

На правах рукописи



НИКИТЕНКО Марина Николаевна

**ОПЕРАТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ
В СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА**

1.6.9 – Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

НОВОСИБИРСК
2021

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

Официальные оппоненты:

Дашевский Юлий Александрович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры геофизики геолого-геофизического факультета ФГБОУ ВО «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»;

Мартышко Петр Сергеевич, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией математической геофизики ФГБУН Института геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН;

Персова Марина Геннадьевна, доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики, зав. лабораторией моделирования и обработки данных наукоемких технологий ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет».

Ведущая организация:

ФГБУН **Институт вычислительной математики и математической геофизики** Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск).

Защита состоится «10» февраля 2022 г. в 10 час. на заседании диссертационного совета 24.1.087.02, созданного на базе ИНГГ СО РАН, в конференц-зале.

Отзывы в двух экземплярах, оформленные в соответствии с требованиями Минобрнауки России, просим направлять по адресу:

630090, г. Новосибирск, просп. Ак. Коптюга, д. 3,
факс: (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/theses/d003-068-03/nikitenko2021>.

Автореферат разослан «03» декабря 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.1.087.02
д.г.-м.н., доцент
8(383)3331639



Неведрова
Нина Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования – сигналы электромагнитных каротажных зондирований, методы оценки геоэлектрических параметров для определения возможностей современных высокоразрешающих методов исследования скважин и развития способов оперативной обработки и интерпретации данных.

Актуальность

Одной из важных задач промышленной геофизики является создание новых методов исследования околоскважинного пространства, обладающих высоким пространственным разрешением и применяемых для решения широкого круга геолого-геофизических задач, в первую очередь для изучения новых типов залежей углеводородов. Геоэлектрические модели этих объектов характеризуются полным набором электрофизических параметров в широком диапазоне значений, включая электрическую анизотропию и частотную дисперсию комплексной удельной электропроводности.

Обоснование новых высокоразрешающих методов каротажа сопровождается разработкой высокоэффективного программно-алгоритмического обеспечения и является определяющим условием развития электромагнитных методов исследования скважин для решения усложняющихся практических задач и ключевым элементом при импортозаменении.

Создание аппарата оперативного моделирования и инверсии данных современных каротажных комплексов, основанного на решениях быстрых прямых задач электромагнитного каротажа в классе слоистых интерпретационных моделей, необходимо для продвижения отечественных комплексов и их широкого применения при исследованиях в нефтегазовых скважинах. Все больший объем исследований выполняется в наклонно-горизонтальных скважинах, в том числе при каротаже в процессе бурения. Если традиционная инверсия диаграмм в пластах-коллекторах проводится в рамках радиально-неоднородной модели среды (иногда с учетом вмещающих пород), то для наклонного бурения модель выбирается пространственно-неоднородной и алгоритмы инверсии на интервалах скважин становятся принципиально другими: учитывают медленное изменение свойств среды по латерали, возможное присутствие сбросов и выклинивание пластов, специфику поведения диаграмм при переходе через границы и другие. Эффективное применение каротажных приборов при решении конкретных геологических задач, включая геонавигацию, основано на использовании численной инверсии данных и оценки погрешности определения модельных параметров, таких как электрофизические характеристики пластов, положение геоэлектрических границ, наклон скважины относительно границ.

Важным и перспективным направлением исследований является развитие и создание новых способов инверсии и комплексирования данных различных каротажных методов для извлечения дополнительной информации об изучаемой геологической среде. Так, применение каротажа в процессе бурения методом переходных процессов обладает определенными преимуществами по сравнению с частотными зондированиями. Исследования по созданию новых способов обработки и интерпретации данных этого метода могут способствовать его внедрению и широкому практическому применению. Комплексирование данных каротажных методов в рамках единых моделей позволяет без проведения дополнительных измерений значительно уточнить геоэлектрическое строение и петрофизические характеристики околоскважинного пространства.

Таким образом, создание новых методов исследования в нефтегазовых скважинах, развитие инверсионных процедур и разработка высокопроизводительного программно-алгоритмического обеспечения электромагнитного каротажа является актуальной научной проблемой, решение которой имеет важное практическое значение для развития промысловой геофизики.

Цель исследования – повышение точности результатов и оперативности интерпретации, эффективности применения и разрешающей способности электромагнитных каротажных зондирований путем создания алгоритмов и программ быстрого моделирования и инверсии данных многокатушечных, многочастотных, многокомпонентных зондов электромагнитного каротажа на основе численно-аналитических решений прямых и обратных задач электродинамики.

Научные задачи:

1. Разработать и программно реализовать алгоритмы моделирования сигналов от тороидальных и соленоидальных катушек с учетом эксцентриситета в электрически анизотропных слоистых средах с частотной дисперсией электропроводности для обоснования конфигурации новых зондирующих каротажных систем.

2. Обосновать эффективность применения высокочастотного индукционного каротажа в процессе бурения для решения задач геонавигации и комплекса высокочастотных электромагнитных и электрических каротажных зондирований для изучения анизотропии и частотной дисперсии петрофизических параметров на основе разработанных алгоритмов и программ численной инверсии и анализа разрешающей способности данных.

3. Развить интерпретационную базу электромагнитных зондирований путем создания новых методов инверсии и сжатия данных для прибора ка-

ротажа в процессе бурения методом переходных процессов, комплексирования данных различных методов для определения удельного электрического сопротивления и коэффициента анизотропии в прискажинной зоне и уточнения коэффициента глинистости.

Методы исследований и фактический материал

Теоретической основой новых решений являются уравнения Максвелла. Основной метод исследования – численное моделирование электромагнитного поля, возбуждаемого источниками магнитного типа, в радиально и вертикально неоднородных моделях геологических сред применительно к решению задач промысловой геофизики. Для численного решения прямых и обратных задач и реализации программно-алгоритмического обеспечения широко используются современные методы прикладной и вычислительной математики.

Решение прямых задач электромагнитного зондирования в рамках слоисто-неоднородных моделей сред выполняется с использованием метода Фурье, включает использование необходимой нормировки, предотвращающей экспоненциальный рост/затухание компонентов решения, интегрирование быстроосциллирующих слабозатухающих функций с построением путей интегрирования в комплексной плоскости.

Для построения вычислительных схем инверсии применяются процедуры нелинейной и глобальной оптимизации, при оценке разрешающей способности каротажных данных и вычислении погрешностей определения параметров модели среды анализируется информационная матрица системы наблюдений, включая сингулярное разложение с нахождением собственных значений.

Разработка программ и вычислительных алгоритмов сопровождается оценками точности численных решений и обязательным внутренним и внешним тестированием программ. Для тестирования и верификации использовались алгоритмы и программы Е.Ю. Антонова, В.С. Могилатова, И.В. Суродиной, М.И. Эпова, созданные в ИНГГ СО РАН и ИВМиМГ СО РАН, а также А.Н. Беспалова, разработанные в компании Baker Hughes. Высокая степень достоверности подтверждается сравнительным анализом результатов, полученных численными методами при использовании аналитических, численно-аналитических решений, конечно-разностных и конечно-элементных аппроксимаций как самим соискателем, так и другими исследователями.

Фактическим материалом для опробования алгоритмов и программ моделирования и инверсии являются синтетические и практические данные электромагнитного и электрического каротажа скважин Широкого Приобья Западной Сибири, полученные методами высокочастотных элек-

ромагнитных каротажных зондирований ВИКИЗ и ВЭМКЗ, методом высокочастотного каротажа в процессе бурения ВИКПБ, бокового каротажного зондирования БКЗ, а также методом зондирования тороидальными катушками ZET. Указанные методы каротажа разработаны в ИНГТ СО РАН и реализованы в Научно-производственном предприятии геофизической аппаратуры «Луч» (г. Новосибирск) в сертифицированных аппаратурных комплексах, широко применяемых при изучении геологических разрезов нефтяных и газовых скважин. Используются также скважинные данные приборов компании Baker Hughes: аппаратуры высокоразрешающего индукционного каротажа HDIL, трехмерного индукционного каротажа 3DeX, бокового микрокаротажа Micro-Laterolog и гамма-каротажа Gamma Ray.

Защищаемые научные результаты

1. Решения прямых задач и высокоэффективные вычислительные алгоритмы для кругового магнитного тока и смещенного с оси скважины магнитного диполя в вертикально- и радиально-неоднородных средах, обоснование конфигурации новых зондирующих систем для изучения анизотропных и дисперсионных свойств геологической среды на основе полномасштабного моделирования электромагнитных сигналов.

2. Программный комплекс оперативного численного моделирования, инверсии и анализа разрешающей способности электромагнитных и электрических методов каротажа на основе численно-аналитических решений прямых и обратных задач в рамках слоисто-неоднородных моделей для анализа измеряемых сигналов, определения геоэлектрических параметров и оценки погрешностей их определения.

3. Обоснование эффективности применения прибора ВИКПБ для оценки удельного электрического сопротивления и положения границ пласта-коллектора с выявлением интервалов тонкой слоистости, а также комплекса данных ВЭМКЗ и БКЗ для определения коэффициента электрической анизотропии и частотно-зависимой диэлектрической проницаемости на основе результатов численной инверсии и анализа чувствительности сигналов к модельным параметрам.

4. Методы определения углов наклона и азимута пластов, оперативной инверсии и сжатия данных метода переходных процессов в процессе бурения на основе фокусировки сигналов во временной области, трансформации в частотную область, аппроксимации и представления в виде комбинации базисных функций для повышения эффективности геонавигации.

5. Метод определения удельного электрического сопротивления и коэффициента электрической анизотропии в зоне проникновения фильтрата бурового раствора в пласт и коррекции значения коэффициента глинистости на основе комплексирования данных многочастотных, многозондовых

и многокомпонентных измерений, электрического имиджера и гамма-каротажа для повышения достоверности результатов петрофизической интерпретации и точности оценок коэффициентов водонасыщения и проницаемости с использованием данных гамма-гамма плотностного, ядерно-магнитного и повторных измерений электромагнитного каротажа.

