M. Rabinovich, A. Bespalov, S. Forgang, Q. Li, M. Bittar, D. Omeragic и др.).

В способах численной коррекции влияние эксцентриситета рассчитывается в модели "скважина – пласт" при максимальном смещении зонда, и на основе этих расчётов проводится коррекция измеренных сигналов. Для вычислений применяются как аналитические подходы (S. Gianzero, R. Rau, X. Sun и др.), так и методы конечных элементов и конечных разностей (B. Anderson, T. Barber; Q. Liu, F. Teixeira, I. San Martin, M. Bittar и др.).

А.А. Кауфман, А.М. Каганский и В.С. Кривоуцкий в первых работах по исследованию сигналов ВИКИЗ показывают, что смещение зонда с оси скважины практически не влияет, если УЭС пласта отличается от УЭС бурового раствора не более чем в 10 раз. Позже уточняется, что для прибора ВИКИЗ с радиусом корпуса 0.0365 м, размещенного в скважине радиусом 0.108 м, влияние эксцентриситета тем больше, чем выше контраст УЭС и меньше длина зонда, а при низком УЭС бурового раствора меняется тип кривой зондирования – с монотонно падающей при осевом положении до восходящей при максимальном эксцентриситете.

В результате расчётов для сетки значений радиусов скважины и прибора ВЭМКЗ получено, что смещение зонда с оси скважины влияет на сигналы тем больше, чем больше радиус скважины, сильнее контраст УЭС раствора и пласта и выше рабочая частота зонда [Игнатов, Сухорукова, 2009; Erov, Suhorukova et al., 2012]. Например, по результатам расчетов $\Delta\varphi$ и A_2/A_1 смещение зондов аппаратуры СКЛ радиусом 0.051 м в скважине радиусом 0.062 м существенно для высокочастотных зондов DF05, DF07, DF10 (длины 0.5, 0.7, 1.0 м, частоты 14, 7, 3.5 МГц) и практически незначимо для низкочастотных DF14, DF20 (длины 1.4, 2.0 м, частоты 1.75, 0.875 МГц) (рисунок 1). Коррекция влияния смещения прибора с оси на стенку скважины приводит к облегчению визуального анализа диаграмм кажущегося сопротивления ρ_k и к меньшему расхождению в непроницаемых породах, но в песчаных отложениях сохраняет расхождение, отражающее наличие изменений в прискважинной зоне.

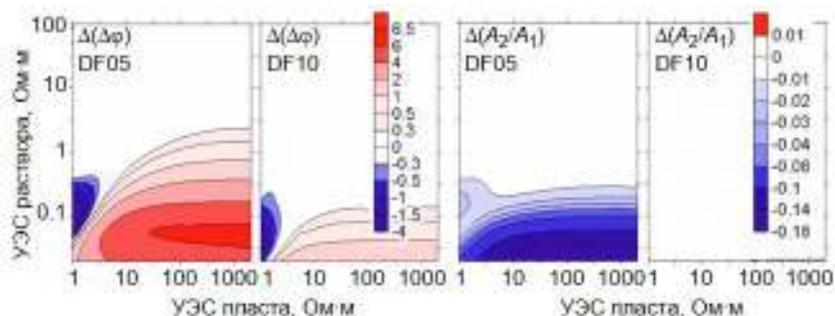


Рисунок 1 – Приращение разности фаз ($\Delta(\Delta\varphi)$) и отношения амплитуд ($\Delta(A_2/A_1)$) короткого и среднего зондов ВЭМКЗ для разных УЭС пласта и бурового раствора при смещении прибора с оси на стенку. Радиус скважины 0.062 м, прибора 0.051 м

Для метода БКЗ при УЭС раствора и пласта 0.1 и 100 Ом·м смещение прибора СКЛ на стенку скважины изменяет синтетические сигналы не более чем на 5% [Сухорукова и др., 2015].

При исследовании стенки скважины акустическим телевизором А.И. Губина, Г.З. Гиниятов, И.Н. Жуланов выделяют на ней основные виды неровностей: вертикальные, спиральные и гребенчатые желоба. Спиральную форму ствола с периодом по скважине около 1 м подтверждают Т. Barber, Z. Sijercic, Н. Darling, X. Xu данными азимутально направленных датчиков плотностного нейтронного каротажа и аномалиями синусоидальной формы с таким же периодом в сигналах прибора АГТ фирмы Шлюмберже. На диаграммах ВЭМКЗ отмечаются не связанные со сменой пород квазипериодические колебания с пространственным периодом 0.5–2.0 м вдоль ствола. Их причиной могут быть периодические расширения скважины (по мнению М.Г. Зыкиной и В.Г. Мамяшева), заполненные буровым раствором низкого УЭС, а также спиралевидная форма ствола.

В моделях с неровной стенкой скважины – с расширением, с синусоидальной и спиралевидной формой ствола – сигналы ВЭМКЗ рассчитаны программами И.В. Суroidиной (ИНГГ, ИВМиМГ СО РАН). Установлено, что для всех моделей эти периодически повторяющиеся неглубокие неровности стенки скважины приводят к появлению квазипериодических изменений сигналов ВЭМКЗ большой амплитуды, но их средний уровень соответствует сигналу в скважине цилиндрической формы (рисунок 2). Поэтому перед визуализацией или количественной интерпретацией из сигналов следует удалить квазипериодическую составляющую, например, усреднением в окне подходящей длины. Субъективным критерием степени усреднения служит достижение приемлемой для визуального анализа формы сигналов [Еров, Suhorukova et al., 2012; Горбатенко, Вологдин, Сухорукова, 2013].

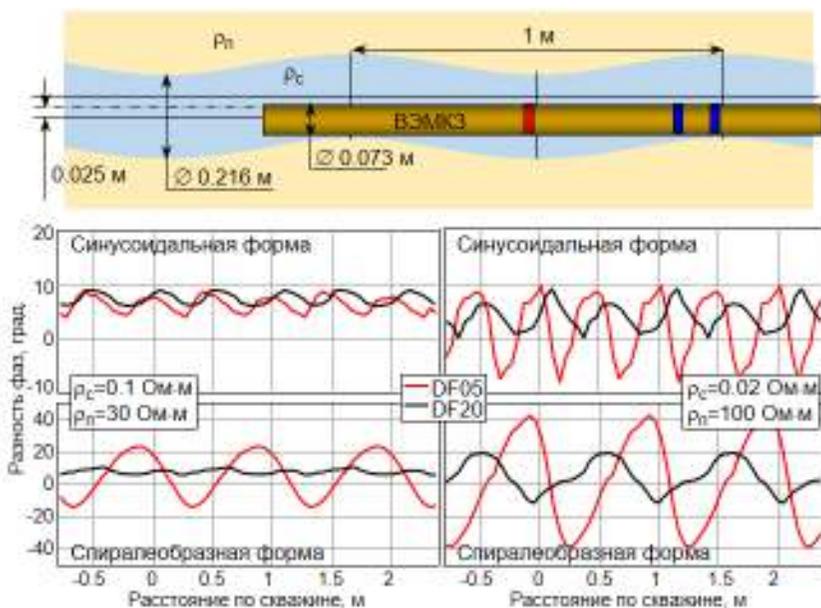


Рисунок 2 – Периодическое изменение разности фаз зондов DF05 и DF20, обусловленное синусоидальной и спиралеобразной формой ствола скважины

По результатам исследования в систему автоматизированной инверсии EMF Pro добавлена опция фильтрации значений $\Delta\varphi$ и A_2/A_1 в окне варьируемой длины и опция коррекции влияния эксцентриситета зонда (пересчета значений $\Delta\varphi$ на положение зонда на оси скважины).

Глава 2. Анизотропия УЭС терригенных отложений по данным бокового каротажного зондирования в вертикальных скважинах

В главе рассмотрены зависимости сигналов зондов БКЗ от электрической анизотропии в пластах осесимметричной модели, исследована возможность оценки горизонтального и вертикального УЭС с использованием численной инверсии и показаны примеры построения анизотропной модели глинистых отложений по измеренным прибором СКЛ сигналам.

При интерпретации данных БКЗ традиционно используется палочный подход, несмотря на то, что разработаны системы инверсии сигналов в осесимметричных моделях. При этом подходе используют снятые пластовые отсчеты и палочную интерпретацию для определения УЭС неизменной части изотропного пласта. Данные метода используются в основном в пластах большой толщины, количественная интерпретация в контрастных и тонкослоистых разрезах считается неприменимой. При этом

много работ посвящено численному исследованию сигналов градиент-зондов в сложных моделях: К. Kunz, Н. Moran, S. Gianzero (1958, 1982; анизотропная модель, профилирование границы), В.А. Фок, В.Р. Бурсиан, Р.И. Тюркишер (1933–1945, анизотропная модель, длинные зонды), Л.М. Альпин, С.Г. Комаров, В.Н. Дахнов (1950–1980, изотропная модель, палетки), Л.М. Альпин, В.Н. Дахнов, А.Е. Куликович, В.П. Журавлев (1953–1962, анизотропная модель, измерение сигналов на электроинтеграторе, интерпретация), А.И. Сидорчук, Е.В. Чаадаев (1971–1972, анизотропная модель, наклонные зонды), Л.А. Табаровский, Ю.А. Дашевский (1976–1979, 3D изотропная модель, наклонная скважина, решение интегрального уравнения), Л.Е. Кнеллер, А.П. Потапов (1989–2010, 2D изотропная модель, интерпретация на основе приближенных и конечно-разностного алгоритмов), А.Д. Каринский, Д.С. Даев (2006–2011, 2D анизотропная модель, конечно-разностный алгоритм), И.В. Суродина (2011–2015, 2D анизотропная модель, конечно-разностный алгоритм) и др.

