

ОТЗЫВ

официального оппонента – доктора физико-математических наук,
профессора, члена-корреспондента РАН В.Н. Глинских
на диссертационную работу Дениса Владимировича Вагина «Методы и реализующее их
программное обеспечение для решения трехмерных прямых и обратных задач
геоэлектромагнетизма, термоупругости и многофазной фильтрации», представленную на
соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.18 –
Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Актуальность темы

Развитие методов вычислительной математики и создание на их основе конкурентоспособных и импортозамещающих программных комплексов – приоритетная задача научно-технического развития и экономического роста Российской Федерации. Сюда непосредственно примыкает стратегически важная область поиска и разведки полезных ископаемых, в которой повышение качества обработки измеренных данных предопределяет успешность проводимых геофизических исследований. Наиболее важные составляющие обработки данных – эффективные подходы к трехмерному моделированию и решению обратных задач. Однако многие исследователи рассматривают эти задачи независимо: при развитии методов решения прямых задач не анализируется их эффективность при решении обратных задач. Другая группа исследователей развивает методы решения обратных задач с демонстрацией их работоспособности на относительно простых моделях. В результате, соответствующие методы решения прямых и обратных задач для решения реальных практических проблем недостаточно результативны. Как следствие, на практике используются упрощенные подходы к интерпретации данных, основанные на одномерной или, что значительно реже, двумерной численной инверсии. Такие подходы применительно к пространственно-неоднородным объектам неизбежно приводят к ошибкам интерпретации и существенному снижению качества получаемого результата. В связи с этим, чрезвычайно актуальна проблема разработки методов решения трехмерных прямых и обратных задач геоэлектромагнетизма.

Помимо задач поиска и разведки полезных ископаемых, актуальны также задачи рациональной эксплуатации месторождений. Они подразумевают построение адекватных цифровых моделей месторождений путем решения обратных задач. По сути, необходимо решать те же проблемы, что и в задачах поиска и разведки. Важным является реализация разрабатываемых методов и подходов в виде программного обеспечения, удобного для использования специалистами-интерпретаторами. Поэтому актуальна разработка программных комплексов с развитым интерактивным интерфейсом, снабженным удобными средствами управления для решения широкого спектра задач разной степени сложности.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

На защиту автор диссертационной работы выносит методы и вычислительные схемы решения трехмерных задач геоэлектродинамики, термоупругости и многофазной фильтрации, а также созданные на их основе программные комплексы.

Первое защищаемое положение связано с разработанным методом решения электроразведочных задач в средах с искривленными поверхностями слоев. Рассматриваются конечноэлементные вычислительные схемы моделирования стационарных, нестационарных и гармонических полей для различных технологий электроразведки. Предложенный метод решения трехмерных задач в средах с искривленными границами слоев верифицируется другим подходом, где сложная геометрия границы аппроксимируется ступеньчатой формой. Вычислительная эффективность предложенного метода обосновывается результатами сравнения с решениями, полученными при задании источника в трехмерной постановке.

Второе защищаемое положение соотносится с разработанным методом расчета откликов индукционной вызванной поляризации во временной области. Предложенный метод верифицируется сопоставлением с расчетами в частотной области, а также с результатами других авторов, при этом преимуществом предложенного метода является высокая вычислительная эффективность.

Третье защищаемое положение посвящено методам решения трехмерных анизотропных задач геоэлектромагнетизма, термоупругости и многофазной фильтрации. Автор применяет весьма универсальный подход к построению трехмерных дискретизаций. Так, для задач геоэлектромагнетизма и многофазной фильтрации используется прообраз расчетной области, а для задач термоупругости – образ отдельных подобластей элементов конструкций, с заданием трехмерных свойств материалов в локальной системе координат. Выполнена верификация учета анизотропии: для задач геоэлектромагнетизма – на тонкослойных моделях и трехмерной задаче с повернутыми осями координат, для задач многофазной фильтрации – сравнением с известными тестами, а для задач термоупругости – с аналитическими решениями.

