

## ОТЗЫВ

официального оппонента – кандидата технических наук А. А. Белой на диссертацию Киселева Д.С. «Разработка методов моделирования геоэлектромагнитных полей и восстановления трехмерных сред с искривленными границами геоэлектрических слоев», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Представленная работа посвящена **актуальной** проблеме обработки разведочных данных, требующей эффективных методов 3D моделирования электромагнитных полей в сложных геологических средах и восстановления параметров таких сред с помощью многомерной нелинейной инверсии данных различных технологий съемки. Также существенная часть работы нацелена на разработку программного обеспечения, позволяющего эффективно решать практические задачи.

Работа написана понятным грамотным языком, хорошо структурирована. Состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы (123 наименования) и приложения. В ней приводятся математические модели для решения прямых и обратных задач электроразведки и магниторазведки с учетом градиентометрии в сложных средах, включающих слои переменной толщины и трехмерные объекты сложной формы. Рассматривается решение прямой задачи магниторазведки с помощью метода конечных элементов и с использованием аналитических формул для расчета откликов от объектов, имеющих собственную намагниченность или аномальную магнитную проницаемость. Моделирование электромагнитных полей в задачах электроразведки предлагается выполнять с помощью метода конечных элементов на несогласованных шестигранных сетках и технологии выделения поля, позволяющей исключить источник электромагнитного поля из расчетной области. Для задач аэроэлектроразведки обоснована необходимость учета искривлений дневной поверхности и границ между слоями и показаны возможные ошибки при моделировании сигналов в приемниках и обработке практических данных в случае, когда геометрия границ не учитывается. Для разных методов аппроксимации искривленных границ проведено сравнение вычислительной эффективности, определяющее, в каких случаях лучше применять тот или иной метод.

Предложены подходы к сокращению вычислительных затрат при решении задач электроразведки, характеризующихся большим количеством положений приемно-генераторной установки. Они основываются на использовании прямых решателей СЛАУ с группированием положений приемно-генераторной установки, в результате которого формируется набор независимых подзадач, и построением кусочно-равномерной сетки по времени для группирования подзадач во временной области, что позволяет сократить количество перестроений матрицы конечноэлементной СЛАУ и ее факторизации.

Рассмотрена параметризация обратных задач электроразведки, позволяющая восстанавливать как латеральные неоднородности сопротивления внутри слоев, так и форму самих слоев. Неоднородности в слоях определяются с помощью блочных структур, латеральные границы блоков которой перемещаются в ходе инверсии, восстанавливая форму объектов. Восстановление геометрии границ между слоями выполняется с помощью опорных точек,  $Z$ -координаты которых являются параметрами инверсии и определяют форму границы. В работе приведены примеры восстановления параметров среды в задачах морской и аэроэлектроразведки. Данные для этих примеров были синтезированы с помощью довольно сложных моделей, в которых целевые объекты перекрываются объектами повышенной проводимости, расположенными над ними, что соответствует реальным условиям, существенно осложняющим восстановление целевых объектов.

Для задач магниторазведки рассмотрена параметризация с представлением среды в виде множества точечных источников, имитирующих влияние аномальных по намагниченности или магнитной проницаемости объектов. Для этих задач приведены примеры инверсии на синтетических данных, демонстрирующие корректность восстановления целевых геологических объектов наряду с объектами-помехами разного происхождения.

В работе приведено описание программных реализаций предложенных методов и алгоритмов. Особое место среди этих реализаций занимают интерактивные графические пре- и постпроцессоры, разработанные для решения рассмотренных прямых и обратных задач. Препроцессор снабжен широким инструментарием, позволяющим существенно упростить работу пользователя. Это касается как задания геологических моделей, так и конфигурации приемно-генераторной установки, а также параметризации обратной задачи. Постпроцессор позволяет в удобном виде просматривать результаты решения прямых и обратных задач с возможностью построения по результатам инверсии визуализаций геометрии области и полученных распределений электрофизических характеристик восстановленной среды.

**Обоснованность и достоверность** результатов, полученных автором, подтверждаются в первую очередь верификацией решения прямых задач, лежащих в основе всех исследований и численных экспериментов, приведенных в работе. Для прямых задач электроразведки проводилось сравнение решения задачи в одномерной среде в 2D и 3D постановках. Отличия в вычисленных с использованием разных постановок сигналах составили менее 1%. Проведено также сравнение результатов моделирования с результатами других авторов (материал из статьи в Journal of Applied Geophysics из квантили Q2, авторы Yin C., Qi Y., Liu Y., Cai J.) на четырех трехмерных моделях, отличающихся геометрией дневной поверхности и включаемыми трехмерными объектами. Отличия с результатами решения разных трехмерных задач, приведенных в этой статье, лежат в диапазоне 3-6%. Для задачи магниторазведки сравнивались сигналы, вычисленные с помощью двух разных моделей. Отличие составило не более 2%, что подтверждает корректность результатов, полученных с помощью обеих моделей.

