

УТВЕРЖДАЮ
Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
«Институт вычислительной математики и
математической геофизики
Сибирского отделения Российской академии наук»
д. ф.-м. н., профессор РАН
_____ М. А. Марченко
« ____ » _____ 2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию
Никитенко Марины Николаевны
«Оперативное моделирование и интерпретация в современных
технологиях электромагнитного каротажа»
на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 1.6.9 – «геофизика»

Теория и методы скважинной электроразведки в настоящее время активно развиваются, но все еще далеки от завершения. Совершенствование методов электромагнитного каротажа в новых технологических условиях при исследованиях в нефтегазовых скважинах является актуальной научной проблемой, включающей в себе множество аспектов:

- обоснование новых высокоразрешающих методов каротажа, ориентированных на идентификацию и определение нефтенасыщения месторождений, залегающих в сложных геологических условиях. Например, поиск и изучение тонкослоистых и слабопроницаемых коллекторов углеводородов, которые в настоящее время повсеместно вовлекаются в разработку;
- создание и совершенствование аппарата оперативного моделирования и инверсии данных современных каротажных комплексов для их эффективного применения при решении конкретных геологических задач, включая очень востребованную в производстве геонавигацию скважин;
- развитие и создание новых способов инверсии и комплексирования данных различных каротажных методов для расширения их возможностей и извлечения дополнительной и более достоверной информации об изучаемой геологической среде.

На решение этой научной проблемы направлена диссертация М.Н. Никитенко. Предлагаемый ей подход включает создание и обоснование методов исследования околоскважинного пространства для определения электрофизических параметров горных пород на основе быстрых численно-аналитических решений прямых задач электромагнитных зондирований и программного комплекса моделирования, инверсии и оценки разрешающей способности каротажных данных.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения и включает 340 страниц, 124 рисунка, 26 таблиц. Библиографический список содержит 305 наименований. Структура работы и наполнение основных разделов обусловлена логикой выполнения научных исследований и последовательностью поставленных научных задач.

Во введении сформулированы цели и задачи, обоснована актуальность исследования, перечислены выносимые на защиту результаты, определены научная новизна, теоретическая и практическая ценность работы.

В первой главе соискателем проведен анализ состояния методов электромагнитных каротажных зондирований, решаемых задач, приборной и интерпретационной базы, указаны достоинства методов и ограничения при их использовании. Приведенный аналитический обзор говорит о высоком профессионализме соискателя. На основе обзора соискателем показана необходимость развития теоретико-практической базы и программно-алгоритмического обеспечения электромагнитного каротажа.

Во второй главе приводятся полученные соискателем решения прямых задач для кругового магнитного тока и смещенного с оси скважины магнитного диполя в вертикально и радиально неоднородных моделях геологической среды. Описаны разработанные алгоритмы и компьютерные программы для численного моделирования сигналов. Алгоритмы протестированы, верифицированы. С их использованием выполнено обоснование параметров новых электромагнитных зондов для изучения электрической анизотропии и дисперсии комплексной электропроводности горных пород. Приведено описание разработанного программного комплекса моделирования сигналов других каротажных методов в слоистых средах.

В третьей главе диссертации представлены разработанные соискателем алгоритмы и программы численной инверсии и оценки чувствительности данных электромагнитного каротажа на основе алгоритмов и программ моделирования сигналов. С их использованием проведены исследования о возможностях использования прибора каротажа в процессе бурения при решении задач геонавигации и комплекса высокочастотного и

электрического каротажа при определении анизотропии и диэлектрической проницаемости. Алгоритмы апробированы на синтетических данных, вовлечены в обработку и экспериментальные данные каротажных зондирований.

Четвертая глава содержит описание разработанных соискателем новых методов инверсии и сжатия данных каротажа в процессе бурения методом переходных процессов, а также способа комплексирования каротажных методов для восстановления радиального профиля удельного электросопротивления (УЭС) и его анизотропии в прискважинной зоне и уточнения коэффициента глинистости.

Основные итоги исследований автора сформулированы в виде пяти результатов, выносящихся на защиту.