В мировой практике при определении характерной для осадочных отложений электрической анизотропии используются данные фокусирующих зондов постоянного тока и низкочастотных индукционных зондов. В зондах ИК чувствительность к вертикальному сопротивлению обеспечивается использованием катушек с моментами, перпендикулярными или наклонными оси прибора (Z. Zhang, L. Yu, L. Tabarovsky, B. Kriegshauer, Q. Li, D. Omeragic, S. Davydycheva, M. Frenkel, M.S. Bittar). Для определения соотношения толщин проницаемых и непроницаемых прослоев используется комплекс трехкомпонентного индукционного каротажа и микрозондирований на постоянном токе. При оценке анизотропии применяется двухшаговый алгоритм: по данным комплекса зондов ИК строится изотропная модель (определяются положение границ, горизонтальное сопротивление и параметры зоны проникновения), далее варьируется вертикальное сопротивление с инверсией сигналов зондов постоянного тока (O. Faivre, T. Barber, W. Yang и др.).

В представленной работе для интерпретации данных БКЗ используется программа расчета и инверсии сигналов в осесимметричной модели О.В. Нечаева (2013–2017, конечно-элементный алгоритм). Каждый пласт модели характеризуется горизонтальным (ρ_h) и вертикальным (ρ_v) сопротивлениями, учитывается радиус корпуса прибора.

В типичных условиях вертикальной скважины приращение кажущегося сопротивления БКЗ с увеличением вертикального сопротивления зависит от контраста значений УЭС пласта и бурового раствора, длины зонда, соотношения радиусов скважины и прибора. Приращение сигнала в малоконтрастной модели превышает погрешность измерения для коротких зондов, а с увеличением контраста – для более длинных зондов [Эпов, Сухорукова, 2012].

При инверсии на глинистом интервале в изотропной модели зона проникновения по данным ВЭМКЗ определяется понижающей (рисунок 3), а по данным БКЗ – повышающей. Оптимальной при совместной инверсии оказывается узкая прискважинная зона повышенного УЭС, возникающая вследствие влияния вертикального сопротивления на сигналы градиент-зондов (справа). Такая же зона возникает и при инверсии синтетических сигналов, рассчитанных в анизотропной модели. Поэтому появление в подбираемой изотропной модели такой тонкой повышающей зоны можно использовать как признак электрической анизотропии.

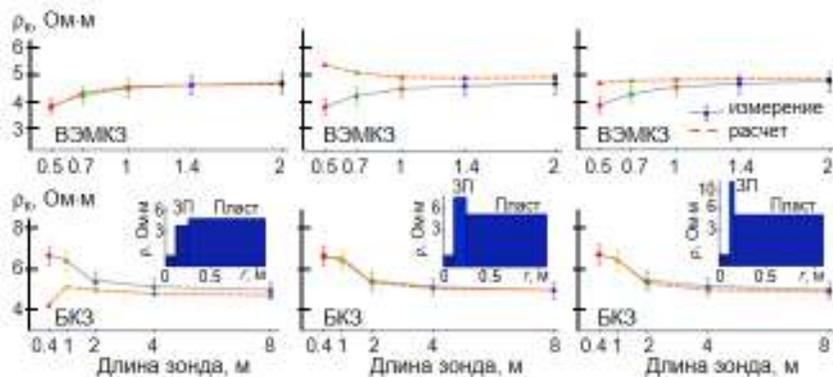


Рисунок 3 – Изотропные модели глинистого пласта по результатам инверсии данных ВЭМКЗ (слева) и БКЗ (в центре и справа). Сигналы (ρ_p) ВЭМКЗ и БКЗ: сплошная линия с вертикальными отрезками – измеренные и их погрешность, оранжевый пиктир – рассчитанные в подобранной модели

Из публикаций К. Kunz, Н. Moran и S. Gianzero еще с 1958 г. известно, что в модели без учета скважины при нормальном пересечении подошвенным градиент-зондом границы между анизотропными пластами изменение сигнала существенно отличается от изменения при пересечении границы изотропных пластов. Характерное расстояние между особенностями диаграммы составляет около длины зонда. Эти особенности остаются и в сигналах БКЗ, рассчитанных в реалистичных моделях с тонкими пластами, со скважиной и зонами проникновения. Например, увеличение значения $\rho_{пв}$ в пласте толщиной 8 м с зоной проникновения приводит к существенному изменению сигналов (рисунок 4) вплоть до сглаживания при 20 Ом·м и смены экстремумов на противоположные при 30 Ом·м.

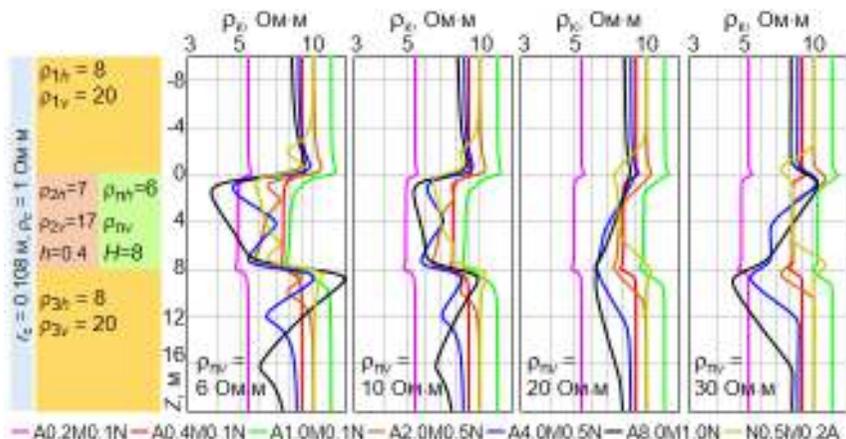


Рисунок 4 – Диаграммы ρ_k БКЗ в анизотропной трехслойной модели в зависимости от ρ_v пласта толщиной 8 м

При анализе практических данных можно заметить, что сигналы разных методов электрометрии не соответствуют друг другу [Сухорукова, Петров, Нечаев, 2017]. На интервале $\times 87$ – $\times 94$ м по данным ИК и БК глинистые отложения являются однородными, а по БКЗ – нет (рисунок 5). При совместной инверсии пластовых отсчетов изотропная модель включает узкую повышающую прискважинную зону, что является признаком анизотропии. При подборе двумерной изотропной модели рассчитанные сигналы длинных зондов отличаются от измеренных много более чем на погрешность измерения. Совпадение достигается только в анизотропной модели, при этом целевой пласт слабо анизотропен, а форма сигналов на его интервале определяется анизотропией перекрывающих отложений.

Возможность определения анизотропии УЭС анализируется с помощью расчета чувствительности зондов. Полученные значения параметров анизотропной модели проверяются по соответствию ρ_h данным БК и ВЭМКЗ, не зависящим от ρ_v в вертикальной скважине.

Выводы. В непроницаемых глинистых покрышках признаком анизотропии УЭС является разный характер ЗП, определяемой в цилиндрически-слоистой изотропной модели: понижающий по ВЭМКЗ и повышающий по БКЗ. Вид диаграмм ρ_k при пересечении границ анизотропных пластов существенно отличается от диаграмм в изотропных моделях. Зависимость сигналов от ρ_v при их инверсии на протяженном интервале измерения обеспечивает восстановление анизотропных параметров. Критерием достоверности полученных по данным БКЗ значений ρ_h и ρ_v является соответствие ρ_h данным БК и ВЭМКЗ, не зависящим от ρ_v .

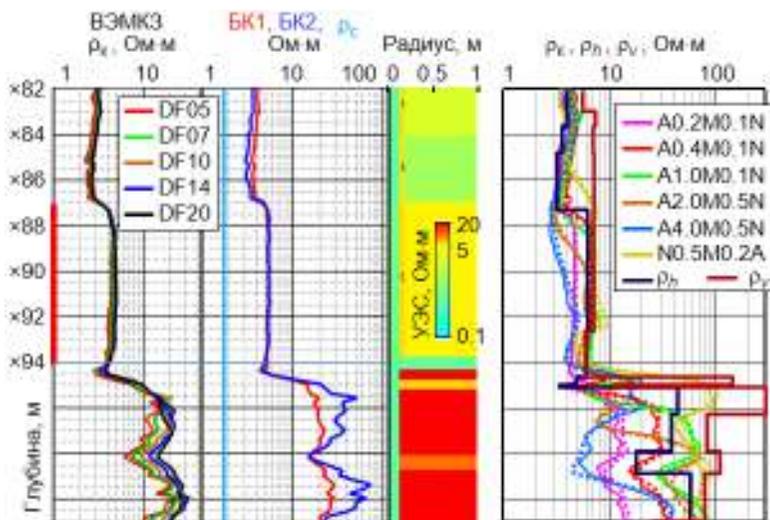


Рисунок 5 – Результат инверсии на интервале глинистых отложений. Слева: данные ВЭМКЗ; БК и резистивиметрии; изотропная модель УЭС; справа: данные БКЗ (измерение – сплошные линии, расчет – пунктир); подобранные значения ρ_h и ρ_v (аппаратура СКЛ-76, Федоровское месторождение, вертикальный интервал, глинистый раствор)

Глава 3. Диэлектрическая проницаемость глинистых отложений по данным электромагнитного каротажа в вертикальных скважинах

Рассмотрены зависимости сигналов зондов ВЭМКЗ от диэлектрической проницаемости (ДП) пластов осесимметричной модели, исследована возможность оценки ДП как трансформации разности фаз $\Delta\phi$ и отношения амплитуд A_2/A_1 и с использованием численной инверсии снятых пластовых отсчетов, показаны примеры определения ДП и ее частотной дисперсии по измеренным прибором СКЛ сигналам.