Четвертое защищаемое положение затрагивает построение согласованного базиса на неконформных трехмерных сетках. Выбранная процедура согласования позволяет применять разные варианты дробления сетки и учета сложных границ трехмерных неоднородностей. В то же время, не для каждой полученной такими дроблениями сетки возможно построение матрицы перехода. Для решения указанной проблемы автором разработана процедура нахождения таких особенностей с дальнейшей корректировкой сетки. Это позволило эффективно решать задачи с большим числом произвольно расположенных трехмерных неоднородностей при численной инверсии.

Пятое и шестое защищаемые положения связаны с решением обратных задач геоэлектромагнетизма и многофазной фильтрации. Разработанные подходы к трехмерной инверсии подразумевают параметризацию как свойств, так и геометрии расчетной области. Рассмотрены специальные методы вычисления производных сигналов по целевым параметрам обратной задачи, а также методы адаптивной регуляризации, обеспечивающие быструю и стабильную сходимость метода Гаусса-Ньютона. Эффективность разработанных методов и достоверность получаемых решений убедительно демонстрируется на синтетических и полевых электроразведочных данных для нефтяного месторождения в Татарстане.

Седьмое и восьмое защищаемые положения касаются созданных программных комплексов решения задач геоэлектромагнетизма, термоупругости и многофазной фильтрации. Их архитектура гибко учитывает особенности используемой вычислительной среды (распараллеливание в сети и над общей памятью), а также специфику реализованных вычислительных схем. Разработанные программные комплексы в полной мере учитывают особенности решаемых задач, обеспечивая удобство их использования специалистами нефтепромысловой отрасли. Возможность практического применения созданных комплексов подтверждена пятью актами внедрения.

Оценка новизны предложенных решений и достоверности результатов

Предложенный метод решения прямых задач геоэлектромагнетизма («метод двойного выделения») позволяет достигать высокой вычислительной эффективности при решении трехмерных задач с существенно искривленными границами слоев. Для получения трехмерных полей индукционной вызванной поляризации предложен метод построения аппроксимаций во временной области. Указанные методы открывают новые возможности для решения обратных задач с использованием геометрической параметризации.

Предложенный метод построения аппроксимаций на неструктурированных шестигранных сетках с произвольными локальными дроблениями ячеек обеспечивает как гибкий учет сложной геометрии расчетной области с множеством трехмерных неоднородностей, так и высокую точность получаемого решения.

С целью учета анизотропии физических свойств среды и материалов конструкций при конечноэлементном решении трехмерных задач геоэлектромагнетизма, термоупругости и многофазной фильтрации, автором предложен метод, обеспечивающий достаточно простое задание анизотропных свойств среды.

На основе геометрической параметризации внутренних границ расчетной области разработаны новые подходы к решению трехмерных обратных задач геоэлектромагнетизма и многофазной фильтрации. Они включают особые локальные ограничения на геометрические параметры, а также специальные методы расчета производных откликов по геометрическим и физическим параметрам.

На базе разработанных математических методов автором созданы программные комплексы, посредством которых проведены многочисленные вычислительные эксперименты, и решены задачи несомненной практической направленности.

Полученные результаты всесторонне верифицированы: путем сравнения с расчетами в одномерных моделях, с аналитическими решениями, использованием других методов и вычислительных схем, а также результатов других авторов для сравнительного анализа. Подтверждение выявленных в результате инверсий целевых объектов данными бурения, а также совпадение прогноза по полученной цифровой модели месторождения нефти с фактическими данными нефтедобычи указывают на высокую степень достоверности результатов диссертационной работы.

Общие замечания по диссертационной работе

1. При формулировке задачи (1.1) вводится векторный потенциал электромагнитного поля, при помощи которого определяются магнитное и электрическое поля. При этом, в явном виде не вводится калибровка векторного потенциала, которая позволила бы однозначно его определить. Без введения калибровки векторный потенциал определен с точностью до градиента любой скалярной функции. Или же в работе используется нестандартный векторный потенциал? Тогда это тоже требует пояснения и четкого определения, во избежание путаницы с общепринятой теорией, использующей векторный электромагнитный потенциал.

