

## **Отзыв официального оппонента**

доктора геолого-минералогических наук Пушкарева Павла Юрьевича  
на диссертацию Сивенковой Анастасии Павловны  
«Методы и алгоритмы трехмерной обработки данных высокоразрешающих  
технологий электромагнитных зондирований»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные  
методы и комплексы программ»

### **1. Актуальность темы диссертации**

Методы электромагнитных зондирований широко применяются для решения различных геологических задач, включая поиск и разведку месторождений полезных ископаемых, гидрогеологические и инженерно-геологические задачи. В настоящее время одной из ключевых проблем при развитии этих методов является повышение их разрешающей способности, особенно в сложных геологических условиях, когда целевые объекты перекрыты неоднородными слоями. Достижение этой цели возможно, с одной стороны, за счет совершенствования аппаратуры и способов подавления помех, а с другой — путем развития методов построения геофизических моделей по измеренным данным. Эффективность этого напрямую зависит от уровня развития алгоритмов 3D-моделирования и 3D-инверсии. Таким образом, актуальность работы обусловлена необходимостью разработки новых методов проведения геофизических исследований и интерпретации данных и требованиями повышения разрешающей способности электромагнитных технологий и достоверности геофизического прогноза.

### **2. Основные результаты и научная новизна**

В диссертационной работе Сивенковой А.П. получены следующие новые научные результаты, представляющие теоретический и практический интерес:

1) Разработан, реализован и апробирован в рамках программного комплекса алгоритм, позволяющий осуществлять встраивание трехмерных объектов в неконформные конечноэлементные сетки с обеспечением

совпадения сеточных поверхностей с границами трехмерных объектов. Ключевой особенностью предложенного метода является обеспечение точного совпадения границ сеточных разбиений с поверхностями встроенных трехмерных объектов. Данный подход был успешно апробирован на трехмерных задачах геоэлектрики, характеризующихся наличием значительного количества локальных неоднородностей. Кроме того, разработанный алгоритм показал высокую эффективность при его использовании в процедурах решения обратных задач, особенно при вычислении производных по геометрическим параметрам модели.

2) Разработаны методы численного трехмерного моделирования и инверсии, предназначенные для совместной инверсии данных электромагнитных и магнитных съемок. Ключевым результатом является создание методов, которые позволяют осуществлять оценку верхней границы значений магнитной восприимчивости для геологических тел (локальных структур) с высокой электропроводностью. Важной особенностью и новизной подхода является учет влияния неоднородных по электрическим и магнитным свойствам приповерхностных слоев, сигналы от которых сопоставимы с сигналами от целевых объектов. Предложенная методика обеспечивает корректное выделение сигналов и оценку свойств целевых объектов, расположенных под неоднородными слоями.

3) В рамках исследований новой геофизической электромагнитной технологии «Звезда» впервые разработана математическая модель, которая позволила дать количественное обоснование преимуществ указанной технологии в сравнении с существующими аналогами при поиске и разведке морских месторождений углеводородов, а также при мониторинге нефтенасыщенной зоны в процессе разработки месторождения.

4) Разработан способ анализа эквивалентности трехмерных геоэлектрических моделей, получаемых в результате решения обратной задачи. Метод позволяет количественно оценить пределы неопределенности для физических параметров и положения границ целевых геологических объектов, а также проанализировать влияние этой неопределенности на качество решения обратной задачи.

### **3. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов, рекомендаций и заключений**

Соискатель выполнил обзор современных подходов к трехмерной инверсии данных электромагнитных зондирований, методов построения расчетных сеток и актуальных задач интерпретации данных (совместная инверсия данных, оценка эквивалентности) с анализом существующих пробелов и недостатков, на преодоление которых и направлена данная работа. В основу выполненных разработок положены фундаментальные методы вычислительной математики и геофизики: метод конечных элементов (МКЭ) для решения прямых задач, метод Гаусса-Ньютона с адаптивной регуляризацией для решения обратных задач. Тщательная верификация разработанных методов и алгоритмов была проведена на синтетических данных. Алгоритмы построения оптимизированных сеток верифицированы сравнением с решениями на подробных сетках, а адекватность методов совместной инверсии подтверждена совпадением подобранных и истинных моделей на тестовых данных, имитирующих реальные ситуации – сложные геологические среды, в которых целевые объекты перекрыты неоднородными приповерхностными слоями. Обоснованность сформулированных научных положений подтверждена результатами многочисленных приведенных в диссертации вычислительных экспериментов. Эффективность разработанного метода совместной 3D-интерпретации подтверждена хорошим совпадением практических и расчетных данных на месторождении Creighton (Канада), а также данными бурения. Все разработанные методы и алгоритмы реализованы в виде проблемно-ориентированного программного комплекса, а их апробация и практическое использование подтверждены актами внедрения, что свидетельствует не только о теоретической, но и о практической состоятельности исследований.

### **4. Практическая значимость результатов работы**

Разработанные вычислительные модули и инструментальные средства графического пользовательского интерфейса в составе указанного проблемно-ориентированного программного комплекса находят применение при

планировании и проектировании полевых электроразведочных исследований. Реализованные в программном комплексе возможности позволяют решать задачи, связанные с оптимизацией и разработкой новых конфигураций измерительных установок, а также осуществлять совместную трехмерную интерпретацию данных электромагнитных и магнитных съемок с последующим анализом эквивалентности построенных 3D-моделей.

В результате проведенных работ разработаны и прошли официальную государственную регистрацию в ФИПС (Роспатент) три программы для ЭВМ. Данное программное обеспечение было успешно внедрено в практику геофизических исследований и применялось для решения задач планирования полевых геологоразведочных работ и трехмерной интерпретации практических данных. Апробация и практическое использование подтверждены актами внедрения.