Несовпадение УЭС по данным БК и ИК или по данным разночастотных зондов ИК отмечено во многих публикациях (В. Anderson et al., 2006, 2008; LWD/MWD Resistivity Tool Parameters, 2009 и др.). Влиянием ДП объясняются разные значения УЭС, получаемые по сигналам индукционных зондов прибора LWD каротажа во время бурения на частотах 400 кГц и 2 МГц (М. Naugland, В. Anderson, Н. Ilfelder, М. Hizeм и др.). При экспериментальных исследованиях образцов при увеличении частоты от 1 до 14 МГц (диапазон ВЭМКЗ) значения относительной ДП снижаются от нескольких сотен до десятков, особенно высокие значения определяются для глинистых смесей и ненарушенных глинистых образцов по данным W.E. Kenyon, G.R. Olhoeft, N. Bona, E. Rossi, S. Capacioli, C. Li, P. Tercier, R.

Knight, А.Д. Талалова, Д.С. Даева, П.П. Боброва и др. M. Josh и B. Clennell отмечают корреляцию ДП с емкостью катионного обмена, площадью удельной поверхности и содержанием глины, а также разные значения при разной ориентировке электрического поля.

За десятилетия количественной интерпретации часто отмечалось несовпадение оценок УЭС пород по сигналам ВЭМКЗ и БКЗ, особенно на интервалах мощных однородных непроницаемых глинистых пластов. По сигналам ВЭМКЗ в таких пластах определяется понижающая зона проникновения, а по сигналам БКЗ – узкая прискважинная повышающая зона (вследствие влияния анизотропии УЭС). Введение диэлектрической проницаемости (ДП) пород снимает это кажущееся противоречие сигналов двух методов. Зависимость сигналов ВЭМКЗ от ДП среды подтверждена экспериментально сотрудниками НПП ГА "Луч" при измерениях в пресной воде Телецкого озера [Сухорукова, Петров, Никитенко, 2007].

В реперном интервале глин в покрышке коллектора АС₉ Хорлорского месторождения проверяются приборы скважинной электротометрии (интервал $\times 65$ – $\times 76$ на рисунке 6). Во многих скважинах по данным БК и БКЗ значения УЭС близкие (6–7 Ом·м), а по данным ВЭМКЗ – на 0.5–1.5 Ом·м ниже.

По данным каротажа этот глинистый интервал толщиной 11 м является достаточно однородным. При инверсии сигналов БКЗ подбирается резистивная модель, но рассчитанные в ней синтетические сигналы ВЭМКЗ оказываются далеко за пределами диапазона погрешностей измерения (на рисунке 6 вертикальными отрезками показаны интервалы, соответствующие $\pm 0.5^\circ$ – абсолютной погрешности измерения $\Delta\phi$). Для подбора $\Delta\phi$ варьируется значение ДП, в этих отложениях зависящее от частоты (рисунок 7) [Эпов, Сухорукова, 2012; Епов, ..., Suhorukova et al., 2013; Сухорукова, Эпов, Никитенко, 2013].

Полученные при интерпретации данных БКЗ и ВЭМКЗ значения ДП глинистых отложений, в том числе их дисперсия в диапазоне частот 0.875–14.0 МГц, совпадают с данными лабораторных экспериментов для глинистого образца, проведенных А.Д. Талаловым и Д.С. Даевым (1996).

Другим способом оценки ДП является трансформация в кажущиеся УЭС и ДП значений $\Delta\phi$ и A_2/A_1 , измеренных каждым зондом ВЭМКЗ аппаратуры СКЛ. При быстром пересчете в параметры однородной среды не требуется дополнительная информация, поэтому эти трансформации обычно используются для представления данных ВЭМКЗ. Однако анализ свойств трансформации в кажущуюся ДП приводит к выводу об ограничении возможности её применения в области границ пластов, при низком УЭС бурового раствора и при наличии измененной зоны [Сухорукова, Литвиченко, 2017].

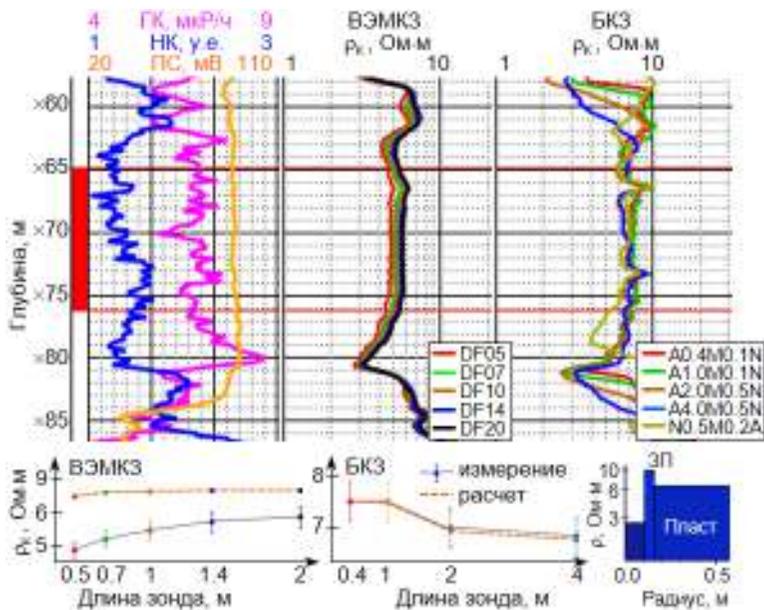


Рисунок 6 – Данные ГК, НК, ПС, ВЭМКЗ и БКЗ (Хорлорское месторождение) и результат подбора резистивной модели однородных глин (внизу): измеренные и подобранные сигналы ВЭМКЗ (слева) и БКЗ (посередине), модель (справа)

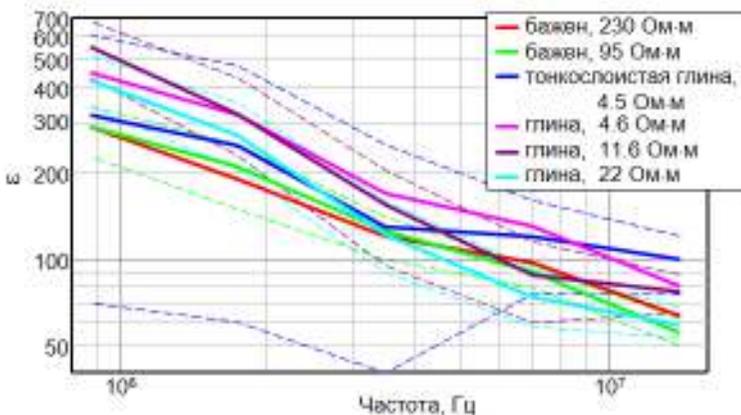


Рисунок 7 – Зависимости ДП глинистых пластов от частоты, определенные по данным ВЭМКЗ и БКЗ. Сплошная линия – значение, подобранное для измеренной разности фаз, пунктир – для разности фаз \pm погрешность измерения

Систематическая погрешность измерения A_2/A_1 дополнительно искажает трансформацию ϵ_k сигналов аппаратуры СКЛ. Для коррекции сигналов систематическая погрешность оценивается при инверсии сигналов БКЗ и ВЭМКЗ на интервалах реперных пластов. Трансформация после коррекции сигналов соответствует данным численного моделирования.

Воздействию повышенной ДП (возрастание разности фаз, большее для высоких частот) аналогично влияние прискважинной зоны пониженного УЭС и сдвига прибора с оси скважины на стенку. Поэтому оценка ДП возможна или по комплексу данных БКЗ + ВИКИЗ ($\Delta\varphi$), или по комплексу данных ВЭМКЗ прибора СКЛ ($\Delta\varphi + A_2/A_1$), или при наличии априорной информации о том, что снижение значений ρ_k на высоких частотах нельзя объяснить влиянием других факторов. При инверсии пластовых значений $\Delta\varphi$ и A_2/A_1 признаком влияния ДП является повышение значений обеих характеристик на высоких частотах, в то время как влияние зон проникновения и эксцентриситета приводит к их разнонаправленному изменению.