Научная новизна

1. Построены решения прямых задач электродинамики для кругового магнитного тока в радиально и вертикально неоднородных средах и для смещенного с оси скважины магнитного диполя в радиально неоднородной среде с использованием метода разделения переменных для уравнений Максвелла и выделения нормального поля. На их основе разработаны базовые алгоритмы численного моделирования сигналов зонда с тороидальными катушками и диэлектрического зонда для изучения анизотропных и дисперсионных свойств сложнопостроенных коллекторов.

2. Достигнута высокая точность и быстрдействие реализованных вычислительных алгоритмов путем представления решения в виде, сокращающем число вычислительных операций, использования необходимой нормировки, предотвращающей экспоненциальный рост/затухание компонентов решения, применения схем эффективного интегрирования быстро осциллирующих слабозатухающих функций и суммирования медленно сходящихся рядов Фурье.

3. По результатам выполненного полномасштабного моделирования электромагнитных сигналов выбрана оптимальная конфигурация зонда с тороидальными катушками, характеризующегося компактной системой «возбуждения-измерения», низкими операционными частотами и двумя режимами работы, для определения удельного электрического сопротивления, коэффициента электрической анизотропии и границ пластов, пересекаемых скважиной. Определены конструктивные параметры высокочастотной зондирующей установки для выявления эффекта частотной дисперсии комплексной удельной электропроводности.

4. Разработан программный комплекс оперативного численного моделирования электромагнитных сигналов для новых зондов с тороидальными катушками и диэлектрического и для известных электромагнитных и электрических методов исследования скважин на основе решений прямых задач в рамках радиально и вертикально неоднородных моделей среды для анализа измеряемых сигналов и быстрой инверсии данных.

5. На основе оптимизационных методов и анализа информационной матрицы системы наблюдения разработаны алгоритмы оперативной численной инверсии и анализа разрешающей способности данных электромагнитных и электрических зондирований для обоснования возможностей и установления ограничений их применения к изучению геологической

среды с оценкой и прогнозированием электрофизических параметров пластов-коллекторов.

6. Показано, что инверсия комплекса данных электромагнитных и электрических каротажных зондирований ВЭМКЗ и БКЗ позволяет с высокой степенью достоверности определять коэффициент электрической анизотропии, а инверсия относительных амплитуд и разностей фаз зондов ВЭМКЗ – диэлектрическую проницаемость пластов, в том числе частотно-зависимую, для изучения сложнопостроенных геологических разрезов, вскрытых вертикальными и наклонно-горизонтальными скважинами.

7. По результатам численной инверсии и анализа пространственного разрешения ВИКПБ показано, что измеряемые сигналы обладают высокой чувствительностью к удельному электрическому сопротивлению и коэффициенту электрической анизотропии продуктивной части пласта, а также к положению его кровли и подошвы, точность определения которых значительно повышается при использовании априорной информации, получаемой на разных этапах строительства скважины.

8. Разработан программный комплекс оперативной численной инверсии и анализа разрешающей способности электромагнитных и электрических методов исследования скважин, реализованных в современных аппаратных комплексах для каротажа на кабеле, бурильных трубах и в процессе бурения, на основе численно-аналитических решений прямых и обратных задач в рамках радиально- и вертикально-неоднородных моделей для определения геоэлектрических параметров и оценки их погрешностей при исследовании геологических разрезов скважин в реальном времени.

9. Разработан метод фокусировки во временной области для определения углов наклона и азимута пластов по данным каротажа в процессе бурения методом переходных процессов, основанный на разложении измеренных сигналов во временной ряд и диагонализации матрицы сфокусированных компонент магнитного поля, для повышения эффективности геонавигации: сокращения ресурсоемкости инверсии данных и уменьшения модельной эквивалентности.

10. Разработан метод оперативной инверсии данных каротажа методом переходных процессов на основе трансформации измеренных сигналов из временной области в частотную с применением к последним быстрого алгоритма решения обратной задачи в частотной области с целью определения сопротивлений пластов, пересекаемых скважиной в процессе бурения, и расстояний до их границ в масштабе реального времени.

11. Разработаны методы сжатия данных каротажа методом переходных процессов, основанные на сплайн-аппроксимации сигналов и констру-

ировании ортогонального базиса в пространстве измерений с последующим описанием сигналов линейной комбинацией базисных векторов, обеспечивающие передачу большого объема данных в процессе бурения.

12. Разработан метод и программное обеспечение для коррекции коэффициента глинистости, а также определения удельного электрического сопротивления и коэффициента электрической анизотропии в прискважинной зоне на основе совместной интерпретации данных приборов HDIL, 3DeX, Micro-Log/Imaging и Gamma Ray для улучшения оценки насыщения с использованием данных приборов NMR и Nuclear и для определения проницаемости при интерпретации повторных измерений электромагнитного каротажа.

Личный вклад

Решены прямые задачи электродинамики для кругового магнитного тока и для смещенного с оси скважины магнитного диполя, разработаны высокоэффективные алгоритмы численного моделирования сигналов каротажных зондов. Создан программный комплекс оперативного моделирования, инверсии и анализа разрешающей способности каротажных данных. Обоснована конфигурация новых зондов с тороидальными катушками и диэлектрического. Показана эффективность применения каротажных комплексов ВЭМКЗ, БКЗ и ВИКПБ для определения геоэлектрических параметров среды. Разработаны методы определения углов наклона и азимута пластов, оперативной инверсии и сжатия данных для каротажа в процессе бурения методом переходных процессов. Разработан метод и программное обеспечение для коррекции коэффициента глинистости и определения электросопротивления и анизотропии в прискважинной зоне. Соискатель принимал решающее участие в постановке задач, разработке методических подходов к их решению, получении оригинальных результатов и их анализе, обсуждении и подготовке большей части публикаций по теме диссертации.

Теоретическая и практическая значимость

Обоснование новых методов исследования скважин, таких как зондирование с использованием тороидальных катушек, диэлектрический каротаж в широком частотном диапазоне, разработка программно-алгоритмического обеспечения для масштабного моделирования сигналов является составной частью развития электромагнитных методов исследования скважин с целью определения электрической макроанизотропии горных пород, оценки коэффициента водонасыщения и удельного электрического сопротивления пластовой воды из частотного спектра комплексной проводимости. Создание аппарата оперативного моделирования и инверсии данных

современных каротажных методов ВИКИЗ, ВЭМКЗ, БКЗ и ВИКПБ, реализованных в аппаратурно-программных комплексах СКЛ, серийно выпускаемых НПП ГА «Луч», способствует продвижению этих комплексов при исследованиях в наклонно-горизонтальных скважинах, в том числе в каротаже в процессе бурения, обоснованию их использования при решении конкретных практических задач, таких как оценка удельного электрического сопротивления пластов и определение геоэлектрических границ, в частности, в геонавигации. Алгоритмы инверсии учитывают специфику поведения сигналов в наклонных скважинах, а также свойства среды и позволяют надежно восстанавливать ее модель вдоль траектории скважины.

Созданные программы прямого моделирования сигналов индукционного каротажа в радиально-слоистой среде и вычисления кажущегося удельного электрического сопротивления и относительной диэлектрической проницаемости внедрены в автоматизированные системы численной инверсии МФС ВИКИЗ и EMF Pro, разработанные в ИНГГ СО РАН, и используются при интерпретации данных высокочастотного электромагнитного каротажа. Программный блок оценки разрешающей способности системы наблюдений и вычисления погрешностей результатов инверсии внедрен в программный комплекс для интерпретации многокомпонентных данных каротажа в процессе бурения MCWD и производственную систему Reservoir Navigation Service, применяемую в компании Baker Hughes GE при проводке горизонтальных скважин.

Развитие и создание новых методов инверсии посвящены новому способу исследования скважин методом переходных процессов и являются оригинальными разработками. Предложены решения для определения истинного наклона и азимута пласта, быстрой инверсии, а также сжатия данных, передающихся на поверхность. Комплексование данных многочастотных, многозондовых и многокомпонентных измерений, электрического имиджера и гамма-каротажа позволяет получить дополнительную информацию о среде, окружающей скважину, а именно определить коэффициент электрической макроанизотропии в зоне проникновения бурового раствора в пласт с целью уточнения коэффициентов проницаемости и глинистости.

Апробация работы и публикации

Основные научные результаты и положения диссертационной работы докладывались и получили одобрение научной общественности *на международных конференциях и симпозиумах*: Международной конференции и выставке по геофизическим исследованиям скважин «Москва-98», (Москва, 1998), Международных научных конгрессах «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (Новосибирск, 2008; 2015; 2016), 51-м Международном ежегодном каротажном симпозиуме SPWLA (Австралия, Перт, 2010). 12-й, 18-й и

19-й научно-практических конференциях EAGE по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа «Геомодель» (Россия, Геленджик, 2010; 2016; 2017), 6-й, 7-й, 8-й Международных конференциях и выставках EAGE «Санкт-Петербург» (Санкт-Петербург, 2014; 2016; 2018), 58-й, 77-й, 78-й Международных конференциях и выставках EAGE (Нидерланды, Амстердам, 1996; Испания, Мадрид, 2015; Австрия, Вена, 2016), Международной конференции «Математические и информационные технологии» MIT-2016 (Сербия, Врнячка Баня, 2016), **на всероссийских конференциях**: научно-практической конференции «Пути повышения эффективности геологической интерпретации геофизических исследований скважин при разведке, эксплуатации и подсчете запасов месторождений нефти и газа Западной Сибири» (Тюмень, 1997), нефтегазовой технической конференции и выставке SPE (Москва, 2012; 2016; 2017).

По теме диссертации опубликовано более 80-ти научных работ, из них 18 статей в ведущих рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, 9 статей и материалов в зарубежных и других рецензируемых научных изданиях, 5 российских и зарубежных патентов, зарегистрированы 3 программы для ЭВМ.