Результаты диссертационного исследования нашли практическое применение при выполнении ряда крупных научно-исследовательских проектов.

## **5. Оценка структуры, содержания и оформления диссертации**

Диссертация Сивенковой А.П. представляет собой заверченный научный труд, в котором содержится решение научной проблемы разработки и программной реализации новых методов решения прямых и обратных задач, нацеленных на повышение разрешающей способности геофизических методов и достоверности получаемых результатов. Предложенные подходы в достаточной степени обоснованы и верифицированы и обладают научной новизной. В диссертации приводятся сведения о практическом использовании полученных научных результатов.

Диссертация хорошо структурирована, материалы изложены в логической последовательности. Объем диссертации – 173 страницы. Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы (139 наименований) и 2 приложений. По структуре, содержанию и стилю изложения, глубине научных исследований работа соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Автореферат достаточно полно отражает основные положения и научные результаты диссертации, выносимые на защиту.

## **6. Публикации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 30 научных работах. Из них 3 статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК РФ. Восемь работ опубликовано в изданиях, индексируемых в международной базе данных Web of Science (включая 1 работу в журнале квартиля Q1, 3 работы в журналах квартиля Q2 и 3 работы в журналах квартиля Q3). 20 работ опубликовано в изданиях, индексируемых в международной базе данных Scopus (включая 2 работ в журналах квартиля Q1 и 4 работы в журналах квартиля Q2). 9 работ входит в «Белый список» журналов (4 работы в журналах первого уровня и 4 работы в журналах второго уровня). Получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

## **7. Замечания по диссертации**

Следует сразу оговориться, что в работе не обнаружено существенных ошибок, но можно высказать ряд замечаний, большинство из которых могут рассматриваться как пожелания на будущее или темы для обсуждения.

1. Термины, используемые в названии диссертации, в электроразведке могут иметь несколько иное значение. Так, под обработкой данных обычно понимается переход от измеренных сигналов к трансформантам, таким как кажущееся сопротивление, используемым для дальнейшего анализа и интерпретации. Название «высокоразрешающая электроразведка» в узком смысле относится к активно развивавшейся в конце XX века технологии выделения осцилляций на кривых зонирования становлением поля. Впрочем, в тексте работы автор поясняет, что имеет в виду под этими названиями.

2. Во введении автор выделяет два подхода к параметризации модели при решении обратной задачи: «voxel-инверсии» и «геометрические инверсии». Следует отметить, что имеет место близкая к предложенной классификация, в которой выделяются «сглаживающая» и «блочная» инверсии.

3. В работе детально обсуждается построение конечно-элементных сеток, но осталось непонятно: зависят ли размеры ячеек от времени становления поля и электропроводности среды? А также есть ли какие-то ограничения по соотношению размеров соседних ячеек?

4. Примеры 3D инверсии синтетических и наблюдаемых данных ЗС демонстрирует её хорошую работоспособность. Но для сравнительной оценки эффективности было бы интересно сопоставить полученные модели с результатами традиционной 1D инверсии данных ЗС.

5. Если я правильно понял предлагаемую стратегию инверсии геофизических данных, то автор выполняет последовательность инверсий, на первом этапе используя разбиение на равномерные блоки (выбор размера которых представляет непростую задачу) для локализации аномалий, и далее, на основе полученных результатов, задавая начальную геометрию аномалий для второго этапа инверсии. Не лучше ли на первом этапе использовать классическую сглаживающую (воксельную) инверсию?

6. При оценке эквивалентности полученной 3D геоэлектрической модели, не совсем понятно, почему автор предлагает делать это «при фиксированных параметрах остальных локальных структур». Казалось бы, лучше действовать так: изменить целевой объект и с помощью инверсии оценить, можно ли скомпенсировать это за счёт других частей модели.

7. Автором, с помощью разработанного аппарата решения прямых и обратных 3D задач ЗС, теоретически показана высокая эффективность технологии «Звезда» при нефтегазовых исследованиях на шельфе. Замечание не относится непосредственно к работе автора, но практическая реализация этой технологии на морском дне, требующая точного позиционирования довольно длинных электрических линий, представляется очень сложной.

8. В описании программного комплекса не хватает чёткости, а блок-схема запутанная. Желательно конкретнее прописывать, какие могут быть входные данные, какие операции совершает программа, что получается на выходе и т.д.

Однако сделанные замечания в существенной степени касаются того, что ещё хотелось бы видеть в работе, и не уменьшают её достоинств.

## 8. Общее заключение

Диссертация «Методы и алгоритмы трехмерной обработки данных высокоразрешающих технологий электромагнитных зондирований» отвечает всем требованиям, пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор, Сивенкова Анастасия Павловна, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент, профессор кафедры геофизических методов исследования земной коры Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (МГУ имени М.В. Ломоносова), доктор геолого-минералогических наук (по специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых)

\_\_\_\_ Пушкарев Павел Юрьевич  
«10» ноября 2025 г.

Я, Пушкарев Павел Юрьевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Доктор геолого-минералогических наук, доцент

\_\_\_\_ Пушкарев Павел Юрьевич

Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»,

119991, г. Москва, Ленинские

Тел.: +7 (495) 939-29-70,

E-mail: admin@geol.msu.ru

отзыв поступил в совет  
12.11.2025 *Вашин*

1 ОЗНАКОМЛЕНА  
12.11.2025 *Сиб*

*Кареев П. Ю.* заверяю  
й геологического ф-та  
М.Г. Вебер