Выводы. Идентификация интервала с повышенной диэлектрической проницаемостью и построение его стартовой геоэлектрической модели базируется на анализе и совместной инверсии данных БКЗ и ВЭМКЗ, что позволяет выявить поляризацию по признаку меньшего УЭС пласта, определяемого по данным ВЭМКЗ, по сравнению с УЭС, определяемым по данным БКЗ. Дополнительным признаком является специфическое соотношение значений $\Delta\varphi$ и A_2/A_1 , измеряемых аппаратурой СКЛ. Проведение интерпретации предполагает два этапа: построение резистивной модели по данным БКЗ и подбор для этой модели таких значений ϵ , для которых совпадают измеренные и расчетные сигналы ВЭМКЗ. В некоторых глинистых отложениях значение ДП зависит от частоты, поэтому сигналы подбираются отдельно для каждого зонда. Получены оценки ϵ глинистых отложений месторождений Западной Сибири, в том числе их частотная зависимость в реперных глинистых пластах, в отложениях баженовской свиты и глинистых покрывок.

Глава 4. Электрофизические характеристики терригенных отложений по данным электромагнитного каротажа и бокового каротажного зондирования в субгоризонтальных скважинах

Для условий субгоризонтальных скважин, типичных для Западной Сибири, рассчитаны сигналы ВЭМКЗ, обоснована инверсия низкочастотных сигналов на базе модели горизонтально-слоистой среды с наклонным зондом, проведен анализ разности фаз и отношения амплитуд при приближении к горизонтальной границе и её пересечении, показано применение методических приёмов интерпретации на практических данных.

Крупные геофизические компании (Schlumberger, Halliburton, Pathfinder, Baker Hughes, Weatherford и др.) применяют в своей аппаратуре LWD комплексы индукционных зондов, в которых моменты катушек направлены вдоль оси прибора, перпендикулярно или наклонно к ней (R. Meador, M. Dautel, J. Pitcher, M. Bittar, L. Chou, Q. Li, R. Beer, L. Dias, T. Helgesen и др.). Такие зонды при вращении прибора обеспечивают азимутальную направленность исследования. Малоглубинные методы электрического каротажа (N. Al-Musharfi, R. Bansal, M. Ahmed) применяются для надежного определения наклона границ пластов. Для этих комплексов приборов разрабатываются методы быстрого моделирования и системы инверсии результатов измерения в реальном времени (L. Tabarovsky, M. Rabinovich, B.I. Anderson, J. Seydoux, J. Tabanou, D. Avdeev, Ts. Wang, R.E. Chemali, D. Omeragic, T.M. Habashy, S. Davydycheva, F. Le, J. Lofts, S. Martakov, M. Dautel, J. Pitcher, M. Bittar и др.).

При интерпретации данных низкочастотного ИК вначале корректируется влияние скважины с буровым раствором, эксцентриситета зонда, вмещающих пластов, электрической поляризации породы, затем сигналы подвергаются численной инверсии на базе горизонтально-слоистой геоэлектрической модели. Поскольку в сильно наклонных скважинах на сигналы влияет вертикальное УЭС осадочных пород, особое внимание уделяется алгоритмам оценки анизотропии УЭС (B. Anderson, T. Barber, M. Luling, V. Rosato, J. Beck, J. Xiao, I. Geldmacher, M. Rabinovich, B. Anderson и др.).

Российскими компаниями при исследовании субгоризонтальных скважин применяются многозондовые приборы ИК с зондами классической конфигурации (моменты катушек направлены вдоль оси прибора). Для интерпретации их сигналов создается программно-алгоритмическое обеспечение моделирования и инверсии (Л.Е. Кнеллер, Я.С. Гайфулин, А.П. Потапов, А.Д. Каринский, Д.С. Даев, В.В. Вержбицкий, В.А. Пантюхин и др.).

Для исследования сигналов ВЭМКЗ в наклонных и горизонтальных скважинах сотрудниками Института Л.А. Табаровским, М.И. Эповым, М.Н. Никитенко, А.Б. Черяукой, С.В. Мартаковым, И.Н. Ельцовым, В.Н. Глинских, И.В. Суудиной, О.В. Нечаевым и др. разработаны и верифицированы программы расчета разности фаз $\Delta\varphi$ и отношения амплитуд A_2/A_1 в полной постановке, то есть с учетом особенностей скважины, конструкции прибора, измененных зон, а также программы инверсии.

В результате численного моделирования установлено, что при типичных для субгоризонтальной скважины диаметрах сечения скважины и прибора СКЛ, УЭС бурового раствора и окружающих пород, УЭС и толщины измененной прискважинной зоны, а также эксцентриситете прибора, глубине периодических утолщений и спиральной нарезки на стенке скважины низкочастотные сигналы ВЭМКЗ не подвержены влиянию этих факторов. Поэтому для количественной интерпретации этих сигналов применима

быстрая задача расчета для наклонного зонда в горизонтально-слоистой геоэлектрической модели [Еров, Suhorukova et al., 2012; Горбатенко, Вологдин, Сухорукова, 2013].

Распределение электромагнитного поля, возбуждаемого в среде наклонным зондом ВЭМКЗ, существенно отличается от распределения, возникающего при вертикальном положении зонда, что приводит к значительному изменению регистрируемых сигналов по сравнению с вертикальными скважинами. В области пересечения границы контрастных по УЭС пластов повышается чувствительность сигналов к УЭС пластов и углу между зондом и границей, в том числе за счет влияния зарядов, возникающих на границах при пересечении последних вихревыми токами и определяемых контрастом УЭС на границе [Эпов, ..., Сухорукова и др., 2014; Эпов, ..., Сухорукова, 2014; Горбатенко, Сухорукова, 2014; Каюров, ..., Сухорукова и др., 2014; Эпов, ..., Сухорукова и др., 2015]. Поэтому диаграммы ВЭМКЗ в одном и том же разрезе будут отличаться для разных углов пересечения или траекторий скважины даже при латеральной выдержанности свойств пластов. Изменение сигналов ИК в области пересечения границ также происходит, но при интерпретации сигналы на интервалах влияния зарядов исключаются из подбора (D. Elis, J. Singer).

В отличие от вертикальной скважины, при большом зенитном угле пересечение электрически контрастной границы зондом ВЭМКЗ отмечается резким пиком или изломом $\Delta\varphi$, обусловленным возникновением индуцированного заряда в плоскости границы [Еров, Suhorukova et al., 2012; Горбатенко, Сухорукова, 2014]. На диаграммах A_2/A_1 экстремумы проявлены слабее и чаще представлены изломом диаграмм.

Зонды ВЭМКЗ аппаратуры СКЛ измеряют две характеристики э.д.с. в приемных катушках – $\Delta\varphi$ и A_2/A_1 , что предоставляет при их совместном анализе дополнительные возможности интерпретации данных в субгоризонтальных скважинах, такие как оценка анизотропии УЭС [Эпов, ..., Сухорукова и др., 2016] и оценка УЭС подстилающего пласта и расстояния до него [Горбатенко, Сухорукова, 2016]. Значения $\Delta\varphi$ и A_2/A_1 определяются разными областями среды, что проявляется в несовпадении рассчитанного по ним ρ_k даже в достаточно мощном пласте (рисунок 8), но в то же время обеспечивает восстановление электрофизических параметров при инверсии. По результатам расчетов в субгоризонтальной скважине в однородном пласте повышенного УЭС влияние вмещающих пластов значительно, если до них более длины зонда для $\Delta\varphi$ и полутора длин – для A_2/A_1 ; влияние вмещающих пластов сильнее на A_2/A_1 ; трансформации ρ_k по $\Delta\varphi$ и по A_2/A_1 существенно различаются, но близки между собой вдали от границ для зондов, работающих на одной частоте (например, ρ_k по $\Delta\varphi$ для DF16 и DF20 в середине пласта).

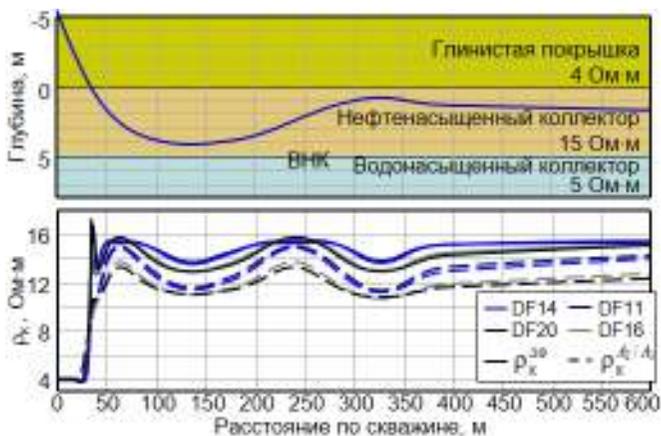


Рисунок 8 – Геоэлектрическая модель и траектория скважины (вверху) и синтетические сигналы ВЭМКЗ (внизу): кажущееся сопротивление по разности фаз и отношению амплитуд

Медленное изменение сигналов электрокаротажа позволяет лишь приблизительно локализовать границу пластов, как, например, на глубине $\times 095$ и $\times 139$ м по скважине, в то время как по данным ГК и НК и ПС её положение определяется достаточно уверенно (рисунок 9). По сигналам коротких зондов (DF05–DF07) определяются интервалы с измененной прискважинной зоной, по которой выделяются проницаемые пласты. УЭС пластов оцениваются по значениям ρ_k в пределах выделенных границ.