Работа выполнена в лаборатории многомасштабной геофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук. Научные исследования проводились в соответствии с Планами научно-исследовательских работ ИНГГ СО РАН по проектам Программ фундаментальных исследований СО РАН: на 2001-2003 гг. (проект № 5.1.5, гос. рег. № 01.2001.01571), на 2004-2006 гг. (проект № 28.7.2, гос. рег. № 01.2004.07248), на 2007-2009 гг. (проект № 7.3.1.1, гос. рег. № 01.2007.05133), на 2010-2012 гг. (проект № VII.56.1.1, гос. рег. № 01.2010.01256), на 2013-2016 гг. (проект № VIII.70.3.2, гос. рег. № 01.2013.51719), на 2017-2020 гг. (проект № IX.128.3.1, № 0331-2016-0034 в ИСГЗ ФАНО). Научные исследования также поддерживались проектами Программ фундаментальных исследований Президиума РАН № 27.7 и Отделения наук о Земле РАН № ОНЗ-1.4, государственными контрактами № 02.515.11.5055 и 16.740.11.0358 в рамках реализации Федеральной целевой программы.

Благодарности

Успешному проведению научных исследований на всех этапах способствовали доброжелательное отношение и поддержка сотрудников лабораторий многомасштабной геофизики, электромагнитных полей и геоэлектрики ИНГГ СО РАН и Научно-технологического центра Baker Hughes GE. Автор благодарен своим коллегам Ю.Н. Антонову, Ю.А. Дашевскому, Г.Б. Ицковичу, С.В. Мартакову, И.В. Михайлову, В.С. Могилатову, А.П.

Мосину, К.В. Сухоруковой, М.Б. Рабиновичу, М.В. Свиридову, И.В. Суродиной, Л.А. Табаровскому за содержательные обсуждения и научные консультации. Отдельная благодарность зав. лабораторией многомасштабной геофизики, д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН Вячеславу Николаевичу Глинских за предметное обсуждение содержания диссертации и дружескую поддержку.

Автор благодарен экспертам М.И. Эпову, Е.Ю. Антонову, И.Н. Ельцову, В.Н. Глинских и К.В. Сухоруковой, ознакомившимся с диссертационной работой, за анализ, критические замечания и ценные советы, а также Н.Н. Неведровой за методические рекомендации и консультации по оформлению диссертационных материалов.

Автор глубоко признателен академику РАН, д.т.н., профессору Михаилу Ивановичу Эпову за неоценимую помощь и всестороннюю поддержку на протяжении многих лет совместной работы. Во многом благодаря его авторитету и постоянному вниманию к научной жизни соискателя была написана данная работа.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем – 340 страниц, 124 рисунка, 26 таблиц. Библиографический список содержит 305 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Изученность решения проблемы

Электрические и электромагнитные методы исследования скважин занимают важное место среди геофизических каротажных методов изучения горных пород в поисковых, разведочных и эксплуатационных скважинах. В работе рассматриваются вопросы моделирования, анализа разрешающей способности и интерпретации сигналов высокочастотных электромагнитных каротажных зондирований (методы ВИКИЗ, ВЭМКЗ, ВИКПБ), нового электромагнитного зонда высокого разрешения с тороидальными катушками, диэлектрического зонда, а также зондирований методом переходных процессов. Метод ВИКИЗ широко используется для определения электрофизических параметров горных пород в околоскважинном пространстве. Д.С. Даев и С.Б. Денисов детально изучили поведение высокочастотного электромагнитного поля и принципы измерения относительных амплитудно-фазовых характеристик. Обоснование использования ВИКИЗ при поисках нефти и газа, детально выполнено Ю.Н. Антоновым и С.С. Жмаевым. Под руководством М.И. Эпова развивались теоретическая, аппаратурная и методическая составляющие ВИКИЗ. В настоящее время метод реализован в аппаратуре СКЛ, применяемой для изучения как вертикальных, так и наклонно-горизонтальных скважин.

При разработке месторождений нефти повсеместно используется наклонно-направленное бурение скважин. Геонавигация скважинной траектории осуществляется по данным каротажа в процессе бурения. За последние полтора десятилетия опубликовано большое число зарубежных работ, посвященных теории, разработке аппаратуры и методам интерпретации данных. Детальный обзор современного состояния в области геонавигации горизонтальных скважин приведен в работах С.М. Аксельрода. В настоящее время наиболее развитым отечественным комплексом для каротажа в процессе бурения является аппаратура ВИКПБ, разработанная в ИНГГ СО РАН и НПП ГА «Луч» (г. Новосибирск).

В последнее десятилетие существенно расширился круг задач промысловой геофизики, что обусловлено, в первую очередь, вовлечением в разработку глубокопогруженных залежей углеводородов сложного геологического строения. Большое внимание уделяется изучению анизотропии, которая сильно проявляется в осадочных горных породах. Одним из новых подходов для ее определения является применение индукционного источника в виде тороидальной катушки. Вопросы применения в каротаже зондов с тороидальными катушками подробно рассмотрены в работах J. Arps, F. Redwine, S. Gianzero, M. Bittar, R. Moore, J. Wait, B.C. Могилатова. А. Д. Каринского. Диэлектрическая проницаемость горных пород в значительной мере определяется их коллекторскими свойствами, степенью насыщения флюидами и вещественным составом. При исследовании пространственного распределения диэлектрической проницаемости используется диэлектрический каротаж. Вопросы моделирования и интерпретации данных, механизмы зависимости диэлектрических свойств горных пород от электромагнитного поля изучены в работах С.М. Аксельрода, Д.С. Даева, А.А. Кауфмана, Ю.Н. Антонова, Л.А. Табаровского, Ю.Л. Брылкина, Л.И. Дубмана. С.Б. Денисова, В.Н. Доровского, Р. Сох, М. Hizem, N. Seleznev, T. Nabashy, C. Torres-Verdín.

Несмотря на расширение модельной базы современного электромагнитного каротажа, вовлечение в интерпретацию двух- и трехмерных задач, решения прямых задач численно-аналитическими методами, применяемыми для ключевых слоисто-однородных моделей, остаются важным инструментом при исследовании возможностей методов электромагнитного каротажа (ЭМК), а также при создании средств оперативной инверсии данных. Методы решения таких задач создавались и развивались А.Н. Тихоновым, В.И. Никитиной, А.А. Кауфманом, В.И. Дмитриевым, В.Р. Бурсианом, Г.М. Морозовой, Л.А. Табаровским, М.И. Эповым, Ю.А. Дашевским, В.С. Могилатовым, Б.С. Световым, В. Anderson, R. Hardman. Как известно, обратная задача состоит в определении геоэлектрических параметров среды по измеренным сигналам ЭМК. Г.Н. Зверев, В.В. Гамбургер, Н.Н.

Сохранов, С.М. Аксельрод Е.В. Чаадаев, В.В. Вержбицкий, П. С. Мартышко, В.А. Девидин, Л.Е. Кнеллер, А.П. Потапов изучали возможность определения удельного электрического сопротивления (УЭС) и границ пластов, выделения коллекторов. И.Н. Ельцов, М.И. Эпов, С.И. Кабанихин, К.В. Сухорукова, О.В. Нечаев, В.Н. Глинских, М.С. Жданов, М.Г. Персова, M. Commer, T. Wang, Z. Zhang рассматривали вопросы регуляризации и параметризации, необходимой модификации оптимизационных методов, снижения вычислительных затрат, выбора априорной модели, методики интерпретации. Дальнейшее развитие процедур инверсии данных ЭМК во многом зависит от оперативности численного моделирования измеряемых характеристик. Возрастающая сложность приборов ЭМК, использование многочастотных, многозондовых и многокомпонентных измерений повышает значимость применения инструмента анализа разрешающей способности электромагнитных методов. Цель анализа чувствительности системы измерений к параметрам инверсионной модели состоит в оценке неопределенности в параметрах модели и в объективном выборе оптимальной конфигурации зондирующей системы для решения конкретной геолого-геофизической задачи. Различные методы оценки чувствительности и разрешающей способности изучены А.А. Кауфманом, И.Н. Ельцовым, М.И. Эповым, В.Н. Глинских, Л.А. Табаровским, Т. Яновской, Л. Пороховой, Н. Meyer, Т. Barber, М. Rabinovich. Создание обоснованной процедуры оценки разрешающей способности измерений по отношению к определяемым параметрам модели среды является важной составной частью разработки интерпретационной базы современных приборов ЭМК.

Важным и интересным направлением исследований является создание новых методов инверсии для извлечения дополнительных знаний об изучаемой геологической среде. Многие исследователи, в числе которых А.А. Кауфман, В.П. Соколов, М.И. Плюснин, Е.В. Онегова, М.И. Эпов, Г.М. Морозова, Е.Ю. Антонов, П.И. Дворецкий, В.С. Могилатов, А.Н. Ратушняк, В.К. Теплухин, В.А. Сидоров, В. Anderson, А. Bespalov, М. Rabinovich, L. Tabarovsky, G. Itskovich, S. Dutta, E. Banning, T. Hagivara, M. Hamdan, K. Hsu, Q. Li, J. Lowell изучали поведение нестационарного электромагнитного поля в базовых и сложных моделях сред, применение метода переходных процессов (МПП) для задач геонавигации и оценки УЭС пластов, для мониторинга резервуаров и в дефектоскопии. Одна из задач, рассмотренная в работе, связана с инверсией и сжатием данных каротажа скважин в процессе бурения МПП.

Отдельной темой в разработке новых методов интерпретации можно выделить комплексирование данных различных каротажных методов для получения новой информации о геологической среде и повышения точно-

сти определения параметров модели. В работе представлен способ определения УЭС и коэффициента анизотропии в прискважинной зоне и уточнения коэффициента глинистости на основе совместной интерпретации данных многочастотных, многозондовых и многокомпонентных измерений. Для данных высокоразрешающего индукционного каротажа HDIL Н. Meyer, D. Beard, L. Tabarovsky, M. Rabinovich, J. Xiao, D. Beard, B. Corley, I. Geldmacher предложили методику определения УЭС на различных расстояниях от скважины, а для прибора многокомпонентных измерений 3DEX – определения анизотропии УЭС. Комбинируя данные указанных методов с привлечением результатов измерений электрического имиджера и гамма-каротажа, возможно детально восстанавливать горизонтальное и вертикальное УЭС в зоне проникновения. Эти электрофизические параметры востребованы при петрофизической интерпретации с использованием данных гамма-гамма плотностного и ядерно-магнитного каротажа, поскольку вычислены на глубинах, соответствующих радиусу исследования упомянутых приборов. Кроме того, корректное радиальное распределение УЭС в зоне проникновения необходимо для повышения точности оценки коэффициента проницаемости при интерпретации повторных измерений ЭМК. Данный метод разработан И.Н. Ельцовым, М.И. Эповым, А.А. Кашеваровым, Г.В. Нестеровой.

