

Отзыв

официального оппонента – доктора геолого-минералогических наук П.Ю. Пушкарева на диссертацию Киселева Дмитрия Сергеевича «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

Актуальность темы данной работы обусловлена тем, что при сопровождении поисково-разведочных работ требуются все более детальные методы интерпретации данных, позволяющие при этом получать результат за приемлемое время. Диссертационная работа Киселева Д.С. посвящена созданию ориентированных на широкое практическое использование математических и программных средств для выполнения многомерных инверсий данных электроразведки и магниторазведки в средах со сложной геометрией – слоями переменной толщины и неоднородностями в них, имеющими сложную форму. Предложенные в данной работе методы многомерной инверсии основаны на геометрической инверсии, в которой наряду с электромагнитными свойствами подразумевается описание и подбор геометрии слоев и неоднородностей.

Научная новизна работы заключается в предложенных подходах к выполнению инверсий в сложных трехмерных средах с возможностью восстановления ее геометрических характеристик и электромагнитных свойств. В работе рассмотрены и проанализированы разные подходы к описанию сложной геометрии среды и восстановлению ее в ходе инверсии. Для задач электроразведки представлены разные способы аппроксимации геометрии изогнутых слоев - «ступеньками» и «искривленными» шестигранниками. С целью установления их сильных и слабых сторон был проведен сравнительный анализ, результаты которого приведены в работе. Такой анализ позволяет выбрать наиболее эффективные стратегии решения обратных задач, особенностью которых является восстановление геометрии искривленных границ между слоями. Предложен метод параметризации для описания изогнутых поверхностей с помощью так называемых опорных точек, перемещение которых вдоль вертикальной оси меняет форму поверхности, описывающей границу между слоями. Такой подход позволяет более детально восстанавливать среду и выявлять целевые объекты, отклики

от которых перекрываются влиянием геометрии границ слоев и неоднородностей в верхней части разреза.

Влияние геометрии среды на сигналы в приемниках было наглядно продемонстрировано в диссертационной работе с помощью вычислительных экспериментов. С их же помощью обоснована необходимость более детального учета геометрии при решении обратных задач. В работе также приводится множество примеров инверсий с восстановлением формы границ между слоями для довольно сложных моделей, имитирующих реальные условия.

Существенной новизной обладает также предложенный в работе подход к инверсии данных магнитной съемки, в котором восстановление намагниченных объектов осуществляется с помощью точечных источников, положение и намагниченность которых подбираются в ходе инверсии. Сигналы в приемниках для таких источников рассчитываются по аналитическим формулам, что, очевидно, существенно ускоряет процесс трехмерной инверсии. В работе приведено несколько примеров инверсии данных магниторазведки с учетом градиентометрии, демонстрирующих возможность выявлять целевые объекты и довольно точно определять их местоположение в присутствии мощных объектов-помех.

Поскольку решение задач рассматриваемого класса требует больших вычислительных затрат, отдельно стоит отметить тот факт, что в работе уделено немало внимания их снижению. Рассмотренные в работе подходы позволяют на порядки сократить время, необходимое для выполнения инверсии, что также является существенным результатом работы.

Представленные в работе методы и алгоритмы реализованы в рамках программного комплекса для выполнения 3D инверсий, обладающего важными новыми возможностями решения наиболее сложных задач электроразведки. Комплекс снабжен препроцессором, обладающим богатым инструментарием и интуитивно понятным графическим интерфейсом. Из основных преимуществ препроцессора можно выделить средства построения моделей для решения прямых задач и в качестве начальных приближений для инверсии, построение систем наблюдений, контроля выполнения задач и визуализации данных и моделей. Инструментом, представляющим отдельный интерес, является средство создания объектов, имеющих в плане сложную форму, что дает возможность создавать максимально реалистичные модели геологических сред. Интерактивное редактирование приемно-генераторной установки также представляет большой интерес, поскольку

позволяет оперативно проводить оптимизацию установки при решении соответствующих задач. Важной при интерпретации данных является визуализация сред с отображением изгибов слоев и возможностью построения срезов и разрезов. В разработанном препроцессоре этот аппарат реализован довольно качественно и широко использовался при представлении результатов диссертационной работы. В целом такое программное обеспечение является мощным и удобным инструментом и существенно повышает качество и эффективность работы геофизика-интерпретатора.

Обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в работе, подтверждается большим количеством проведенных в работе исследований и вычислительных экспериментов, на основании которых в работе обосновываются полученные результаты и сделанные выводы. **Достоверность результатов** вычислительных экспериментов подтверждается тем, что они представлены довольно детально с возможностью оценить адекватность и эффективность предложенных подходов и их программной реализации. В частности, большое количество примеров инверсий с подробным их описанием и приведенными промежуточными и конечными результатами позволяет сделать выводы о корректности разработанных методов. Стоит отметить и представление результатов работы на множестве конференций, что также служит подтверждением достоверности полученных результатов.