Субгоризонтальный интервал $\times 050$ – $\times 170$ м пробурен на биополимерном буровом растворе с УЭС 0.04 Ом·м, зенитный угол 62–95°. Коллектор АС₉ ($\times 096$ – $\times 140$ м) неоднороден: от кровли к подошве значение ρ_k по зонду DF05 изменяется от 1.5 до 5 Ом·м, по зонду DF20 – от 10 до 32 Ом·м.

Для ускорения инверсии проводится прореживание точек. Варьируя расположение и густоту точек на профиле, можно усилить вклад интересных участков интервала в результате инверсии [Горбатенко, Сухорукова, 2016]. В выбранных точках задается значение зенитного угла. Подбирается разность фаз низкочастотных зондов DF14 и DF20.

В результирующей модели границы пластов наклонены относительно горизонтали на 1.1° таким образом, что в конце скважины повышаются (рисунок 10). Изменение положения границ и значений УЭС пластов в стартовой и результирующей моделях оказывается существенным, при этом в результате инверсии восстанавливается обычное вертикальное распределение УЭС в нефтеводонасыщенном коллекторе: УЭС снижается от кровли к подошве, что соответствует снижению нефтесодержания с глубиной, в отличие от традиционной интерпретации, по результатам которой

УЭС возрастает к подошве коллектора [Каюров,...., Сухорукова и др., 2015].

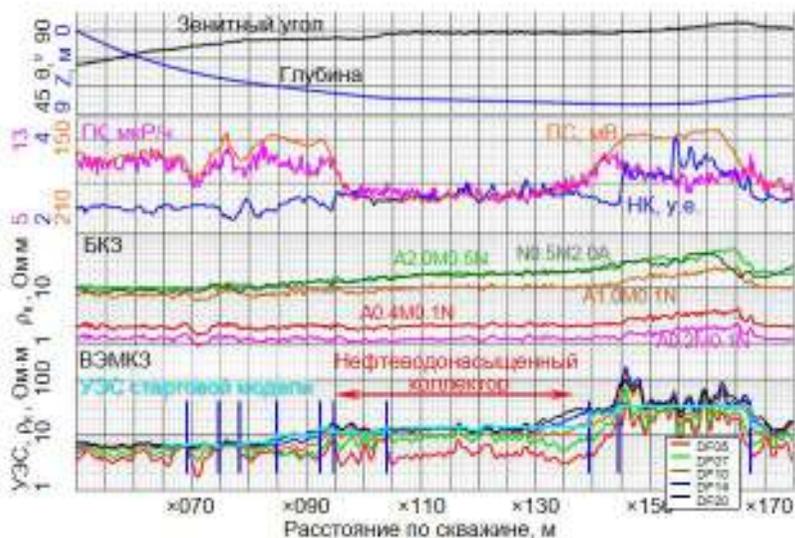


Рисунок 9 – Стартовая модель в субгоризонтальной скважине Лянторского месторождения. Сверху вниз: зенитный угол (θ) и относительная глубина (Z); нейтронный картаж (НКт), гамма-картаж (ГК), потенциал самополяризации (ПК); ρ_k по БКЗ; ρ_k по ВЭМКЗ и УЭС стартовой модели (вертикальными отрезками показано положение границы)

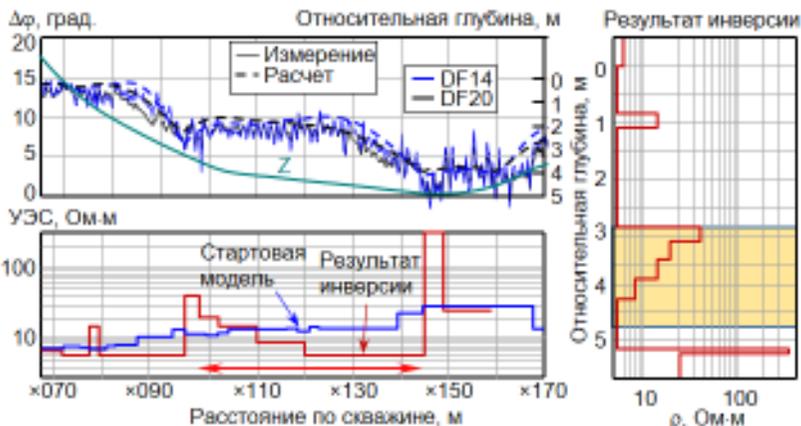


Рисунок 10 – Измеренные и синтетические сигналы и полученное в результате инверсии распределение УЭС в зависимости от расстояния вдоль скважины (в сравнении со стартовой моделью) и глубины по вертикали

Для синтетических сигналов БКЗ в наклонной скважине по сравнению с сигналами в вертикальной характерны симметрия относительно центров пластов и отсутствие экстремумов на границах, что подтверждается практическикими данными. Инверсия сигналов зондов, длина которых не больше толщины пластов, позволяет с достаточной точностью определить параметры измененной зоны и УЭС пласта. При типичном диаметре субгоризонтальной скважины 0.124 м при количественной интерпретации сигналов градиент-зондов аппаратуры СКЛ необходимо учитывать диаметр прибора 0.102 м [Сухорукова и др., 2015; Сухорукова и др., 2017]. Отсутствие экстремумов сигналов при пересечении наклонными зондами горизонтальных границ позволяет выделять субвертикальные неоднородности, на границах которых экстремумы остаются [Каюров, ..., Сухорукова и др., 2015; Сухорукова и др., 2016].

Горизонтальное и вертикальное УЭС (ρ_h и ρ_v) в субгоризонтальной скважине может быть определено как по данным ВЭМКЗ СКЛ на основе разной зависимости $\Delta\varphi$ и A_2/A_1 (с применением той же инверсионной программы [Эпов, ..., Сухорукова и др., 2016]), так и по $\Delta\varphi$, если скважина проходит в пласте достаточной толщины с разным зенитным углом, или при наличии априорной информации о значении ρ_h по данным из вертикальных скважин [Епов, Suhorukova et al., 2012]. Также разной зависимостью от ρ_h и ρ_v характеризуются сигналы ВЭМКЗ и БКЗ: сигналы градиент-зондов стремятся к значению в среде с УЭС, равным среднему геометрическому этих параметров, а сигналы ВЭМКЗ – к значению в среде с большим УЭС, чем среднее геометрическое.

Например, в глинистом пласте–покрышке при инверсии сигналов БКЗ определяется УЭС пласта 5.1 Ом·м, а сигналов ВЭМКЗ – 6.8 Ом·м (рисунок 11). Считая, что $\sqrt{\rho_h \cdot \rho_v} = 5.1$ Ом·м, можно подобрать такие значения ρ_h и ρ_v , чтобы рассчитанные значения разности фаз низкочастотных наклонных зондов ВЭМКЗ совпали с измеренными. Наилучшие результаты получаются при значениях коэффициента анизотропии $\lambda = \sqrt{\rho_v / \rho_h} = 1.65-1.70$, $\rho_h = 3.0-3.1$ Ом·м, $\rho_v = 8.4-8.7$ Ом·м.

Выводы. Для инверсии низкочастотных сигналов ВЭМКЗ в субгоризонтальных скважинах применима программа расчета сигналов наклонного зонда в горизонтально-слоистой среде без учета скважины и измененной зоны, потому что измененная зона пониженного УЭС и эксцентриситет приборов ВИКИЗ, ВЭМКЗ, СКЛ не влияют на сигналы длинных зондов. Зона и эксцентриситет меньше изменяют A_2/A_1 , чем $\Delta\varphi$; их влияние на сигналы коротких зондов корректируется с помощью палеток.

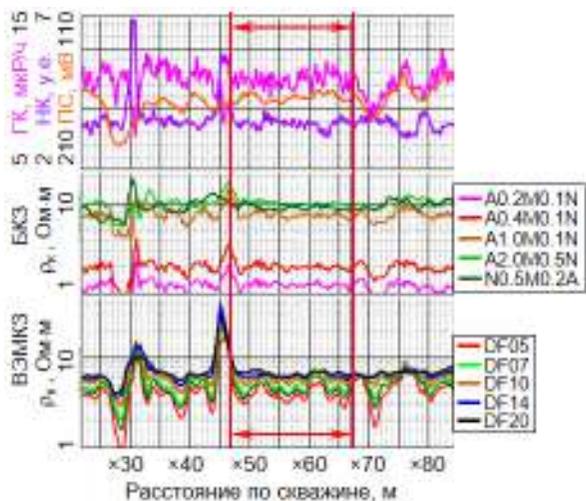


Рисунок 11 – Сигналы при наклонном пересечении анизотропного пласта (Федоровское месторождение); $\theta \approx 80^\circ$. Сверху вниз: нейтронный каротаж (НК), гамма-каротаж (ГК), потенциал самополяризации (ПС); ρ_k по БКЗ; ρ_k по ВЭМКЗ

В однородном пласте повышенного УЭС влияние вмещающих пластов значительно, если до них более 1.0 длины зонда для $\Delta\varphi$ и 1.5 – для A_2/A_1 ; влияние вмещающих пластов более низкого УЭС сильнее на A_2/A_1 ; трансформации ρ_k по $\Delta\varphi$ и по A_2/A_1 существенно различаются, но близки между собой вдали от границ для зондов, работающих на одной частоте.