Анализ существующих решений проблемы подтверждает, что с учетом достижений в теоретическом, аппаратном и методическом обеспечении ЭМК для решения современных задач промысловой геофизики необходимо создание новых методов исследования нефтегазовых скважин, развитие средств моделирования и инверсии данных, а также разработка высокопроизводительного программно-алгоритмического обеспечения ЭМК. В диссертации предложены и научно обоснованы новые методы, установлены возможности существующих каротажных комплексов для изучения анизотропных и дисперсионных свойств сложно построенных коллекторов с использованием комплекса программ оперативного численного моделирования, инверсии и анализа разрешающей способности электромагнитных и электрических методов исследования скважин. Развита интерпретационная база прибора каротажа в процессе бурения МПП, предложен способ комплексирования данных различных каротажных методов для определения УЭС и его анизотропии в прискважинной зоне и уточнения петрофизических параметров.

Глава 2. Математическое обеспечение современных технологий электромагнитного каротажа на основе численно-аналитических решений прямых задач

Использование новых систем «возбуждения-наблюдения» электромагнитного поля является перспективным направлением исследований и

предполагает развитие математического аппарата моделирования и инверсии электромагнитных откликов в различных моделях геологической среды. Выбор базовых геоэлектрических моделей среды обусловлен необходимостью создания программно-алгоритмического обеспечения для оперативного моделирования и интерпретации данных ЭМК. Оперативность моделирования основывается на аналитических представлениях решений прямых задач и применении необходимых форм представления решения, специальных схем интегрирования, суммирования при численной реализации алгоритмов. Базовые алгоритмы позволяют исследовать сигналы, их чувствительность к параметрам модели и разрешающую способность с целью обоснования применения электромагнитных каротажных методов к решению задач восстановления структуры околоскважинного пространства, а также создавать процедуры инверсии данных в реальном времени как для новых методов исследования скважин, так и для известных и широко используемых технологий.

Основными интерпретационными моделями являются радиально и вертикально неоднородные, где свойства среды изменяются в одном направлении. Радиально-неоднородные (цилиндрически-слоистые) модели используются для инверсии данных в вертикальных скважинах, если предполагается, что влиянием вмещающей пласт среды можно пренебречь. В вертикально неоднородной (горизонтально-слоистой) среде прибор расположен под углом относительно вертикали или границ пластов. Такие модели используются в наклонно-горизонтальных скважинах, если предполагается, что можно пренебречь влиянием скважины и неоднородной прискважинной зоны. Каждый слой в модели характеризуется тензором комплексной удельной электропроводности (УЭП) $\hat{\gamma} = \text{diag}\{\gamma_h, \gamma_h, \gamma_v\}$ и магнитной проницаемостью μ . Комплексная УЭП для частотных зондирований определяется выражением $\gamma = \sigma - i\omega\varepsilon$, где σ – УЭП, $\varepsilon = \varepsilon^* \cdot \varepsilon_0$ – диэлектрическая проницаемость (ДП), где ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, ε^* – относительная ДП (ОДП). Коэффициент электрической анизотропии λ определяется отношением $\lambda = \sqrt{\gamma_h / \gamma_v}$; $\rho = 1 / \gamma$ – УЭС. В зависимости от используемой системы измерений электромагнитного поля и от решаемой задачи, меняется и параметризация модели. На низких частотах, как правило, не учитывается ДП. Для немагнитных сред магнитная проницаемость полагается равной магнитной проницаемости вакуума. В изотропных пластах, где нет тонкого переслаивания, горизонтальная γ_h и вертикальная УЭП γ_v совпадают.

Методы решения прямых задач основаны на методе разделения переменных, позволяющем записать решение в аналитическом виде и допускающим простую численную реализацию. Исходными являются уравнения

Максвелла, которые дополняются условиями на границах цилиндрических или горизонтальных слоев с разными электрофизическими свойствами, где касательные к границам компоненты электромагнитного поля непрерывны. Электромагнитное поле представляется в виде суммы первичного и аномального поля. В частотной области к уравнениям Максвелла применяется интегральное преобразование, разложение в ряд по переменным, вдоль которых свойства среды не меняются, после чего они приводятся к дифференциальным уравнениям одной переменной для образов каких-либо компонент аномального электромагнитного поля с нулевой правой частью. Остальные компоненты поля выражаются через них в явном виде. Уравнения имеют решение в виде линейной комбинации основных или специальных функций с неизвестными коэффициентами. Для определения коэффициентов используются граничные условия, а также условия в нуле и на бесконечности. В граничные условия входит выражение для первичного поля, которое определяется в явном виде для заданного источника электромагнитного поля. Для перехода во временную область используется преобразование Фурье электромагнитного поля по частоте с учетом формы импульса тока.

Для новых методов исследования скважин с помощью тороидального источника и соленоидального высокочастотного источника получены решения прямых задач, реализующие указанную схему определения электромагнитного поля. Дано подробное описание алгоритма для численной реализации, позволяющего достичь высокой скорости и точности расчетов [Nikitenko, Itskovich, Seryakov, 2016], а также разработанных программ оперативного численного моделирования электромагнитных сигналов:

- 1) зонда с тороидальными катушками в цилиндрически- и горизонтально-слоистых моделях сред;
- 2) диэлектрического зонда, смещенного к стенке скважины в цилиндрически-слоистой модели.

Кроме того, разработан комплекс программ, широко использующийся для моделирования сигналов известных каротажных методов:

- 3) ИК, ВЭМКЗ, ЗDeX, HDIL в цилиндрически-слоистой модели [Байкова, ..., Никитенко и др., 2015; Баранова, ..., Никитенко и др., 2015];
- 4) ИК, ВЭМКЗ, ВИКПБ, БКЗ в горизонтально-слоистой модели;
- 5) ВЭМКЗ, ВИКПБ в трехслойной горизонтально-слоистой модели;
- 6) МПП в цилиндрически- и горизонтально-слоистой моделях.

С использованием созданной программно-алгоритмической базы получены следующие результаты.

1. Выполнено обоснование конфигурации нового электромагнитного зонда с тороидальными катушками для изучения анизотропных свойств тонкослоистых пластов-коллекторов [Эпов, Глинских, Никитенко, 2014;

Епов, Nikitenko et al., 2018; Эпов, Никитенко, Глинских, 2018; Эпов, ..., Никитенко и др., 2018]. Проведен полномасштабный анализ измеряемых сигналов, в результате которого установлено следующее:

- а) При возбуждении тороидальной катушкой на металлическом корпусе в среде возникает переменное электрическое поле, имеющее горизонтальную и вертикальную компоненты, что определяет зависимость измеряемых электромагнитных сигналов от горизонтального и вертикального УЭС пласта. Пространственное распределение вихревых токов (Рисунок 1) определяет радиальную глубинность, достаточную для определения параметров неизменной части пласта.

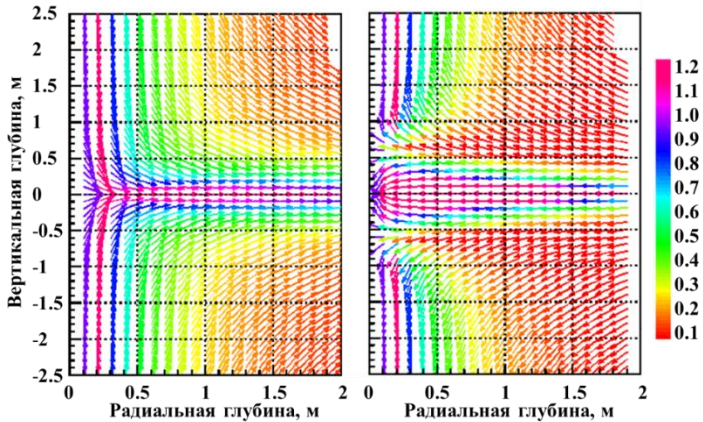


Рисунок 1 – Пространственные распределения реальной (слева) и мнимой (справа) частей плотности вихревого тока в пласте с УЭС 5 Ом·м на частоте 5 кГц для двух генераторных катушек с вертикальными координатами -0.6 и 0.6 м, работающих в суммарном режиме. Величина нормированной амплитуды тока показана цветом

- б) Зависимость измеряемых характеристик от радиуса скважины и от УЭС бурового раствора в диапазоне значений $0.1-2$ Ом·м – слабая, что является преимуществом при создании алгоритмов инверсии данных.
- в) Реальные и мнимые части плотности тока на корпусе прибора и э.д.с. в приемных катушках являются независимыми измерениями и однозначно связаны с УЭС пласта. Сигналы характеризуются высоким уровнем и динамическим диапазоном. Преобладает частотное зондирование, а геометрическое возможно в проводящих средах.
- г) Диаграммы измеряемых сигналов показывают высокое вертикальное разрешение и воспроизводят пересечение скважиной пластов от 0.2 м.

Многообразие поведения электромагнитных сигналов в областях геоэлектрических границ позволяет строить трансформанты, по которым наиболее достоверно выявляются границы пластов.

Определена оптимальная конфигурация компактного электромагнитного зонда с длинами от 0.2 до 1.2 м в частотном диапазоне 5 – 500 кГц и двумя режимами работы: суммарным и дифференциальным, позволяющая определять УЭС и параметр анизотропии пластов и устанавливать границы пластов, пересекаемых скважиной.

2. Выполнено обоснование параметров диэлектрического зонда для изучения пространственного распределения ОДП горных пород с определением ее частотной дисперсии для оценки характера насыщения пород-коллекторов и изучения глинистых отложений. Проведено масштабное моделирование и сравнительный анализ амплитудно-фазовых характеристик высокочастотного электромагнитного поля [Глинских, Никитенко, 2018]. Установлена их устойчивая зависимость от частотного спектра электрофизических параметров в широком диапазоне частот от 20 до 500 МГц с длинами зондов от 0.08 до 0.8 м (Рисунок 2). Показано, что на измеряемые электромагнитные сигналы значительно влияние оказывает и УЭС, и ОДП, что разность фаз и затухание амплитуд демонстрируют качественно разное поведение, являясь независимыми измерениями, что позволит создать алгоритмы устойчивой инверсии данных диэлектрического зонда.