Корректность разработанных методов инверсии подтверждается продемонстрированными результатами их работы для смоделированных сигналов, когда истинные модели известны. Данные аэро и морской электроразведки получены на сложных моделях, в которых целевой объект перекрыт неоднородностями сопротивления в верхних слоях. В результате инверсии были довольно точно восстановлены границы и сопротивление как приповерхностных неоднородностей, так и целевого объекта.

Данные для задачи магниторазведки были также синтезированы с помощью сложных моделей, включающих различные осложняющие факторы – траппы, объекты даечной формы, техногенные объекты. В результате инверсии положение и форма целевых объектов были достаточно хорошо описаны точечными источниками, равно как и объекты-помехи.

**Научная новизна** диссертации заключается в предложенной для решения задач магниторазведки модели для восстановления неоднородностей намагниченности или магнитной проницаемости среды, а также в предложенных методах описания сложной геометрии сред в прямых и обратных задачах электроразведки. Разработанные методы аппроксимации 3D неоднородностей среды и группирования подзадач позволили существенно повысить вычислительную эффективность программных реализаций и расширить класс доступных для решения трехмерных задач электроразведки. На основе выполненных в рамках диссертационной работы исследований автором создано программное обеспечение, способное решать новые важные задачи обработки данных электроразведки и магниторазведки с учетом градиентометрии.

Полученные в работе результаты представляют большой **практический интерес** для обработки геофизических данных, поскольку разработанные в работе средства существенно расширяют возможности обработки данных, обладая при этом высокой вычислительной эффективностью. Это также подтверждается тем, что результаты работы уже применяются для решения практических задач. В диссертационной работе указаны регионы, для которых проводилась обработка данных с использованием разработанных средств.

Результаты работы **опубликованы** в 22 печатных работах, из которых 3 в изданиях, рекомендуемых ВАК, 6 в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus, 6 в изданиях, индексируемых в Scopus, получено 12 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ. Содержание автореферата полностью соответствует диссертационной работе.

По изложенному в диссертации материалу можно сделать следующие **замечания**:

1. Обратные задачи, как известно, являются некорректными, поэтому к ним применяются различные регуляризации, о которых говорится в работе. Однако, в работе не сказано, каким образом выбираются значения параметров регуляризации и как это влияет на сходимость процедуры инверсии.

2. В работе говорится, что конечноэлементные сетки строятся полностью автоматически, и при этом обеспечивается требуемая точность решения, что подтверждается большим числом проведенных вычислительных экспериментов. Это очень важный результат, но в работе не приведено детального описания соответствующих алгоритмов.

3. В работе рассмотрен способ восстановления формы искривленных границ с использованием опорных точек. Интересно было бы сравнить этот подход, например, с подходом, когда форма поверхности восстанавливается варьированием верхних и нижних границ блоков, используемых для 3D-инверсии блочных структур.

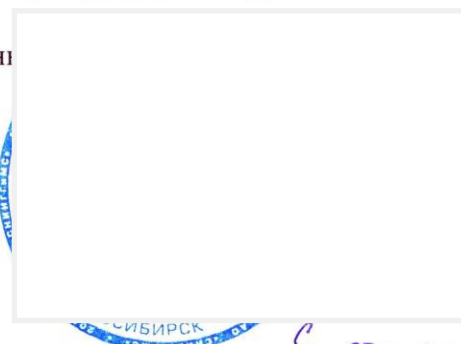
4. Для расчета электромагнитного поля используется технология выделения поля источника. Не совсем понятно, применима ли такая технология для наземных исследований, когда источник лежит на поверхности Земли с сильными перепадами высот, и если применима, то как в этом случае учитывать источник.

Указанные замечания нисколько не умаляют основных достоинств работы и не оказывают существенного влияния на общую положительную оценку работы. Представленная диссертационная работа является законченной научно-квалификационной работой, выполненной в соответствии с требованиями Положения о присуждении ученых степеней, и полностью соответствует специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Автор работы, Киселев Дмитрий Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент, к.т.н., заведующая лабораторией математического моделирования отдела инновационных технологий АО «СНИИГТИМС»,  
630091, г. Новосибирск, Красн  
Телефон: (383)2309478  
E-mail: Belaya@sniiggims.ru

« 5 » декабря 2019 г.

Отзыв получен  
в совет 5.12.2019  
А



Белая А.А.  
ПОДПИСЬ А.А. Белая  
ЗАВЕРЯЮ  
ЗАВ КАНЦЕЛЯРИЕЙ  
ГАНИНА Т.А.  
ДАТА

С отзывом ознакомлен  
5.12.2019 А.А.