В отличие от традиционной методики интерпретации, при инверсии на базе горизонтально-слоистой модели с наклонным зондом восстанавливается вертикальное распределение УЭС в нефтеводонасыщенном коллекторе, определяются толщины и УЭС тонких контрастных пластов, анизотропия УЭС.

Глава 5. Электрофизические характеристики сложнопостроенных разрезов по данным электромагнитного и электрического каротажа

Примеры применения разработанных методических приёмов и совместной инверсии практических данных БКЗ и ВЭМКЗ включают исследование электрической анизотропии и диэлектрической проницаемости глинистых покрышек и баженовской свиты, выявление зон техногенного обводнения по радиальному распределению УЭС, уточнение параметров тонких коллекторов.

На интервале глинистых покрышек коллектора АС₄ (Федоровское месторождение) со смешанным насыщением установлено увеличение коэффициента анизотропии с увеличением УЭС коллектора (рисунок 12). Наличие в коллекторе нефти и воды устанавливается по хорошо выраженной

окаймляющей зоне, а УЭС пласта в разных скважинах от 5 до 10 Ом·м соответствует разному содержанию нефти. Скважины эксплуатационные, режим бурения одинаковый, буровой раствор пресный глинистый. Коэффициент анизотропии $\lambda = \sqrt{\rho_v / \rho_h}$ в среднем составляет около 1.2 (диапазон 1.1–1.3) при УЭС пласта 5 Ом·м, около 1.5 (1.2–2.0) при 6 Ом·м и 1.6–1.8 (1.4–2.2) при 8–10 Ом·м.

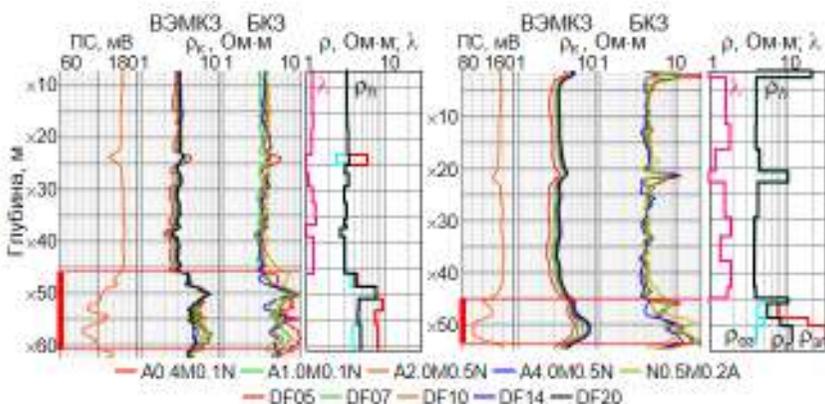


Рисунок 12 – Анизотропия УЭС на интервале покрышки коллектора АС4 с низким (слева) и высоким (справа) содержанием нефти

При совместной инверсии в условиях тонких измененных проникновением бурового раствора прискважинных зон выявлены интервалы с окаймляющей зоной, наличие которой характерно для ненарушенного смешанного насыщения коллекторов [Эпов, ..., Сухорукова и др., 2013]. Достоверное определение радиального профиля УЭС важно при исследовании частично выработанных коллекторов, потому что замещение нефти пресной техногенной водой из нагнетательных скважин часто не приводит к изменению УЭС коллектора или его части. Например, УЭС неокомских коллекторов при насыщении пластовой водой составляет 2.5–4.0 Ом·м, при насыщении нефтью и пластовой водой – от 5.0–6.0 Ом·м до нескольких десятков в зависимости от содержания нефти, но такие же значения УЭС характерны и для коллекторов, в разной степени обводненных пресной техногенной водой, смешанной с минерализованной пластовой.

В коллекторе БС₁₋₂ Федоровского месторождения при совместной инверсии сигналов БКЗ и ВЭМКЗ радиальный профиль УЭС определяется даже при небольшой толщине измененных проникновением фильтра бурового раствора зон (рисунок 13).

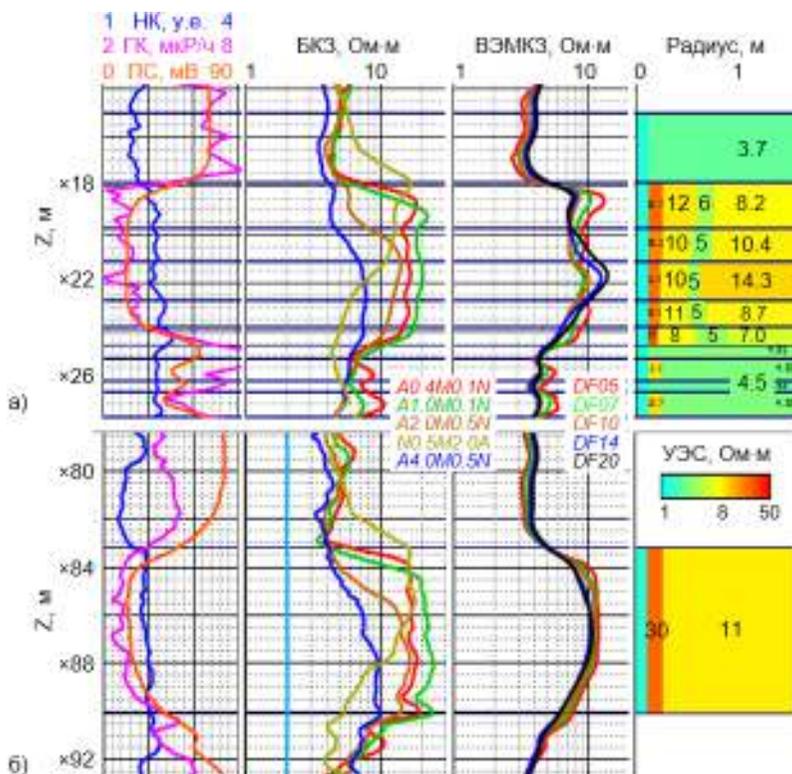


Рисунок 13 – Радиальное распределение УЭС на интервале коллектора БС₁₋₂: а – нефтеводонасыщенного (×18.0–×27.4 м), б – обводненного (×83.2–×90.0 м)

При близких значениях ρ_k в одной скважине в цилиндрически-слоистой модели определяется окаймляющая зона, что является признаком наличия подвижной нефти и пластовой воды, а в другой скважине эта зона отсутствует, что свидетельствует об обводнении пресной техногенной водой. Выводы о типе насыщения подтверждены результатами испытаний в этих скважинах, предоставленными специалистами ОАО "Сургутнефтегаз".

Наличие в коллекторе тонких карбонатных и глинистых пластов с более низким или высоким УЭС приводит к изменению значений ρ_k . Чаще всего толщины пластов однородного песчаника меньше или сравнимы с длинами зондов БКЗ и ВЭМКЗ, а в таком случае количественная интерпретация на основе традиционной цилиндрически-слоистой модели приводит к недостоверным значениям геоэлектрических параметров. Для их уточнения применяется инверсия в двумерных постановках [Эпов, Никитенко,

Сухорукова, 2006; Аржанцев, Сухорукова, Нечаев, 2012].

При уточнении УЭС пласта по данным ВЭМКЗ информативен подход с упрощенной горизонтально-слоистой моделью, без учета скважины и измененных зон. При инверсии низкочастотных сигналов уточняются глубины горизонтальных границ и значения УЭС. В коллекторе БС₁₀₋₁₁ (Западно-Сургутское месторождение, кровля на глубине $\times 17$ м; рисунок 14) выявляются 3 высокоомных карбонатных прослоя и уточняется строение карбонатизированного и глинизированного тонкослоистых песчаных пластов [Каюров, ..., Сухорукова и др., 2015]. Высокую достоверность полученной модели доказывает хорошее совпадение рассчитанного и измеренного сигналов. Сигнал, рассчитанный в 1D цилиндрически-слоистой модели, построенной традиционным способом по значению ρ_k этого же длинного зонда, оказывается значительно сильнее сглаженным.

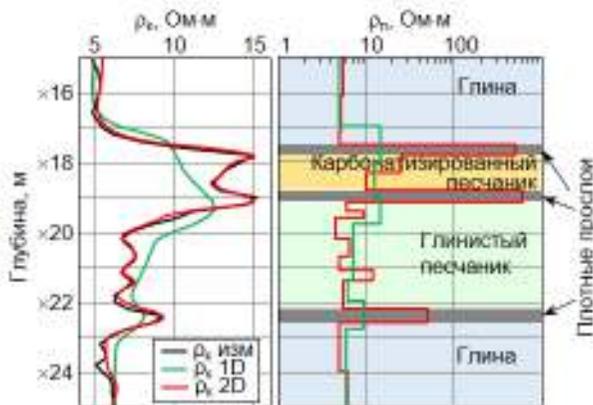


Рисунок 14 – Уточнение модели в результате двумерной инверсии разности фаз зонда DF20 ВЭМКЗ. Сигналы: ρ_k изм – измеренный, ρ_k 1D – рассчитанный в 1D модели, ρ_k 2D – рассчитанный в 2D модели; справа – УЭС пласта (те же цвета)

При инверсии данных БКЗ и ВЭМКЗ на интервале баженовской свиты выявляется сильная электрическая анизотропия и частотная зависимость диэлектрической проницаемости пород [Сухорукова, Эпов, Никитенко, 2013; Петров, Сухорукова, Нечаев, 2017].

