

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук
П.С. Мартышко на диссертацию Никитенко Марины Николаевны
«Оперативное моделирование и интерпретация в современных технологиях
электромагнитного каротажа», представленную на соискание ученой степени
доктора технических наук по специальности 1.6.9 – Геофизика.

Методы скважиной электрметрии (в том числе, высокочастотный электромагнитный каротаж и боковое каротажное зондирование) широко применяются при изучении резервуаров углеводородов: определяется удельное электрическое сопротивление горных пород, по которому выполняется оценка флюидосодержания. Коэффициент электрической анизотропии и диэлектрическая проницаемость также содержат информацию о насыщении флюидами и вещественном составе горных пород. Значение этой информации возрастает при изучении тонкослоистых коллекторов и высокоомных карбонатных пород и битуминозных сланцев. Создание и обоснование новых высокоразрешающих методов каротажа для изучения этих объектов необходимо для решения усложняющихся практических задач.

Вместе с этим, 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. Диссертантом проведены исследования в направлении развития и создания новых способов инверсии и комплексирования данных различных каротажных методов для уточнения и получения новой информации об изучаемой геологической среде.

Цель исследований – 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. Создание новых методов исследования нефтегазовых скважин и разработка высокопроизводительного программно-алгоритмического обеспечения электромагнитного каротажа является **актуальной научной проблемой**,

решение которой имеет важное практическое значение для развития промысловой геофизики.

В рамках реализации поставленной цели диссертантом получены следующие **новые научные результаты**.

1. Обоснована конфигурация новых зондирующих систем для изучения анизотропных и дисперсионных свойств геологической среды на основе решений прямых задач и высокоэффективных вычислительных алгоритмов моделирования сигналов. В диссертации приведены полученные соискателем детальные решения прямых задач для кругового магнитного тока (тороидального источника) и смещенного с оси скважины магнитного диполя (диэлектрического зонда) в слоистых средах, показано, как оптимально построить вычислительную процедуру, представлены результаты тестирования алгоритмов. Проведен масштабный численный анализ сигналов, позволивший сделать выводы о требуемой конфигурации зондов. Установлено, что зонд с тороидальным источником позволяет определять удельное электрическое сопротивление и параметр анизотропии пластов, оценивать положение границ пластов, пересекаемых скважиной, а диэлектрический зонд с частотами в десятки и сотни мегагерц, прижатый к стенке скважины, дает возможность изучения пространственного распределения диэлектрической проницаемости горных пород с выявлением эффекта ее частотной дисперсии.

2. Разработано «быстрое» программно-алгоритмическое обеспечение моделирования, инверсии и анализа разрешающей способности данных электромагнитного каротажа. В диссертации приводится подробное описание созданных автором компьютерных программ моделирования сигналов новых зондов и также сигналов других каротажных методов, широко используемых в отечественной и зарубежной практике. Оперативность и точность моделирования определяется выбором базовых слоистых моделей геологической среды, для которых решение представляется в квадратурах. Такой выбор обусловлен тем, что в большинстве случаев при изучении и анализе сигналов электромагнитных зондов, а также в интерпретационных схемах используются именно простые горизонтально- и цилиндрически-слоистые модели. Оригинальный вклад автора в этом случае заключается в вычислении сигналов как реально существующих зондов, так и гипотетических для широкого набора конструктивных параметров. Соискатель подробно останавливается на разработанных алгоритмах инверсии и анализа разрешающей способности данных. Эти алгоритмы основаны на быстрых решениях прямых задач, поэтому можно говорить об интерпретации данных в масштабе реального

времени. Комплекс программ дает возможность исследователям проводить интерпретацию данных в вертикальных и наклонно-горизонтальных скважинах с построением обоснованной геоэлектрической модели и определением погрешностей восстановления модельных параметров. Все исследования в диссертационной работе выполнены с помощью этого программного комплекса.

3. Обоснована эффективность применения широко используемых на практике приборов электромагнитного и электрического каротажа для определения удельного электросопротивления, положения границ пластов, коэффициента электрической анизотропии и частотно-зависимой диэлектрической проницаемости на основе результатов численной инверсии и анализа чувствительности сигналов к модельным параметрам.

Для каротажного метода высокочастотного электромагнитного зондирования (ВЭМКЗ) примерами инверсии синтетических и практических данных и анализа чувствительности сигналов к модельным параметрам показано, как и с какой точностью может быть определена диэлектрическая проницаемость. Отмечено, что рабочие частоты зондов недостаточно высоки (по сравнению с диэлектрическим зондом) и не обеспечивают надежного восстановления частотного спектра данного параметра, хотя качественные его оценки получить можно. Известно, что в наклонно-горизонтальных скважинах по измерениям ВЭМКЗ удастся определять электрическую анизотропию. В связи с этим, автор анализирует, как увеличивается достоверность определения коэффициента анизотропии, когда к интерпретации привлекаются данные электрического зондирования (БКЗ).

Также соискателем исследован вопрос о возможностях прибора для каротажа в процессе бурения (ВИКПБ). Показано, что сигналы ВИКПБ обладают высокой чувствительностью к удельному электросопротивлению 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. Кроме того, показано, что сигналы ВИКПБ обладают хорошей чувствительностью к параметрам анизотропного пласта и определение коэффициента анизотропии возможно по диаграммам разности фаз при приближении к его кровле. Практическая значимость решения этой задачи состоит в том, что коэффициент 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.