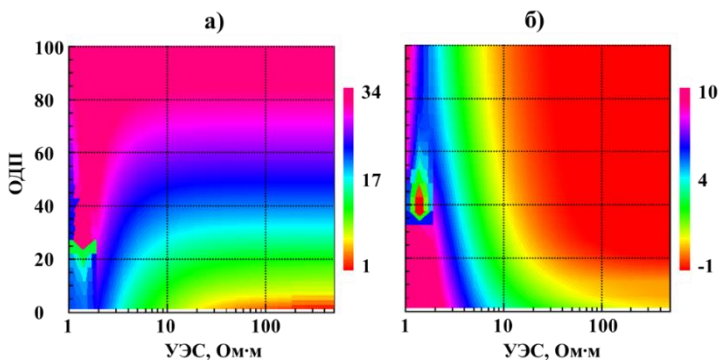


Рисунок 2 – Разность фаз (а) и затухание амплитуд (б) в зависимости от УЭС и ОДП пласта. Зонд 0.5 м, частота 100 МГц

Глава 3. Разрешающая способность и численная инверсия данных электрокаротажных зондирований

С помощью разработанных алгоритмов и программ оперативной количественной инверсии и анализа разрешающей способности данных ЭМК

обоснованы возможности современных методов исследования скважин для оценки электрофизических характеристик пластов-коллекторов [Эпов, ..., Никитенко, 1998; Никитенко, Шлык, 2005; Эпов, Сухорукова, Никитенко, 2006; Сухорукова, Петров, Никитенко, 2007; Ельцов, Никитенко, Терентьев, 2013; Sviridov, ..., Nikitenko et al., 2014; Каюров, ..., Никитенко и др., 2015; Копытов, Сухорукова, Никитенко, 2018]. Для изучения пространственного разрешения данных используются логарифмические производные сигналов по параметрам модели и их трансформации, а также построение области неопределенности в пространстве параметров, соответствующей области неопределенности в пространстве измерений [Онегова, Никитенко и др., 2010; Nardi, ..., Nikitenko et al., 2010]. Последняя обусловлена как ошибками измерения, так и модельным несоответствием при проведении инверсии данных. Численная инверсия данных представляет собой минимизацию среднеквадратического отклонения измеренных данных от синтетических путем изменения модельных параметров по заданному алгоритму. Процедура инверсии позволяет использовать произвольные комбинации сигналов из полного набора измерений. В инверсионной модели параметры можно фиксировать или задавать для них ограничения. При интерпретации данных в наклонно-горизонтальной скважине, это дает возможность учитывать информацию о пройденном интервале. Оперативность процедур инверсии достигается за счет использования быстрых процедур моделирования данных, рассмотренных и приведенных в главе 2. Помимо быстрых одномерных прямых задач алгоритм инверсии применен и для двумерных задач ВЭМКЗ и БКЗ и показывает приемлемую для практики эффективность [Nikitenko et al., 2015; Nikitenko et al., 2016; Михайлов, ..., Никитенко и др., 2017].

Разработан комплекс программ, включающий следующие численные алгоритмы инверсии и анализа разрешающей способности:

- 1) определение кажущихся значений УЭС и ОДП по данным высокочастотного ЭМК (ВИКИЗ, ВЭМКЗ);
- 2) численная инверсия и анализ чувствительности комплекса данных электрометрии в наклонно-горизонтальных скважинах (ВИКИЗ, ВЭМКЗ и/или БКЗ) [Никитенко, Глинских, Сухорукова, 2016];
- 3) численная инверсия и анализ чувствительности данных ЭМК в процессе бурения (ВИКПБ);
- 4) численная инверсия данных ЭМК в вертикальных скважинах (ИК, ВИКИЗ, ВЭМКЗ)
- 5) анализ разрешающей способности данных ЭМК в процессе бурения (AziRtak, DeepTrak).

С использованием созданной программно-алгоритмической базы получены следующие результаты.

1. Измеряемые высокочастотными зондами ВИКИЗ и ВЭМКЗ относительные амплитуды являются независимыми измерениями, позволяющими более точно оценивать УЭС зоны проникновения и пласта. Использование амплитуд наряду с разностями фаз в интерпретационных схемах позволяет извлекать новую информацию, а именно: определять ДП пластов и таким образом дифференцировать пласты, имеющие примерно одинаковое сопротивление, по ДП. Оценивать ДП пласта следует по кажущимся значениям с использованием однородной или двухслойной («скважина-пласт») цилиндрически-слоистой модели среды [Никитенко, Эпов, 2008]. В горных породах, где проявляется частотная дисперсия УЭС и ДП, необходимо и возможно оценивать данные параметры отдельно на каждой частоте. В этом случае интерпретационная модель является двухслойной с известными параметрами скважины. На рисунке 3 приведена построенная с помощью инверсии частотно зависимая электрофизическая модель отложений баженовской свиты, вскрытых одной из скважин на Восточно-Сургутском месторождении. Анализ разрешающей способности показывает, что погрешности определения ОДП сильно возрастают при уменьшении частоты. Для 14 МГц они составляют 10 – 20 % вдоль профиля, а для 875 кГц – от 45 до 90 %. Поэтому частотную дисперсию необходимо изучать с применением более высоких частот (Глава 2).

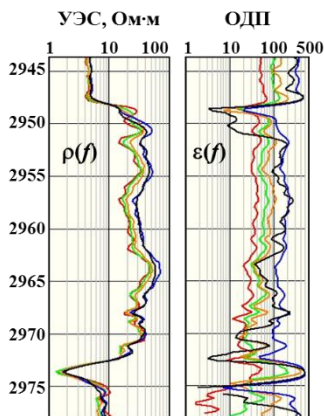


Рисунок 3 – Результаты интерпретации данных ВИКИЗ в интервале отложений баженовской свиты (Восточно-Сургутское месторождение)

2. Совместное использование данных сигналов ВЭМКЗ и БКЗ в силу независимости их поведения вблизи геоэлектрических границ позволяет определять параметры макроанизотропной среды, пересекаемой наклон-

ной скважиной, причем комплексный подход к изучению сложнопостроенных геологических сред, вскрытых наклонно-горизонтальными скважинами значительно повышает достоверность результатов интерпретации, особенно при определении коэффициента анизотропии УЭС [Эпов, Никитенко и др., 2016а; Никитенко и др., 2016]. На рисунке 4 приведен пример численной инверсии данных ВЭМКЗ и БКЗ, полученных в наклонно-горизонтальной скважине Быстринской площади.

В результате инверсии установлено строение и УЭС коллекторов, пересекаемых скважиной. Верхний коллектор с повышенным содержанием нефти имеет УЭС 14 Ом·м и мощность 6 м (43–57 м). Нижний коллектор с УЭС 22–35 Ом·м мощностью 8 м (69–104 м) также является нефтенасыщенным и разделен на две части глинистой перемычкой.

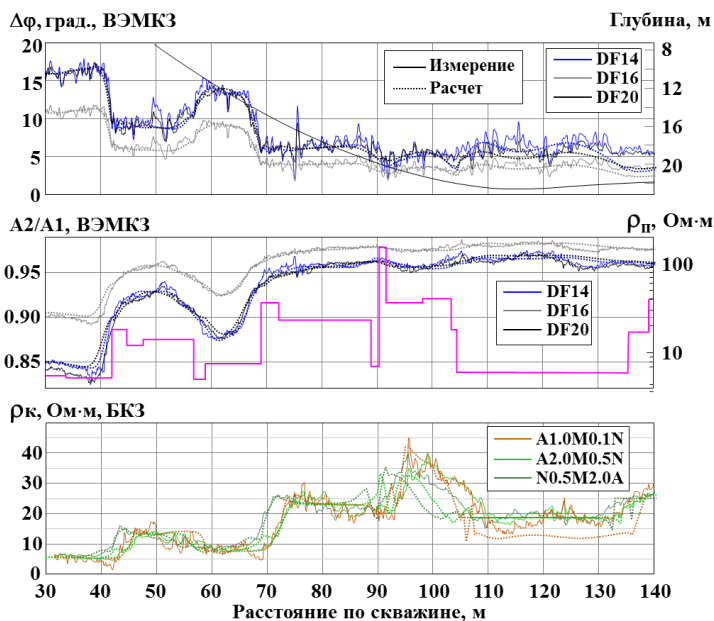


Рисунок 4 – Результат численной интерпретации: измеренные и синтетические значения разности фаз (вверху), отношения амплитуд (в середине) и кажущегося сопротивления по БКЗ (внизу). Вверху показана глубина скважины, посередине – подобранная модель распределения УЭС

3. Сигналы ВИКПБ обладают высокой чувствительностью к УЭС продуктивной части пласта, а также к положению его кровли и подошвы. Это указывает на возможность успешного применения метода и аппаратуры

ВИКПБ для решения задач геонавигации и оценки сопротивлений пластов в процессе бурения [Эпов, ..., Никитенко, 2014; Каюров, ..., Никитенко, 2014; Эпов, Никитенко и др., 2014; Nikitenko et al., 2014]. Сигналы ВИКПБ чувствительны к параметрам макроанизотропного пласта. Определение коэффициента анизотропии пласта возможно по диаграммам разности фаз при приближении к его кровле. Определяемый по данным ВИКПБ коэффициент электрической анизотропии может быть прогностическим индикатором для выявления интервалов тонкой слоистости осадочных отложений и может использоваться для снижения аварийности добычи углеводородов при бурении наклонно-горизонтальных скважин [Эпов, Никитенко и др., 2016б]. На рисунке 5 представлен результат численной инверсии данных ВИКПБ с установлением макроанизотропных свойств тонкослоистых осадочных отложений.