В отложениях свиты на Салымском месторождении ρ_h находится в диапазоне 100–1000 Ом·м, радиус скважины 0.07 м, УЭС бурового глинистого раствора 1 Ом·м. В результирующей постинверсионной модели значение ρ_h достигает около 4000 Ом·м в верхней части интервала свиты, в середине выделяются тонкие прослои со значением 30–50 Ом·м (рисунок 15). Высокие значения коэффициента электрической анизотропии λ (5–10) в кровле и подошве свиты могут быть связаны с чередованием тонких от-

носителем проводящих глинистых прослоев с изолирующими высокобитумизированными или кремнистыми.

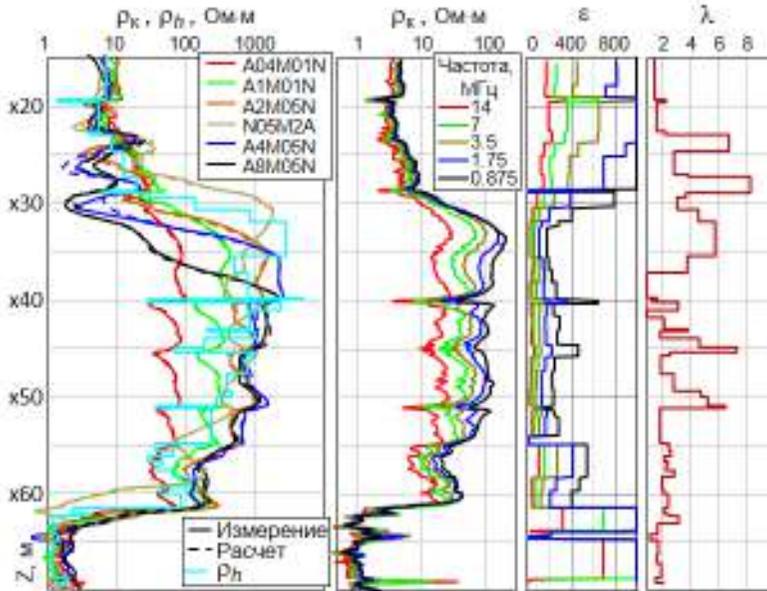


Рисунок 15 – Измеренные и синтетические данные БКЗ, ρ_k ВЭМКЗ, определенные значения ε , ρ_h и λ (интервал баженовской свиты, Салымское месторождение)

При относительной погрешности измерения 5% значения ρ_v в наиболее высокоомных пластах определяются с погрешностью около 50%. Достоверность результатов инверсии подтверждается в среднем хорошим совпадением определенных значений ρ_h и данных трехэлектродного зонда БК [Жаиров, ..., Сухорукова и др., 2015]. На диаграммах ε наблюдается дифференциация отложений свиты, отражающая разное содержание глинисто-аргиллитистых частиц в разных прослоях. Верхняя часть высокоомных отложений характеризуется пониженными значениями, средняя часть – повышенными и с большей частотной дисперсией. Значения ε искажены в области прослоев с пониженным относительно соседних пластов УЭС (например, $\times 36$ – $\times 37$, $\times 63$ – $\times 64$ и $\times 68$ – $\times 69$ м).

Диэлектрическая проницаемость тем больше, чем больше глинистого компонента. Зависимости для основных литотипов похожи по характеру изменения, но различаются уровнем значений: минимальные характерны для кремнистых и кремнисто-глинисто-карбонатных пород, средние – для кремнисто-глинистых и максимальные – для аргиллитов (рисунок 16).

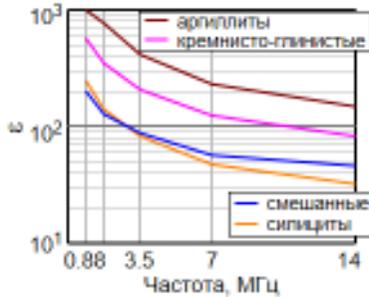


Рисунок 16 – Частотные зависимости $\epsilon_{эф}$ и их соответствие основным литотипам баженовских пород

Выводы. Количественная интерпретация данных скважинной электротометрии на основе численной инверсии с определением расширенного набора электрофизических параметров реалистичной модели осадочных отложений обеспечивает решение задач, невозможное при интерпретации по традиционным методикам: установлено увеличение коэффициента анизотропии глинистых покрышек коллектора АС₄ с увеличением УЭС (нефте содержания) коллектора; в условиях тонких измененных прискважинных зон определены интервалы с окаймляющей зоной, характерной для коллекторов смешанного насыщения в отличие от техногенно обводненных; на базе двумерной модели уточнены параметры пластов толщиной, сравнимой с длинами зондов или меньшей; выявлена сильная электрическая анизотропия и частотно-зависимая диэлектрическая проницаемость пород баженовской свиты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом работы является создание и научное обоснование методических приемов анализа и совместной количественной интерпретации данных ВЭМКЗ и БКЗ, направленных на повышение достоверности, разрешающей способности и информативности скважинной электротометрии в вертикальных и субгоризонтальных скважинах.

На базе предложенных способов обработки и количественной интерпретации данных электрического и электромагнитного каротажа в вертикальных и наклонных скважинах решен комплекс первоочередных задач для развития электрокаротажных методов изучения осадочных отложений, в том числе анизотропных и электрически поляризующихся. Совместная численная инверсия данных ВЭМКЗ и БКЗ позволяет построить реалистичную геоэлектрическую модель терригенных разрезов, решая тем са-

мым проблему кажущейся несогласованности поведения сигналов, обычную для традиционных методик. Применением при препроцессинге и инверсии данных скважинной электрометрии современных верифицированных алгоритмов расчета сигналов обеспечивается наиболее полный учет влияния как условий измерения в скважине, так и конструктивных особенностей аппаратуры, что повышает точность восстановления электрофизических параметров горных пород.

Обоснование применения быстрых программ решения прямых задач для зондов БКЗ в вертикальных скважинах и для длинных зондов ВЭМКЗ в наклонных скважинах открывает возможности создания автоматизированных систем количественной интерпретации и широкого их использования на практике. Внедрение таких систем вместе с разработанным методическим обеспечением позволит получить более достоверную информацию о пространственном распределении УЭС тонкослоистых контрастных осадочных разрезов, чем применение палеточной интерпретации и тем более визуальной интерпретации диаграмм кажущегося сопротивления.

В вертикальных скважинах определение по данным БКЗ анизотропии УЭС представляется выгодной альтернативой использованию сложных и дорогих зарубежных технологий. Выявление анизотропии по комплексу данных БКЗ и ВЭМКЗ с привлечением данных БК не требует сложных навыков и особенных затрат: измерение таким комплексом уже два десятилетия широко применяется на территории Западно-Сибирской НГП.

Хотя ДП горных пород исследуется довольно давно, ее определение проводится в основном на образцах, составленных из компонентов пород, и в меньшей степени на кернах. При этом часто сложно оценить влияние искажающих параметров измерительной установки. Оценка ДП по предлагаемой методике проводится по данным, измеренным, во-первых, в условиях естественного залегания пород, во-вторых, в существенно большем их объеме, а в-третьих, в большом количестве скважин. Поскольку полученные на частотах ВЭМКЗ значения ДП оказываются близкими к известным из публикаций результатам измерения на образцах, представляется перспективным их накопление и систематизация в соответствии с литологическими особенностями отложений.

Методика построения геоэлектрической модели отложений, вскрываемых сильно наклонными и субгоризонтальными скважинами, в том числе оценки анизотропии УЭС, приводит к пространственным распределениям УЭС, существенно отличающимся от установленных по традиционным методикам. В пользу предлагаемого подхода свидетельствует физически обоснованное вертикальное распределение УЭС (снижающееся от кровли к подошве), определяемое в нефтеводонасыщенном коллекторе, подстилаемом высокоомным пластом, притом что при традиционном подходе УЭС повышается с приближением к подошве. Сочетание при инверсии давно

применяемого "оконного" подхода с предложенным, при котором на значительном протяжении скважины подбирается одна горизонтально-слоистая модель, представляется целесообразным для выделения областей латеральных изменений на фоне однородных горизонтальных напластований (зон обводнения или субвертикальных зон залеченных трещин).