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

Соискатель получил решения прямых задач и показал, как строится эффективный вычислительный алгоритм, обеспечивающий высокую точность и скорость вычислений. Подынтегральное выражение выписано в явном виде, для его быстрого затухания путь интегрирования по вещественной оси перенесен в комплексную плоскость с обходом особых точек. Соискателем проведено численное моделирование электромагнитных сигналов для обоснования конфигурации новых зондирующих систем.

1) Зонд с тороидальными катушками предназначен для определения электрической анизотропии тонкослоистых коллекторов, геоэлектрических границ и зон трещиноватости. Показана зависимость измеряемых электромагнитных сигналов от УЭС и анизотропии пласта, от параметров скважины, от вертикальной глубины при пересечении скважиной границ пластов. На основании масштабных расчетов определена конфигурация компактного электромагнитного зонда, его глубинность и вертикальное разрешение. Скважинный образец зонда создан в НПП ГА «Луч» совместно с ИНГГ СО РАН, и практическая значимость результатов обоснования параметров зонда не вызывает сомнения.

2) Диэлектрический зонд предназначен для исследования пространственного распределения частотно-зависимой комплексной электропроводности

высокоомных, слабопроницаемых горных пород. Установлен диапазон длин и частот зондов для его определения.

Глубина теоретической обоснованности убеждают в надежности полученных заключений и позволяют сделать вывод о том, что первый защищаемый результат полностью обоснован.

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.

Приведено подробное описание разработанных соискателем компьютерных программ (название, каротажный метод, область применения, входные и выходные параметры). Указано, что для некоторых программ использованы вычислительные модули, созданные другими авторами, и исследования, которые проведены с использованием программного комплекса, в том числе и другими исследователями. Надо отметить, что весь построенный программно-алгоритмический комплекс ориентирован на практическое применение и в настоящее время используется для изучения геологических разрезов нефтяных и газовых скважин, обеспечивая проведение оперативных расчетов с высокой точностью. Высокая степень достоверности расчетов подтверждается сравнительным анализом с результатами, полученными другими исследователями при использовании аналитических, конечно-элементных и сеточных аппроксимаций.

Тем самым можно сделать вывод об обоснованности второго защищаемого результата.

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.

С помощью созданных программно-алгоритмических средств моделирования, инверсии и анализа разрешающей способности соискателем установлены возможности применяемых электромагнитных методов исследования скважин.

- 1) Показано, что использование амплитуд наряду с разностями фаз зондов ВЭМКЗ в интерпретационных схемах позволяет определять диэлектрическую проницаемость пластов и таким образом дифференцировать пласты, имеющие примерно одинаковое сопротивление, по диэлектрической проницаемости.
- 2) Установлено, что совместное использование данных сигналов электромагнитного (ВЭМКЗ) и электрического (БКЗ) каротажа в силу независимости их поведения вблизи геоэлектрических границ значительно повышает достоверность определения анизотропии среды, вскрытой наклонно-горизонтальными скважинами.
- 3) Доказано, что сигналы каротажа 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. Также показано, что сигналы ВИКПБ обладают хорошей чувствительностью к электрической анизотропии. Определение коэффициента анизотропии пласта возможно по диаграммам разности фаз при приближении к его кровле, при этом коэффициент электрической анизотропии может быть прогностическим индикатором для выявления интервалов тонкой слоистости осадочных отложений и может использоваться для снижения аварийности добычи углеводородного сырья при бурении горизонтальных нефтегазовых скважин.

Автор приводит результаты интерпретации синтетических и практических данных, проводит оценку погрешности определяемых параметров. Для синтетических примеров выбран представительный класс моделей среды. Таким образом и этот защищаемый результат является убедительно обоснованным.

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.

Каротаж в процессе бурения методом переходных процессов, хотя и не имеет широкого распространения на практике, безусловно, перспективен хотя бы потому, что обладает значительной глубиной. Соискателем разработаны новые способы обработки данных, которые позволят передавать данные на поверхность и проводить их инверсию в реальном времени для определения УЭС пластов и расстояний до границ продуктивного пласта.