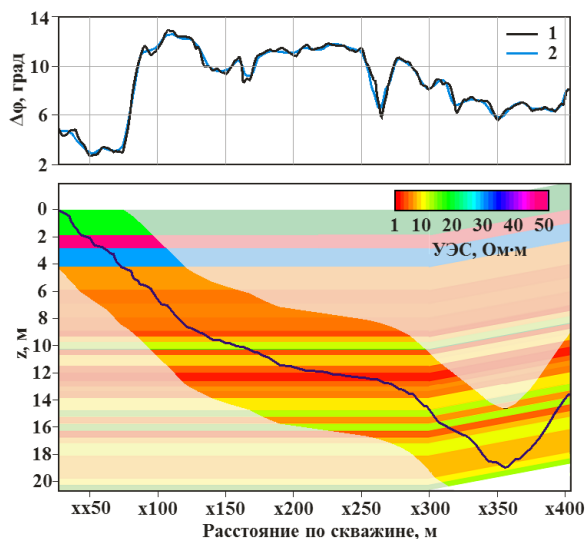


Рисунок 5 – Экспериментальные (1) и подобранные синтетические (2) диаграммы разности фаз длинного зонда в зависимости от расстояния по скважине (вверху) и геоэлектрический разрез (внизу)

Каротаж выполнялся в процессе бурения скважины в продуктивном пласте сложного строения в юрских отложениях. Последние представлены неравномерным чередованием тонкослоистых мелкозернистых заглинизированных песчаников, алевролитов, аргиллитов и известняков. Верхняя часть разреза от 0 до 17 м по вертикали является изотропной. На глубине 17 м по вертикали или $x318$ м по скважине находится

неоднородный анизотропный пласт с горизонтальным сопротивлением 8,5–14 Ом·м и коэффициентом электрической анизотропии в пределах 1,4–1,6. Наклон границы относительно вертикали – около 88,4°. Предположительно, интервал представлен чередованием тонкослоистых песчаников и глинистых прослоев.

4. Комплексный подход к изучению геологических сред, вскрытых скважинами на разных этапах строительства, позволяет значительно повысить эффективность применяемых геофизических комплексов. При наличии априорной информации об определяемых геоэлектрических параметрах, полученной при каротаже в процессе шаблонирования, можно значительно повысить точность восстановления расстояния до границ и УЭС пластов по данным каротажа во время бурения [Эпов, ..., Никитенко и др., 2015].

Глава 4. Новые методы обработки и интерпретации данных каротажных зондирований

В главе рассмотрены новые методы инверсии и сжатия данных прибора для каротажа в процессе бурения МПП, а также метод определения анизотропии в зоне проникновения и уточнения коэффициента глинистости путем комплексирования данных разных методов каротажа. Для обоснования предложенных методов использованы программы численного моделирования и инверсии данных, представленные в двух предыдущих главах. Численные результаты для каротажа МПП получены для глубинного зонда длиной 5 – 10 м в горизонтально-слоистых моделях.

1. Определение угла наклона и азимута напластования по измерениям прибора каротажа в процессе бурения МПП

Прибор для каротажа в процессе бурения МПП регистрирует э.д.с на некотором временном отрезке. Источниками и приемниками электромагнитного поля являются взаимно ортогональные катушки, так, что по меньшей мере четыре компоненты поля доступны для измерения: XX , YY , ZZ , XZ/ZX (первая буква означает ориентацию источника, вторая – приемника в системе координат прибора). Для оценки угла наклона пластов и азимутального угла предлагается использовать метод фокусировки во временной области – Multi-Time Focusing (MTF) technique [Nikitenko, Rabinovich, Sviridov, 2015]. Оценки углов способствует надежной геонавигации, и позволяют сократить ресурсоемкость инверсии и модельную эквивалентность. Метод состоит из следующих шагов:

- а) извлечение из измеренных э.д.с сфокусированного MTF-сигнала – сигнала, порожденного первичным полем и не зависящего от неоднородностей. Данный сигнал является коэффициентом при степени $t^{5/2}$ в разложении э.д.с. в ряд по времени;

- б) вычисление углов наклона относительно нормали к напластованию и вращения прибора из системы уравнений, связывающих МТФ-сигналы с данными углами и принципиальными компонентами поля;
- в) вычисление истинного наклона пласта и азимута через углы наклона относительно пластов и вращения прибора, а также угла наклона (инклинометрии) и азимута скважины.

Принципиальные компоненты – это трансформации поля в принципиальную систему координат, где матрица наблюдений имеет лишь диагональные элементы. Такие трансформации возможны для МТФ-сигналов, поскольку эти сигналы зависят только от некоторого эффективного сопротивления однородной среды. Принимая во внимание специфику измерений во времени, например, доступный для регистрации временной диапазон, медленную сходимость временного ряда и другие, извлечение МТФ-сигнала становится возможным только после тщательного выбора компонент поля, времен и количества слагаемых в разложении в ряд.

В таблице 1 показаны погрешности определения углов наклона и вращения при использовании различных наборов компонент поля. Для минимально возможного набора из четырех компонент погрешности увеличиваются, но являются допустимыми для практики.

Таблица 1 – Средние погрешности определения углов

| Угол \ Компоненты | Все компоненты или XX, YY, ZZ, XZ, ZX | XX, YY, ZZ, XZ |
|-------------------|---------------------------------------|----------------|
| Наклона | 0,4° | 1,3° |
| Вращения | 1,2° | 3,6° |

2. Способ инверсии данных прибора каротажа в процессе бурения МПП на основе преобразования сигналов в частотную область

Численное моделирование для МПП является затратной процедурой, поскольку сигнал во временной области вычисляется с помощью обратного преобразования Фурье частотного сигнала и время вычисления возрастает в сотни раз. Задача состоит в том, чтобы сократить временные затраты при моделировании данных, поскольку в процессе бурения инверсия, требующая многократного решения прямой задачи, должна производиться в реальном времени. Один из путей решения данной проблемы заключается в трансформации измеренных сигналов в частотную область [Nikitenko, 2017]. После трансформации к ним применяется алгоритм инверсии, разработанный и используемый для измерений в частотной области, с целью определения сопротивлений пластов, пересекаемых скважиной в процессе бурения и геонавигации.

Запись сигнала во времени производится на ограниченном временном интервале, исключая ранние времена, где велико влияние формы импульса тока, а также поздние времена, где сигнал ниже установленного значения, поэтому попытка напрямую применить формулу для определения частотно-зависимого сигнала приводит к большим ошибкам в вычисленном магнитном поле. Новый подход к вычислению Фурье-трансформации временного сигнала основан на вычитании из сигнала первичного поля, которое определяется как поле в однородной среде с УЭС равному кажущемуся УЭС на первых временах измерения. После преобразования частотно-зависимое однородное поле добавляется к полученному сигналу.

Кривые э.д.с. на ранних временах немонокотонны в зависимости от УЭС однородной среды, т.е. для одного значения э.д.с. могут быть найдены несколько значений кажущегося УЭС. Поскольку кривые э.д.с. монотонны на поздних временах и, следовательно, дают только одно значение кажущегося УЭС, алгоритм вычисления истинного кажущегося УЭС в зависимости от времени состоит в следующем:

- а) вычисляются последовательно кажущиеся сопротивления начиная с последнего временного отсчета в порядке убывания времени;
- б) когда решений несколько на некотором времени, выбирается ближайшее к кажущемуся УЭС на предыдущем времени;
- в) если решение отсутствует (например, при переходе э.д.с. через ноль), то кажущееся УЭС считается не определенным.

При уменьшении времени кажущееся УЭС стремится к фиксированному значению – усредненному УЭС среды, в которой находится прибор. Это значение и выбирается для вычисления однородного поля.

Чтобы восстановить магнитное поле в частотном диапазоне от 2 до 600 кГц, соответствующем глубинным исследованиям, в общем случае необходимы времена измерения от 0.05 мкс до 0.5 мс (4 порядка). В проводящей среде временной интервал сокращается и может составлять 2 порядка: от 5 мкс до 0.5 мс.

Анализ разрешающей способности показывает, что чувствительность восстановленных частотно-зависимых сигналов к УЭС удаленных проводящих пластов, границ, находящихся на расстоянии до 20 м от зонда, и углу наклона зонда сравнима с чувствительностью исходных сигналов (Таблица 2). Погрешность последних принята равной 1 %.

Таблица 2 – Средние ошибки определения параметров

| Сигналы \ Параметры | УЭС | Расстояние до границы | Угол наклона зонда |
|---------------------|-------|-----------------------|--------------------|
| Временные | 1.2 % | 2.1 % | 2.7 % |
| Частотные | 3.2 % | 4.0 % | 2.3 % |

3. Методы сжатия данных прибора каротажа в процессе бурения МПП

В приборе сигнал записывается на тысячах времен, но на поверхность передается ограниченное количество информации, поэтому исходные сигналы необходимо описать наименьшим возможным количеством параметров, чтобы передавать именно параметры, а затем восстанавливать с заданной точностью записанный сигнал для последующей обработки. Предложены простые и быстрые способы решения указанной задачи [Nikitenko et al., 2017]. Первый основан на сплайн-аппроксимации сигнала, второй состоит в конструировании и использовании ортогонального базиса в пространстве измерений и описании каждого сигнала как линейной комбинации векторов из этого базиса. Анализ поведения сигнала МПП в зависимости от времени показывает, что существуют различные типы сигналов: монотонные, немонотонные без смены знака, меняющие знак один, два или три раза. Общей особенностью сигналов является то, что, начиная с некоторого времени, они затухают как степенные функции. Используется трансформация сигнала, которая сохраняет его знак и состоит в умножении на подходящую степень времени. Алгоритм построения параметров в значительной степени общий для двух методов. Измеренный сигнал фильтруется, сглаживается и трансформируется. Последовательно вычисляется параметры для восстановления сигналов начиная с минимально возможного количества. Если восстановленный сигнал совпадает с исходной трансформацией с заданной точностью на некотором шаге, то параметры считаются определенными, если нет – их количество увеличивается на единицу.