2. Для получения аппроксимации электромагнитных полей вводится векторная вариационная постановка относительно векторного потенциала. С тем же успехом данная постановка может быть построена относительно электрического поля. В связи с этим возникает вопрос: почему задача моделирования электромагнитных полей формулируется относительно векторного потенциала, а не электрического поля? Все построения, приведенные в диссертации (выделение первичных и вторичных полей), используемые для уменьшения времени моделирования, могут без значительных изменений быть сформулированы относительно электрического поля. Какое преимущество дает использование векторного потенциала в данном случае? Это особенно актуально, если учесть, что получение электромагнитных полей из векторного потенциала требует дифференцирования либо по времени, либо по пространству, что снижает точность полученного приближенного решения.

3. В диссертации не рассматривался важный класс задач промысловой геофизики – задачи электромагнитного каротажа, в том числе каротажа в процессе бурения, при котором производится все больший объем исследований, и где очень важен учет характерных неоднородностей (разломов, сбросов, выклиниваний). В связи с этим неясно, насколько разработанные в диссертации методы применимы для решения этого типа задач? Какова будет скорость обработки данных? Возможна ли инверсия данных в реальном времени для процесса бурения или все-таки трехмерная инверсия применима только при постобработке?

4. Для подтверждения корректности решения обратной задачи многофазной фильтрации использовалась обработка части данных и сравнение оставшихся данных с прогнозом. Похожая схема могла бы быть использована и при решении задач электроразведки: провести восстановление среды по одной части наблюдений и сравнить теоретические и практические данные, полученные по другой части наблюдений. Проводились ли такие эксперименты?

5. Каковы критерии и гарантии правильности получаемого решения, и как решается проблема эквивалентности, которая существенно возрастает при трехмерной инверсии по сравнению с одномерной?

6. Непонятно, по каким принципам определяются размеры блоков стартовой модели для задач геоэлектрики.

7. С сожалением должен отметить, что, на фоне хорошего оформления самой диссертации, иллюстрации в автореферате нечеткие (не вполне качественные, далеко не безупречны) и затрудняют восприятие информации.

Заключение

В диссертации содержатся новые решения в сфере разработки вычислительно-эффективных методов трехмерного моделирования геоэлектромагнитных полей, решения трехмерных многопараметрических обратных задач и создания проблемно-ориентированных программных комплексов на их основе. Полученные результаты имеют важное значение для развития программно-математического сопровождения технологий электромагнитных зондирований земных недр и технологий нефтедобычи.

Основные научные результаты диссертации в достаточной степени опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Всего по теме исследований опубликовано 55 научных работ, из которых 12 научных публикаций в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК для защиты докторских диссертаций, 26 научных публикаций, индексируемых в международной информационно-аналитической системе Web of Science (из них 4 публикации в журналах первого квартиля), и 34 научные публикации, индексируемые в международной информационно-аналитической системе Scopus (из них 6 публикаций в журналах первого квартиля). Личный вклад автора в совместных публикациях соответствует рассматриваемым в диссертации задачам. Автореферат в достаточной мере отражает представленные в диссертации основные идеи, выводы и результаты.

Диссертационная работа Вагина Д.В. «Методы и реализующее их программное обеспечение для решения трехмерных прямых и обратных задач геоэлектроматизма, термоупругости и многофазной фильтрации» является завершенной научной работой на актуальную тему и отвечает требованиям ВАК РФ, установленным для докторских диссертаций в пунктах 9 – 14 «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор, Вагин Денис Владимирович, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент,
член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, директор
Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук», специальность: 1.6.9 – Геофизика (физико-математические науки).

Дата: 04.07.2022 г.

Глинских Вячеслав Николаевич

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, д. 3
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения наук» (ИНГГ СО РАН)

Сайт: <http://www.ipgg.sbras.ru/ru>

E-mail: GlinskikhVN@ipgg.sbras.ru

Тел.: 8 (383) 330-45-05

*Отзыв получен
в совет 11.07.2022.
Вагин*

*С отзывом ознакомлен
11.07.2022
Вагин*