Практическая значимость полученных в работе результатов заключается в том, что решается важная проблема повышения качества и эффективности интерпретации геофизических данных при сопровождении поисково-разведочных работ. Предложенные в работе средства применимы для сопровождения таких работ и уже использовались при интерпретации данных, полученных на нескольких перспективных площадях.

Диссертационная работа хорошо структурирована, изложена последовательно и логично. Объем диссертации – 191 страница. Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы (123 наименования) и приложения. **Автореферат** достаточно полно отражает основные идеи и выводы диссертационной работы. Основные результаты диссертации **опубликованы** в 22 работах, из которых 3 в изданиях, рецензируемых ВАК, 6 в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, 6 в изданиях, индексируемых в Scopus. Зарегистрировано 12 программ для ЭВМ, реализующих разработанные подходы и методы.

Замечания:

1) Автор много ссылается на современные работы по теме диссертации, но нет упоминания более старых, но значимых работ (правда, касающихся магнитотеллурики), например:

- Wannamaker P.E., Stodt J.A., Rijo L. Two-dimensional topographic responses in magnetotellurics modeled using finite elements. *Geophysics*, 1986, vol. 51, no. 11, p. 2131-2144.

- Варенцов Ив.М. Общий подход к решению обратных задач магнитотеллурики в кусочно-непрерывных средах. *Физика Земли*, 2002, № 11, с. 11-33.

- de Groot-Hedlin, C. and Constable, S. Inversion of magnetotelluric data for 2D structure with sharp resistivity contrasts. *Geophysics*, 2004, vol. 69, no. 1, p. 78-86.

Кроме того, среди цитируемых авторов есть М.С. Жданов, но не упоминается предложенный им "фокусирующий" стабилизатор, позволяющий автоматически получать контрастные модели среды.

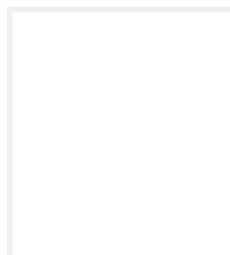
2) Второе замечание касается структуры диссертации. Половину её объёма занимает глава "Вычислительные эксперименты", в которой представлены и проанализированы результаты расчетов с помощью разработанных автором алгоритмов. Наверное, с точки зрения специальности, по которой защищается автор, это оправдано. Но при этом затрагивается ряд разных геофизических задач, и хотелось бы видеть какую-то систематизацию полученных результатов и выводы применительно к использованию рассмотренных геофизических технологий.

3) Автором сделано заключение, что предложенные им методы и программы работают корректно, и это достаточно убедительно показано. Но геологические задачи с использованием рассматриваемых технологий электроразведки и магниторазведки решались и раньше. Важно уточнить, в чём преимущество реализованных автором подходов с этой точки зрения?

Заключение. Указанные замечания не уменьшают достоинства работы в целом. Диссертация «Разработка методов моделирования геоэлектромагнитных полей и восстановления трехмерных сред с искривленными границами геоэлектрических слоев» является завершённой научно-квалификационной работой, соответствует специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, полностью отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к

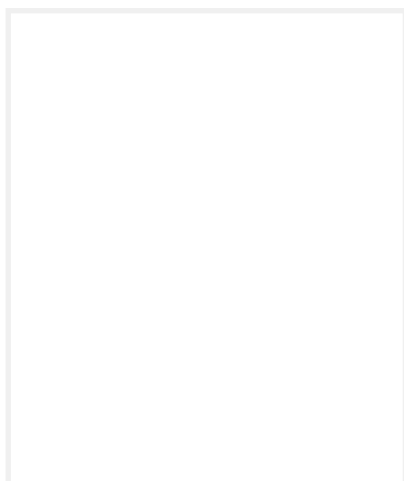
кандидатским диссертациям, а ее автор, Киселев Дмитрий Сергеевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент, д.г-м.н., доцент,
профессор кафедры геофизических методов
исследования земной коры геологического
факультета Федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Московский
государственный университет имени
М.В. Ломоносова»,
119991, Москва, Ленинские горы, 1,
Телефон: 8(495)939-4912
E-mail: pavel_pushkarev@list.ru



Пушкарев П.Ю.

«4» декабря 2019 г.



ряю
ф-та
бер

Отзыв поступил
в совет 5.12.2019
[Signature]

С отзывом ознакомлен
5.12.2019 *[Signature]*