В первом методе для аппроксимации сигналов были выбраны кубические сплайны. Параметрами являются значения сигналов в выбранных узлах сетки времен, а также оценки производных на краях временного интервала. Для второго метода прежде всего выбирается класс моделей для интерпретации сигналов. Затем проводятся масштабные вычисления сигналов для представительной серии моделей, характеризующимися разнообразными наборами электрофизических параметров. В результате вычислений образуется n -мерное векторное пространство данных, где n – число времен. Предполагается, что любой измеренный сигнал принадлежит этому пространству. Для пространства сигналов строится ортогональный базис, после чего каждый измеренный сигнал записывается в виде линейной комбинации базисных векторов.

Число слагаемых в линейном представлении зависит от требуемой точности представления. Параметры, которые описывают сигнал, – это коэффициенты линейной комбинации. Именно они и передаются на поверхность. При этом базисные векторы и соответствующие им собственные значения хранятся в памяти.

После передачи параметров на поверхность исходный сигнал вычисляется с помощью параметров и обратной трансформации. В таблице 3 приведены данные о необходимом количестве параметров для восстановления сигналов по двум методам с точностью 0.5 % в классе горизонтально-слоистых моделей.

Таблица 3 – Среднее число параметров для восстановления сигналов

| Метод \ Компоненты | XX и YY | XY и YX | XZ и YZ | ZX и ZY | ZZ |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|----|
| Сплайн-аппроксимации | 8 | 11 | 10 | 11 | 7 |
| Собственных значений | 7 | 10 | 9 | 10 | 7 |

4. Определение электрической макроанизотропии в зоне проникновения и уточнение коэффициента глинистости путем комплексирования данных различных методов каротажа

Разработан метод и программное обеспечение для определения детального распределения УЭС и электрической анизотропии в зоне проникновения на основе инверсии данных различных приборов каротажа на кабеле: 3DeX, HDIL, Micro-Laterolog и Gamma Ray (Baker Hughes GE) [Nikitenko, Tabarovsky, 2019]. Результатом инверсии является также скорректированное значение объема глин. С использованием УЭС и параметра анизотропии на радиальных глубинах, соответствующих глубине исследования приборов NMR и Nuclear, предоставляющих плотностные оценки, точность определения водонасыщенности увеличивается; детальное описание УЭС в прискважинной зоне улучшает оценку насыщения и проницаемости в результате обработки повторных измерений ЭМК. Метод включает следующие шаги.

- а) определение кусочно-постоянного горизонтального УЭС в зоне проникновения на основе инверсии данных HDIL, известного горизонтального УЭС пласта (из инверсии HDIL или 3DeX) и скважинных условий;
- б) определение непрерывного горизонтального УЭС в зоне проникновения на основе кусочно-постоянного горизонтального УЭС, горизонтального УЭС пласта и УЭС на стенке скважины (из данных Micro-Laterolog) с использованием сплайнов;
- в) вычисление УЭС пропластков, составляющих анизотропную формацию на основе горизонтального и вертикального УЭС пласта (из инверсии 3DeX) и оценки коэффициента глинистости (по Gamma Ray);
- г) вычисление пределов изменения УЭС в зоне проникновения;
- д) коррекция коэффициента глинистости на основе вычисленных пределов изменения УЭС в зоне проникновения и их связи с коэффициентом

глинистости, что гарантирует совместность данных различных приборов;

- е) вычисление параметра анизотропии в зависимости от радиальной глубины на основе непрерывного горизонтального УЭС, коэффициента глинистости и УЭС глин.

Результаты комбинированной инверсии данных, полученных на песчаном интервале тестовой скважины компании Baker Hughes GE, представлены на рисунке 6.

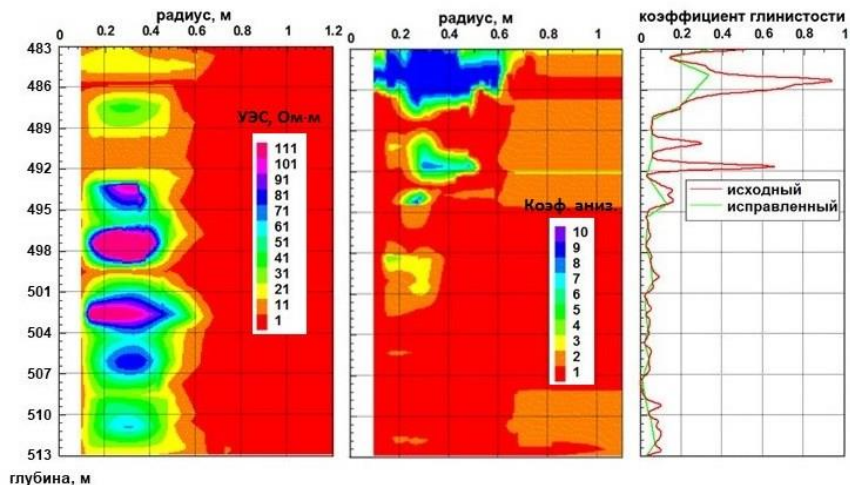


Рисунок 6 – Непрерывное распределение горизонтального УЭС (слева), коэффициента анизотропии (в центре) в зависимости от вертикальной и радиальной глубины; исходный и скорректированный коэффициент глинистости (справа) для песчаного интервала скважины

УЭС пласта меняется от 1.8 до 3.7 Ом·м. Результаты инверсии данных HDIL (горизонтальное УЭС) показаны слева. В зависимости от радиальной глубины наблюдается сначала увеличение УЭС, затем его уменьшение. В центре показано значение коэффициента анизотропии, справа – исходный и скорректированный коэффициент глинистости. В целом анизотропия низкая, высокие значения получены только в верхней части интервала. Так же, как и УЭС, коэффициент анизотропии сначала возрастает в радиальном направлении, а затем убывает до значения анизотропии в пласте. Некоторые локальные коррекции полученного из GR объема глин сделаны там, где исходный объем глин был высоким.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главными результатами диссертационной работы являются решение прямых и обратных задач, высокоточные и быстрые вычислительные алгоритмы и компьютерные программы для моделирования и инверсии данных с анализом разрешающей способности методов электромагнитных зондирований, научное обоснование применения новых каротажных зондов для изучения анизотропных и дисперсионных свойств сложно построенных коллекторов, включая решение задач геонавигации с оценкой УЭС пластов в процессе бурения, а также развитие интерпретационной базы новых и современных каротажных комплексов, широко используемых в отечественной практике промысловой геофизики.

Во-первых, получены решения прямых задач и созданы вычислительные алгоритмы и компьютерные программы для тороидального источника и для смещенного с оси скважины магнитного диполя в слоистых средах. Высокая точность и быстродействие реализованных вычислительных алгоритмов достигается путем представления решения в виде, сокращающем число вычислительных операций, использования необходимой нормировки, применения схем эффективного интегрирования и суммирования, что позволяет обосновать оптимальные конфигурации зондов для изучения анизотропных и дисперсионных свойств сложно построенных коллекторов на основе полномасштабного моделирования электромагнитных сигналов. Созданный комплекс программ численного моделирования электромагнитных сигналов в вертикально- и радиально-неоднородных моделях сред служит основой оперативной инверсии большого объема данных с анализом разрешающей способности современных каротажных комплексов.

Во-вторых, разработан комплекс алгоритмов и программ для численной инверсии и анализа пространственного разрешения систем измерений, что позволяет обосновать эффективность применения электромагнитных приборов для каротажа в процессе бурения при решении задач геонавигации с оценкой УЭС пластов и выявления интервалов тонкой слоистости осадочных отложений, а также для комплекса данных электромагнитных и электрических каротажных зондирований – при определении коэффициента электрической анизотропии и частотно-зависимой ДП пластов для изучения сложнопостроенных геологических сред с оценкой характера насыщения пород-коллекторов. Комплекс программ инверсии данных и анализа разрешающей способности методов дает возможность исследователям проводить интерпретацию данных в вертикальных и наклонно-горизонтальных скважинах с построением обоснованной геоэлектрической модели и определением погрешностей восстановления модельных параметров. Преимуществом разработанных алгоритмов и программ является вы-

сокая скорость инверсии данных, позволяющая восстанавливать электрофизические параметры для построения непрерывного геоэлектрического изображения среды в масштабе реального времени.

В-третьих, развита интерпретационная база новых электромагнитных каротажных зондирований. Созданы новые методы инверсии и сжатия данных для прибора каротажа в процессе бурения методом переходных процессов, что обеспечивает возможность быстрой инверсии данных частотных зондирований, а также оценки угла наклона и азимутального угла пластов с помощью фокусировки измеренных сигналов. Оценки углов способствуют надежной геонавигации, а также, в случае инверсии данных для сложной модели среды, позволяют существенно сократить ресурсоемкость инверсии и снизить модельную эквивалентность. Представленные методы сжатия данных характеризуются простотой реализации, высокой скоростью, применимостью к различным трансформациям сигналов. Комплексирование данных различных каротажных методов дает возможность определять УЭС и коэффициент анизотропии в прискважинной зоне и уточнять коэффициент глинистости. Вертикальное и горизонтальное УЭС, вычисленное на небольших глубинах, совпадающих с радиусом исследования ядерно-магнитного каротажа, улучшают оценки коэффициента водонасыщенности, а радиальный профиль УЭС и коэффициент электрической анизотропии в зоне проникновения могут быть использованы для надежной оценки насыщения и коэффициента проницаемости при интерпретации данных повторных измерений электромагнитного каротажа. Созданное программное обеспечение для совместной обработки и инверсии данных расширяет возможности изучения скважин с помощью комплекса приборов многочастотных, многозондовых и многокомпонентных измерений, электрического имиджера и гамма-каротажа.

Таким образом, решения прямых задач, комплекс алгоритмов и программ оперативного моделирования, инверсии данных и анализа разрешающей способности современных методов электромагнитных каротажных зондирований, обоснование применения зондов при решении конкретных геофизических задач, а также новые методы инверсии, сжатия данных и комплексирования методов каротажных зондирований позволяют получить более точную и достоверную информацию о пространственном распределении электрофизических параметров, повысить эффективность исследования сложно построенных нефтегазовых коллекторов и увеличить пространственное разрешение систем каротажа при решении задач промысловой геофизики.