4. Созданы новые способы обработки и интерпретации данных прибора для каротажа в процессе бурения методом переходных процессов. Каротаж методом переходных процессов обладает определенными преимуществами по сравнению с частотными зондированиями. Соискатель подробно описывает разработанные им методы определения углов наклона и азимута пластов, оперативной инверсии и сжатия данных, приводит соответствующие блок-схемы. Применение этих методов при обработке и инверсии данных повышает эффективность геонавигации и достоверность определения удельного электросопротивления вскрываемых скважиной пластов.

Метод определения углов наклона и азимута пластов основан на разложении в ряд измеренных многокомпонентных сигналов, определении слагаемых, зависящих только от параметров однородной среды, и получения из них главных компонент путем поворота. На численных примерах показаны все детали алгоритма, установлено, какова погрешность определения углов для реально созданного зонда.

Метод оперативной инверсии основан на простой идее трансформации измеренных сигналов в частотную область, где численное моделирование данных и, соответственно, инверсия быстрее в сотни раз. Сложность реализации этой идеи состоит в том, что сигналы записываются на ограниченном отрезке времени, недостаточном для корректного преобразования Фурье в частотную область. Автор разработал способ модификации сигнала для преобразования с хорошей точностью. Численными примерами для реального зонда пошагово показан весь алгоритм, а для полученных частотных сигналов исследована разрешающая способность в сравнении с исходными сигналами. Расчеты показали, что частотные сигналы восстанавливаются с погрешностью, не превышающей ошибку измерений, а разрешающая способность преобразованных сигналов сравнима с исходной.

Методы сжатия данных для передачи на поверхность основаны на сплайн-аппроксимации сигнала и на конструировании ортогонального базиса в пространстве измерений и описании каждого сигнала как линейной комбинации векторов из этого базиса. Методы характеризуются простотой реализации, высокой скоростью, применимостью к различным трансформациям сигнала. Соискателем установлено, что для описания сигнала достаточно 6 – 11 значимых параметров вместо тысяч регистрируемых значений сигнала.

5. Разработан метод определения удельного электрического сопротивления и коэффициента анизотропии в зоне проникновения и

коррекции коэффициента глинистости на основе комплексирования данных многочастотных, многозондовых и многокомпонентных измерений, электрического имиджера и гамма-каротажа. На практике электрофизические параметры зоны проникновения могут быть использованы 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. Большое внимание соискателем уделено проработке алгоритма метода. Детально описана последовательность действий с указанием используемых на каждом шаге данных различных каротажных методов. Теоретически обоснован способ исправления значения коэффициента глинистости. Для демонстрации результатов использованы синтетические и практические данные. Таким образом, путем комплексирования данных каротажных методов в рамках единых моделей без проведения дополнительных измерений значительно уточняется геоэлектрическое строение и петрофизические характеристики около скважинного пространства.

Структурно диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объем работы - 340 страниц текста, 124 рисунка, 26 таблиц. Библиографический список содержит 305 наименований. Оформление работы соответствует предъявляемым требованиям, все исследования и результаты достаточно подробно и понятно изложены.

Замечания.

1. Какая глубина исследований прибора для каротажа в процессе бурения (ВИКПБ)? При обосновании его возможностей для определения расстояний до границ пластов об этом ничего не сказано. Заметим, что современные зарубежные приборы каротажа в процессе бурения обладают значительной глубиной исследования, составляющей десятки метров. Это необходимо для точной проводки скважины в целевом пласте-коллекторе
2. В результате инверсии данных определяются параметры модели среды. Какие критерии (кроме хорошей апробации на синтетических моделях) достоверности построенной модели?
3. При инверсии в наклонно-горизонтальных скважинах используется подход определения модельных параметров в некотором выбранном окне, которое перемещается вдоль скважины. В диссертации не обсуждаются общие способы и критерии выбора скользящего окна инверсии. Понятно, что выбор размера окна может существенно повлиять на результат инверсии. Указанные замечания не снижают общей высокой оценки проведенных исследований.

Считаю, что представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой (от научной идеи до практического применения), в которой решена **крупная научная проблема** по созданию новых методов исследования в нефтегазовых скважинах, развитию способов интерпретации данных и разработке высокопроизводительного программно-алгоритмического обеспечения электромагнитного каротажа. Результаты исследований являются значительным вкладом в теорию электромагнитных зондирований и имеют **важное практическое значение** для оперативного решения задач промысловой геофизики. Разработанные соискателем алгоритмы и программы всесторонне протестированы с использованием известных аналитических и численных решений на основе конечно-разностных и конечно-элементных методов, опробованы на практических данных. Корректное использование аппарата математической физики и вычислительной математики и широкая апробация на практических данных позволяют сделать вывод о высокой степени обоснованности и достоверности проведенных исследований. Все результаты, полученные в диссертации, полностью отражены в опубликованных работах. Основные результаты опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях из списка ВАК, доложены на международных и российских конференциях. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Считаю, что диссертационная работа **Марины Николаевны Никитенко** «Оперативное моделирование и интерпретация в современных технологиях электромагнитного каротажа», представленная на соискание **степени доктора технических наук по специальности 1.6.9 – «Геофизика»**, отвечает критериям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Официальный оппонент - заведующий лабораторией математической геофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук», чл.-корр. РАН, профессор, д.ф.-м.н.

Петр Сергеевич Мартышко

Даю согласие на обработку персональных данных.

«12» января 2022 г.