Следует отметить, что повышение достоверности результатов количественной интерпретации с помощью предложенных методик основано на том, что с высокой точностью измеряются как сигналы каротажа, так и параметры среды, в которой находится прибор (УЭС бурового раствора, сечение скважины), а также смещение прибора с оси скважины. Необходимая точность измерения может не достигаться по следующим причинам: 1) не для всех приборов используется тестирование в объемной физической модели; 2) не всеми производственными компаниями своевременно выполняются регламентированные метрологические работы; 3) в некоторых случаях компании проводят "исправление" измеряемых сигналов без документации этого действия. Но, с другой стороны, проблема калибровки каротажных приборов неизбежно должна подниматься из-за усложнения геологического строения разрабатываемых в последние десятилетия целевых объектов – сложнопостроенных коллекторов небольшой толщины, с глинистыми и карбонатизированными прослоями, что существенно изменяет распределение УЭС и приводит к усилению его анизотропии, а также с глинистой цементацией и пиритизацией, значительно повышающими пористость породы.

Остаются пока не исследованными вопросы построения оптимальной функции невязки и прореживания данных измерения при инверсии сигналов вдоль скважины, возможности оценки слабой электрической анизотропии песчаных коллекторов при наличии измененных проникновением зон, инверсии ВЭМКЗ в субгоризонтальных скважинах с учетом как зенитного, так и азимутального угла. Высокая ресурсоемкость программного обеспечения не позволяет в настоящее время использовать при инверсии комплексов данных ВЭМКЗ, БКЗ и БК в субгоризонтальных скважинах, что повышает требования к тщательности подбора разности фаз и отношения амплитуд длинных зондов ВЭМКЗ.

Несомненно, особый интерес представляет сравнение получаемых оценок анизотропии УЭС и ДП с результатами других методов исследования. Например, анизотропии УЭС с анизотропией тепловых свойств, исследуемой на интервале баженовских отложений. Или анализ анизотропии УЭС и оценок ДП по данным ВЭМКЗ из нескольких скважин, когда известны их относительное положение на месторождении и продуктивность коллекторов, а также доступны результаты исследования литологии и электрофизических свойств кернов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК

1. **Сухорукова К.В.**, Петров А.Н., Никитенко М.Н. Численный анализ измерений ВИКИЗ и ВЭМКЗ на Телецком озере // Каротажник. 2007. № 5. С. 30–38.
2. Игнатов В.С., **Сухорукова К.В.** Влияние эксцентриситета зонда на сигналы высокочастотного электромагнитного каротажа // Каротажник. 2009. Вып.182. С. 101–110.
3. Эпов М.И., Каюров К.Н., Ельцов И.Н., Петров А.Н., **Сухорукова К.В.**, Соболев А.Ю., Власов А.А. Новый аппаратный комплекс геофизического каротажа СКЛ и программно-методические средства интерпретации EMF Pro // Бурение и нефть. 2010. № 2. С. 16–19.
4. Аржанцев В.С., **Сухорукова К.В.**, Нечаев О.В. Чувствительность к геоэлектрическим параметрам и двумерная инверсия сигналов бокового каротажного зондирования // Каротажник. 2012. Вып. 220. С. 105–115.
5. Горбатенко А.А., Вологдин Ф.В., **Сухорукова К.В.** Моделирование влияния неровностей стенки скважины и эксцентриситета каротажного зонда на показания высокочастотного электромагнитного каротажного зондирования в скважинах с высокопроводящим раствором // Каротажник. 2013. № 2. С. 54–64.
6. Эпов М.И., Глинских В.Н., **Сухорукова К.В.**, Суродина И.В. "Прорыв" в индукционном каротаже не состоялся // Каротажник. 2013. № 1. С. 99–120.
7. Эпов М.И., Глинских В.Н., **Сухорукова К.В.**, Павлова М.А. Интерпретация данных электрокаротажных зондирований в неокомских пластах-коллекторах Широного Приобья // Геология нефти и газа. 2013. № 3. С. 21–28.
8. Эпов М.И., Никитенко М.Н., **Сухорукова К.В.**, Глинских В.Н., Еремин В.Н., Горбатенко А.А., Павлова М.А. Сигналы электромагнитного каротажа в процессе бурения и их численная инверсия // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2014. № 3. С. 49–55.
9. Эпов М.И., Никитенко М.Н., Глинских В.Н., **Сухорукова К.В.** Численное моделирование и анализ сигналов электромагнитного каротажа в процессе бурения // Каротажник. 2014. № 11. С. 29–42.
10. Горбатенко А.А., **Сухорукова К.В.** Особенности сигналов высокочастотного электромагнитного каротажа в наклонных и горизонтальных скважинах // Каротажник. 2014. № 11. С. 42–55.
11. Каюров К.Н., Еремин В.Н., Эпов М.И., Глинских В.Н., **Сухорукова К.В.**, Никитенко М.Н. Аппаратура и интерпретационная база электромагнитного каротажа в процессе бурения // Нефтяное хозяйство. 2014. № 12. С. 112–115.

12. **Сухорукова К.В.**, Аржанцев В.С., Суродина И.В., Нечаев О.В. Результаты численного моделирования сигналов бокового каротажного зондирования автономной аппаратуры СКЛ // Каротажник. 2015. № 1. С. 58–72.
13. Эпов М.И., Глинских В.Н., **Сухорукова К.В.**, Никитенко М.Н., Еремин В.Н. Численное моделирование и инверсия данных электромагнитного каротажа в процессе бурения и шаблонирования нефтегазовых скважин // Геология и геофизика. 2015. № 8. С. 1520–1529.
14. Каюров К.Н., Еремин В.Н., Петров А.Н., **Сухорукова К.В.**, Никитенко М.Н., Аржанцев В.С. Аппаратурный комплекс СКЛ для каротажа в нефтегазовых скважинах и его интерпретационная база // Нефтяное хозяйство. 2015. № 9. С. 38–43.
15. Эпов М.И., Никитенко М.Н., **Сухорукова К.В.**, Глинских В.Н. Исследование возможностей электрического и электромагнитного каротажа в электрически макроанизотропных пластах, вскрытых наклонно-горизонтальными скважинами // Каротажник. 2016. № 2. С. 64–79.
16. Горбатенко А.А., **Сухорукова К.В.** Электромагнитные зондирования в субгоризонтальных скважинах: возможности геонавигации и численной инверсии // Геология и геофизика. 2016. № 7. С. 1408–1417.
17. **Сухорукова К.В.**, Копытов Е.В., Аржанцев В.С., Горбатенко А.А. Сигналы электрического и электромагнитного каротажа в наклонной скважине по данным численного моделирования // Каротажник. 2016. № 12. С. 87–97.
18. **Сухорукова К.В.**, Петров А.М., Нечаев О.В. Численная инверсия данных электрокаротажа в интервалах анизотропных глинистых отложений // Каротажник. 2017. № 4. С. 34–48.
19. **Сухорукова К.В.**, Литвиченко Д.А. Особенности трансформации сигналов электромагнитного каротажа в кажущуюся диэлектрическую проницаемость // Каротажник. 2017. № 6. С. 51–64.

Статьи в других рецензируемых научных изданиях

20. Эпов М.И., Никитенко М.Н., **Сухорукова К.В.** Об инверсии диаграмм ВИКИЗ в контрастных тонкослоистых коллекторах, вскрытых пологими скважинами // Каротажник. 2006. № 6. С. 84–100.
21. Эпов М.И., **Suhorukova C.V.**, Nikitenko M.N., Gorbatenko A.A., Arzhantsev V.S. Electromagnetic sounding in deviated and horizontal wells: mathematical modeling and real data interpretation // SPE Oil & Gas Exploration & Production Technical Conference & Exhibition (Moscow, Russia, 16–18th October 2012). 2012. Paper SPE 162034. 18 p. – URL: <http://www.onepetro.org/mslib/servlet/onepetropreview?id=SPE-162034-MS&soc=SPE> – DOI 10.2118/162034-MS.

22. Эпов М.И., **Сухорукова К.В.** Электрические и электромагнитные каротажные зондирования в реалистичных моделях нефтегазовых коллекторов: численное моделирование и интерпретация // Геофизический журнал. 2012. № 4. С. 15–30.

23. **Сухорукова К.В.**, Эпов М.И., Никитенко М.Н. Диэлектрическая проницаемость терригенных пород Западной Сибири по данным высокочастотного электромагнитного каротажа // Материалы VI Всерос. школы-семинара им. М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли – ЭМЗ-2013. Новосибирск: ИНГГ СО РАН. 2013. 4 с. URL: http://emf.ru/ems2013/section4/Сухорукова_Эпов_Никитенко.pdf.

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

25. Петров А.М., **Сухорукова К.В.**, Нечаев О.В. Геоэлектрическая модель отложений баженовской свиты по данным бокового и электромагнитного каротажных зондирований // EAGE/SPE Workshop on Shale Science, Session: Prospecting technologies (Moscow, 10–11 April 2017). 2017. Paper M12. 5 p. DOI: 10.3997/2214-4609.201700181. URL: <http://earthdoc.eage.org>.

26. **Сухорукова К.В.**, Никитенко М.Н., Нечаев О.В., Суродина И.В. Особенности количественной интерпретации данных электрического и электромагнитного каротажа // Четвертая научно-практ. конф. "Проблемы нефтегазового комплекса Западной Сибири и пути повышения его эффективности": сб. докл. Тюмень: Тюменский дом печати, 2017. С. 111–120.

Технический редактор Т.С. Курганова

Подписано в печать 11.01.2018

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

Печ.л. 2,0. Тираж 130. Зак. № 163

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