Развитие интерпретационной базы современных каротажных зондирований на основе новых решений прямых и обратных задач необходимо

продолжить, что особенно важно при реализации программ импортозамещения. Интересной и востребованной задачей является изучение электромагнитных сигналов и создание соответствующих процедур инверсии в средах с непрерывным пространственным изменением электрофизических свойств среды. Развитие способов обработки и интерпретации данных может состоять в разработке новых быстрых алгоритмов для оперативной инверсии данных каротажа, реализуемых непосредственно в скважинном приборе, что особенно важно для оперативного принятия решений при геонавигации. Этому могут способствовать высокопроизводительные параллельные вычисления с использованием многопроцессорных устройств, а также моделирование и инверсия данных каротажа в процессе бурения на основе нейронных сетей.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК

1. Эпов М.И. Особенности высокочастотных индукционных каротажных зондирований в скважинах с горизонтальным завершением / М.И. Эпов, ..., **М.Н. Никитенко** // Геология и геофизика. – 1998. – Т. 39. – № 5. – С. 649-656.
2. **Никитенко М.Н.** Новый подход к оценке удельного сопротивления пластов по данным ВИКИЗ / **М.Н. Никитенко**, А.В. Шлык // Каротажник. – 2005. – Вып. 8 (135). – С. 93-99.
3. Эпов М.И. Об инверсии диаграмм ВИКИЗ в контрастных тонкослоистых коллекторах, вскрытых пологими скважинами / М.И. Эпов, К.В. Сухорукова, **М.Н. Никитенко** // Каротажник. – 2006. – Вып. 6 (147). – С. 84-100.
4. Сухорукова К.В. Численный анализ измерений ВИКИЗ и ВЭМКЗ на Телецком озере / К.В. Сухорукова, А.Н. Петров, **М.Н. Никитенко** // Каротажник. – 2007. – Вып. 5 (158). с. 30-38.
5. **Никитенко М.Н.** Измерение относительной амплитуды магнитного поля зондами ВИКИЗ / М.Н. Никитенко, М.И. Эпов // Каротажник. – 2008. – Вып. 9 (174). – С. 21-35.
6. Ельцов Т.И. Быстрый алгоритм вычисления кажущихся сопротивлений по сигналам индукционного каротажа / Т.И. Ельцов, **М.Н. Никитенко**, С.А. Терентьев // Каротажник. – 2013. – Вып. 6 (228). – С. 63-72.
7. Эпов М.И. Электромагнитный каротаж в процессе бурения: математическое моделирование и численный анализ / М.И. Эпов, ..., **М.Н. Никитенко** // Каротажник. – 2014. – Вып. 11 (245). – С. 29-42.

8. Каюров К.Н. Аппаратура и интерпретационная база электромагнитного каротажа в процессе бурения / К.Н. Каюров, ..., **М.Н. Никитенко** // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 12. – С. 112-115.
9. Эпов М.И. Сигналы электромагнитного каротажа в процессе бурения и их численная инверсия / М.И. Эпов, **М.Н. Никитенко** [и др.] // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2014. – № 3. – С. 49-55.
10. Эпов М.И. Численное моделирование и инверсия данных электромагнитного каротажа в процессе бурения и шаблонирования нефтегазовых скважин / М.И. Эпов, ..., **М.Н. Никитенко** [и др.] // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56. – № 8. – С. 1520-1529.
11. Каюров К.Н. Аппаратурный комплекс СКЛ для каротажа в нефтегазовых скважинах и его интерпретационная база / К.Н. Каюров, ..., **М.Н. Никитенко** [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 9. – С. 38-43.
12. Эпов М.И. Исследование возможностей электрического и электромагнитного каротажа в электрически макроанизотропных пластах, вскрытых наклонно-горизонтальными скважинами / М.И. Эпов, **М.Н. Никитенко** [и др.] // Каротажник. – 2016. – Вып. 2 (260). – С. 64-79.
13. Эпов М.И. Изучение электрической макроанизотропии интервалов наклонно-горизонтальных скважин по данным высокочастотного индукционного каротажа в процессе бурения / М.И. Эпов, **М.Н. Никитенко** [и др.] // Каротажник. – 2016. – Вып. 11 (269). – С. 94-109.
14. Михайлов И.В. Совместная численная инверсия данных индукционных и гальванических каротажных зондирований в моделях геологических сред с осевой симметрией / И.В. Михайлов, ..., **М.Н. Никитенко** [и др.] // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58. – № 6. – С. 935-947.
15. Эпов М.И. 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.
16. Копытов Е.В. Инверсия данных высокочастотного электромагнитного каротажа в сильнонаклонных скважинах с определением электрической анизотропии / Е.В. Копытов, К.В. Сухорукова, **М.Н. Никитенко** // Каротажник. – 2018. – Вып. 8 (290). – С. 39-57.
17. Глинских В.Н. Теоретико-алгоритмическая база и компьютерное моделирование данных диэлектрического каротажа для изучения частотного спектра электрофизических параметров геологической среды / В.Н. Глинских, **М.Н. Никитенко** // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2018. – Т. 16. – № 4. – С. 41-55.

18. Эпов М.И. Новый электромагнитный зонд для высокоразрешающего каротажа: от теоретического обоснования до скважинных испытаний / М.И. Эпов, ..., **М.Н. Никитенко** [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 11. – С. 23-27.

Патенты и патентные заявки

19. Эпов М.И. Способ измерения удельной электропроводности и электрической макроанизотропии горных пород / М.И. Эпов, В.Н. Глинских, **М.Н. Никитенко** // Пат. Рос. Федерация № 2525149, опублик. 10.08.2014.
20. **Nikitenko M.** Methods of transient EM data compression / M. Nikitenko [et al.] // US Patent No. 9617846, publ. April 11, 2017.
21. **Nikitenko M.** Apparatus and method for downhole transient resistivity measurement and inversion / M. Nikitenko // US Patent No. 9841527, publ. December 12, 2017.
22. **Nikitenko M.** Late time rotation processing of multi-component transient EM data for formation dip and azimuth / M. Nikitenko, M. Rabinovich, M. Sviridov // US Patent Application No. 14539014, publ. May 14, 2015.
23. **Nikitenko M.** Correcting shale volume and measuring anisotropy in invaded zone / M. Nikitenko, L. Tabarovsky // US Patent No. 10495780, publ. December 3, 2019.

Свидетельства о государственной регистрации

24. Байкова М.А. EMF Pro v2 / М.А. Байкова, ..., **М.Н. Никитенко** [и др.] // Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2015616521, опублик. 11.06.2015.
25. Баранова С.С. Программная библиотека процедур интерпретации данных гальванического и индукционного каротажа «Emfcore v2» / С.С. Баранова, ..., **М.Н. Никитенко** [и др.] // Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2015616581, опублик. 15.06.2015.
26. **Никитенко М.Н.** Программа для ЭВМ «Inv_EM_hor» численной инверсии данных электрического и электромагнитного каротажа в наклонных и горизонтальных скважинах / М.Н. Никитенко, В.Н. Глинских, К.В. Сухорукова // Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2016614990, опублик. 12.05.2016.

Статьи и материалы в других рецензируемых научных изданиях

27. Nardi G. Evaluation of Parameter Uncertainty Utilizing Resolution Analysis in Reservoir Navigation Increases the Degree of Accuracy and Confidence in Well-Bore Placement / G. Nardi, ..., **M. Nikitenko** [et al.] // 51st SPWLA Annual Logging Symposium (June 19 – 23, 2010). – Perth, Australia, 2010. – Paper: SPWLA-2010-78038.
28. Онегова Е.В. Сравнение разрешающей способности индукционного каротажа в частотном и переходном режимах для задачи геонавигации

- / Е.В. Онегова, **М.Н. Никитенко** [и др.] // 12-я Научно-практическая конференция по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа «Геомодель – 2010» (11 – 14 сентября 2010). – Геленджик, Россия, 2010. – Статья: 188-00094.
29. Sviridov M. New Software for Processing of LWD Extra-Deep and Azimuthal Resistivity Data / M. Sviridov, ..., **M. Nikitenko** [et al.] // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. – 2014. – Vol. 17. – Issue 2. – P. 109-127.
30. **Nikitenko M.** Development of LWD High-frequency Resistivity Tool / M. Nikitenko [et al.] // 6th EAGE Saint Petersburg International Conference & Exhibition (April 7 – 10, 2014). – Saint Petersburg, Russia, 2014. – Paper: Th D 05.
31. **Nikitenko M.** Formation Evaluation via 2D Processing of Induction and Galvanic Logging Data Using High-performance Computing / M. Nikitenko [et al.] // 77th EAGE Conference & Exhibition (June 1 – 4, 2015). – Madrid, Spain, 2015. – Paper: Tu N107 15.
32. **Nikitenko M.** Effective inversion of electromagnetic and electric logging data from vertical and horizontal oil and gas wells / M.N. Nikitenko [et al.] // 78th EAGE Conference & Exhibition (May 30 – June 2, 2016). – Vienna, Austria, 2016. – Paper: Tu STZ2 09.
33. **Никитенко М.Н.** Численная инверсия комплекса данных электрометрии в наклонно-горизонтальных скважинах / М.Н. Никитенко [и др.] // 18-я Научно-практическая конференция по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа «Геомодель – 2016» (12 – 15 сентября 2016). – Геленджик, Россия, 2016. – Статья: Tu 02 01.
34. **Nikitenko M.** Fast electromagnetic modeling in cylindrically layered media excited by eccentric magnetic dipole / M. Nikitenko, G. Itskovich, A. Seryakov // Radio Science. – 2016. – Vol. 51. – Issue 6. – P. 573–588.
35. Epov M. Theoretical Basis of Data Interpretation of Electromagnetic Logging Tool With Toroidal Coils / M. Epov, **M. Nikitenko** [et al.] // 8th Saint Petersburg International Conference & Exhibition (April 9 – 12, 2018). – Saint Petersburg, Russia, 2018. – Paper: 44489.

Технический редактор Т.С. Курганова

Подписано к печати 21.10.2021

Бумага 60x84/16. Бумага офсет № 1. Гарнитура «Таймс».

Печ. л. 2,0. Тираж 120. Заказ № 200

ИНГГ СО РАН, ОИТ, 630090, Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3.