- 1) Для оценки угла наклона и азимутального угла пластов и разработан метод фокусировки во временной области, заключающийся в извлечении из измеренных сигналов сфокусированного сигнала, зависящего от некоторого эффективного УЭС однородной среды, вычисления углов наклона относительно пластов и вращения прибора из системы уравнений, связывающих сфокусированные сигналы с данными углами и главными компонентами поля и вычисления истинного наклона и азимута пласта через углы относительного наклона и вращения прибора, инклинометрию и азимут скважины. Оценки углов способствуют надежной геонавигации и позволяют сократить ресурсоемкость инверсии и модельную эквивалентность. Метод протестирован на серии моделей, получены оценки погрешности определения значений углов.
- 2) Разработан способ быстрой инверсии данных, основанный на трансформации измеренных сигналов в частотную область и применении к ним алгоритма инверсии, разработанного и используемого для измерений в частотной области. Важной особенностью метода является вычитание первичного поля из измеренной ЭДС. Это дает возможность использования относительно небольшого временного интервала для преобразования Фурье и восстановления частотного сигнала с хорошей точностью. Показано, что разрешающая способность преобразованных сигналов сравнима с разрешающей способностью исходных сигналов.
- 3) Разработаны методы сжатия данных. 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. Установлено, что для описания восстановления сигнала достаточно 6 – 11 значимых параметров. Представленные методы сжатия данных характеризуются простотой реализации, высокой скоростью, применимостью к различным трансформациям сигнала, что подтверждено численными примерами. На все три метода получены патенты, защищаемый результат является тщательно проработанным и обоснованным.

5. *Метод определения удельного электрического сопротивления и коэффициента электрической анизотропии в зоне проникновения фильтра бурового раствора в пласт и коррекции значения 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.

Соискателем разработано программно-алгоритмическое обеспечение, позволяющее исследовать и инвертировать сигналы различных приборов каротажа на кабеле, которые определяют вертикальное и горизонтальное УЭС пласта (многокомпонентные измерения 3DeX), сопротивление на стенке скважины (имиджер Micro-Log), содержание глины в пласте или коэффициент глинистости (гамма-каротаж Gamma Ray), горизонтальное УЭС зоны проникновения (многочастотные, многозондовые измерения HDIL). Результатом инверсии являются радиальный профиль горизонтального УЭС и анизотропии, а также скорректированное значение объема глин. Значительную часть исследования занимают теоретические выкладки, служащие основой вычисления анизотропии и исправления коэффициента глинистости. Автор показал, каким образом обеспечивается совместность данных различных приборов. Соискатель разработал и показал последовательную схему метода, протестировал его на синтетических данных и привел примеры обработки практических каротажных диаграмм.

Таким образом, все защищаемые результаты теоретически обоснованы и подтверждены численными расчетами и практическими примерами.

В целом, можно сделать вывод, что решения, предложенные и реализованные М.Н. Никитенко, развивают теоретические аспекты электромагнитного каротажа, существенно продвигает вперед алгоритмическую базу электромагнитных зондирований, что позволяет создавать новые способы обработки и интерпретации данных в реальном времени, а также повысить эффективность применения высокочастотного каротажа при изучении пространственно неоднородных флюидонасыщенных геологических сред.

Особо хотелось бы отметить значимость исследований для практики каротажных работ при изучении геологических разрезов нефтяных и газовых скважин.

Основные результаты диссертационной работы полностью опубликованы в 18 статьях в научных рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации результатов диссертаций, из которых 7 статей опубликованы в изданиях, входящих в международные научные базы цитирования (Web of Science, Scopus, GeoRef). Кроме того, по результатам диссертационного исследования автором получено 5 российских и зарубежных патентов и 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Диссертация написана хорошим научным языком. Автореферат достаточно подробно и полно отражает основные идеи, содержание и выводы диссертационной работы.

По диссертационной работе можно сделать следующие замечания.

1. Автор построил решения трех прямых задач электромагнитного каротажа. Для одного из них (кстати, более сложного по сравнению с другими) описан вычислительный алгоритм, позволяющий создать эффективную компьютерную программу: преобразовано подынтегральное выражение, выбран путь интегрирования и т.д. Остается неясным, применим ли данный вычислительный алгоритм для двух других решений? По-видимому, было бы целесообразно описать вычислительные алгоритмы во всех трех случаях.
2. При постановке задачи следовало оговорить, что удельная электрическая проводимость не равна нулю, иначе форма решения (граничные условия) меняется.
3. При выборе пути интегрирования используется переход в комплексную плоскость переменной интегрирования с использованием теоремы Коши и леммы Жордана. Подробно обсуждается наличие точек ветвления у подынтегральной функции, но никак не изучается возможное наличие полюсов. Неявно предполагается, что их нет. Так ли это?
4. Эффективность численного интегрирования во многом определяется использованием соответствующих квадратур. Однако в диссертации этот вопрос недостаточно освещен.
5. В подынтегральные выражения входят функции Бесселя, в том числе модифицированные функции Бесселя комплексного аргумента, которые быстро возрастают/убывают при увеличении порядка. Как организовано и как тестировалось их вычисление?
6. Во время доклада на семинаре прозвучало, что автор использовал оптимизационные методы Левенберга-Марквардта и сопряженных градиентов для создания алгоритмов и программ инверсии данных. Однако в диссертационной работе они не упоминаются.
7. Оформление диссертации в целом не вызывает возражений, но мелкие замечания можно сделать. Некоторые рисунки в 4-й главе выполнены небрежно, например, рис. 4.8 - 4.14.

Высказанные замечания не имеют принципиального значения и не снижают положительной оценки диссертации.

Теоретическая и практическая значимость заключается в следующем. Обоснование новых методов исследования скважин с целью определения

электрической анизотропии горных пород, оценки коэффициента водонасыщения и УЭС пластовой воды из частотного спектра комплексной электропроводности является составной частью развития электромагнитного каротажа. Создание аппарата оперативного моделирования и инверсии данных современных каротажных методов ВИКИЗ, ВЭМКЗ, БКЗ и ВИКПБ, реализованных в аппаратно-программных комплексах СКЛ, серийно выпускаемых НПП ГА «Луч», обоснование их эффективности при решении практических задач способствует продвижению этих комплексов при исследованиях в наклонно-горизонтальных скважинах, в том числе в каротаже в процессе бурения. Созданные программы внедрены в автоматизированные системы численной инверсии МФС ВИКИЗ и EMF Pro, разработанные в ИНГГ СО РАН, 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 данных каротажа скважин методом переходных процессов в процессе бурения являются условием успешной геонавигации. Комплексование данных многочастотных, многозондовых и многокомпонентных измерений, электрического имиджера и гамма-каротажа позволяет получить дополнительную информацию о среде, окружающей скважину.

Диссертация М.Н. Никитенко соответствует требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, это научно-квалификационная работа, в которой на основе численно-аналитических решений прямых задач, высокоточных и быстрых вычислительных алгоритмов и компьютерных программ для моделирования, инверсии и анализа разрешающей способности данных электромагнитных зондирований, научно обоснованы конфигурации новых зондирующих систем и эффективность применения используемых на практике каротажных методов, созданы новые способы интерпретации данных, что определяет значительный вклад в развитие аппарата моделирования и интерпретации данных электромагнитных зондирований и имеет важное практическое значение для оперативного решения задач промысловой геофизики.

Считаем, что диссертация М.Н. Никитенко «Оперативное моделирование и интерпретация в современных технологиях электромагнитного каротажа» по специальности 1.6.9 – «геофизика», полностью соответствует требованиям "Положения о присуждении ученых

степеней", предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук.

Заведующий лабораторией
обратных задач естествознания,
д.ф.-м.н.

_____ М.А. Шишленин

(тел. 8(383)330-61-67; адрес 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 6;
e-mail maxim.shishlenin@sccc.ru)

Согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, их дальнейшую обработку и передачу в соответствии с требованиями Минобрнауки России.

Обсуждение диссертации М.Н. Никитенко состоялось на заседании №5 Общеинститутского научного семинара ИВМиМГ СО РАН, в работе которого приняли участие ведущие специалисты в области вычислительной математики, математического моделирования и методов прикладной математики.

Отзыв организации заслушан и одобрен в качестве официального отзыва ведущей организации на заседании лаборатории обратных задач естествознания ИВМиМГ СО РАН, направление научно-исследовательских работ которой соответствуют тематике диссертации, «23» декабря 2021 г., протокол № 1.

Ученый секретарь ИВМиМГ СО РАН,
к. ф.-м. н.

_____ Л.В. Вшивкова