

На правах рукописи



Сивенкова Анастасия Павловна

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ТРЕХМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ
ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
ЗОНДИРОВАНИЙ**

1.2.2 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном
образовательном учреждении высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Персова Марина Геннадьевна

Официальные оппоненты: **Пушкарев Павел Юрьевич**
доктор геолого-минералогических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный университет имени
М.В. Ломоносова», г. Москва, геологический
факультет, кафедра геофизических методов
исследования земной коры, профессор;
Злобинский Аркадий Владимирович
кандидат технических наук, Общество с ограниченной
ответственностью «Научно-Техническая Компания
ЗаВеТ-ГЕО», г. Новосибирск, генеральный директор.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт вычислительной математики и
математической геофизики Сибирского отделения
Российской академии наук, г. Новосибирск.

Защита диссертации состоится «27» ноября 2025 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.347.06 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, 1 корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте <http://www.nstu.ru/>.

Автореферат разослан «___» сентября 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.347.06
д.т.н., доцент

Вагин Денис Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Технологии электромагнитных (ЭМ) зондирований Земли используются при решении широкого спектра геологических и инженерных задач. Дальнейшее повышение разрешающей способности ЭМ технологий, с одной стороны, может быть достигнуто путем достижения более высоких технических характеристик и разработки новых конфигураций приемно-генераторных установок, направленных на получение существенно больших абсолютных и относительных сигналов от поисковых объектов, а с другой – путем использования более точных методов обработки данных, которые основаны на численном 3D-моделировании и 3D-инверсиях ЭМ данных с привлечением данных других геофизических методов, а также на анализе эквивалентности, устанавливающем пределы неопределенности физических свойств и границ выявленных потенциально целевых геологических тел (структур). При этом эффективность разработки новых конфигураций приемно-генераторных установок во многом зависит от степени использования методов 3D-моделирования и 3D-инверсий ЭМ данных и их возможностей.

Актуальность диссертационной работы определяется необходимостью разработки новых методов проектирования работ и обработки данных ЭМ зондирований Земли, позволяющих повысить разрешающую способность соответствующих технологий и надежность геофизического прогноза, особенно, в сложных, существенно неоднородных геологических средах.

Степень разработанности.

Необходимость перехода от массового использования 1D-инверсий к трехмерной обработке ЭМ данных отмечается в работах Л.Н. Сох, М.Г. Персовой, Г.М. Тригубовича, С. Scholl и др. В качестве обоснования приводится множество примеров неадекватных результатов 1D-инверсий как на синтетических, так и на реальных данных, полученных на месторождениях с известной по результатам бурения геолого-геофизической моделью.

Подходы к 3D-инверсии ЭМ данных можно разделить на два класса. Более традиционным является подход, основанный на так называемых voxel-инверсиях (E. Haber, Y. Liu, D.W. Oldenburg, X. Ren, D. Yang и др.). Другим подходом являются геометрические инверсии (называемые в зарубежной литературе также «parametric» или «model based») (M.S. McMillan, C.G. Farquharson, P.G. Leli`ever, A. Aghasi, I. Mendoza-Sanchez, М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, Д.В. Вагин). Использование геометрических инверсий позволяет существенно сократить количество искомых параметров и снизить область эквивалентности. Преимущества геометрических инверсий перед традиционными voxel-инверсиями на примере решения задач морской электроразведки и аэроэлектроразведки представлены, например, в работах M.S. McMillan и [8]. Поэтому актуальным является их дальнейшее развитие.

В этой связи наиболее эффективными при реализации геометрических инверсий являются неконформные шестигранные сетки, допускающие примыкание нескольких конечных элементов к грани одного конечного элемента. Такие нерегулярные сетки позволяют сократить вычислительные затраты по сравнению с тетраэдральными сетками (H. Cai, O. Castillo-Reyes, E.S. Um, C. Yin, X. Zhu) и в то же время обладают хорошими аппроксимационными свойствами, в том числе при использовании

векторного метода конечных элементов (МКЭ) (P. Monk, J.L. Volakis, A. Bossavit, Y. Chung, J.C. Nédélec). Неконформные сетки рассматриваются в работах E. Haber, L.A. Caudillo-Mata, C. Schwarzbach, A.V. Grayver, D. Pardo и др. Однако, в подавляющем большинстве этих работ рассматриваются только сетки с ячейками в виде прямоугольных параллелепипедов и допускают примыкание только двух конечных элементов к грани одного конечного элемента. Такие подходы довольно трудно применять в ситуации, когда для расчета производной по геометрическому параметру необходимо встроить в сетку один или несколько небольших 3D-объектов и при этом учесть изогнутость границ. Поэтому актуальным является развитие методов, допускающих произвольные стыковки нескольких шестигранных элементов с гранью одного элемента [6], что позволит использовать конечноэлементные сетки с небольшим количеством ячеек, но обеспечить достаточную точность численного решения как при решении прямой задачи, так и при вычислении производных по геометрическим параметрам.

Одним из способов повышения качества геофизического прогноза является использование совместных интерпретаций, позволяющих строить геолого-геофизические модели с определением формы потенциально перспективных локальных структур по совокупности данных геофизических методов в сложных средах, когда эти структуры перекрыты слоями с неоднородными физическими свойствами. Это особенно характерно для месторождений твердых полезных ископаемых, при поиске которых довольно часто используют комплекс геофизических методов, включая аэрогеофизику с использованием как вертолетных платформ, так и БПЛА. Однако, многие авторы (например, C. Alencar de Matos, V.E. Ardestani, J. Kamm, M. Milano) рассматривают лишь гравитационные и магнитные поля и не учитывают электромагнитную съемку, которая является наиболее информативной для определения формы и границ объектов. С другой стороны, авторы, изучавшие возможности 3D-инверсии аэроданных (X. Ren, C. Yin), отмечают, что качество результата 3D-инверсии может существенно зависеть от методологии ее реализации. При этом особенно актуальным является разработка новых подходов к совместной 3D-интерпретации данных электромагнитной и магнитной съемок в ситуациях, когда целевые заглубленные объекты находятся под неоднородными по электрическим и магнитным свойствам приповерхностными слоями.

Другим классом перспективных электроразведочных технологий, но уже нацеленных главным образом на поиск и разведку месторождений углеводородов, являются технологии морской электроразведки, рассматриваемые в работах K. Schwalenberg, K. Senger, R. B. King, S.L. Helwig, T. Holten и др. Наиболее перспективными представляются технологии, использующие дифференциальные измерительные системы, рассмотренные, например, в работах П.Ю. Легейдо, В.С.Могилатова, А.В. Злобинского, М.Г. Персовой, Ю.Г. Соловейчика. Однако, эффективность этих технологий существенно зависит от качества их проектирования, и, соответственно, возможностей используемых для этого методов 3D-моделирования и 3D-инверсии.

Надежность геофизического прогноза, получаемого в результате обработки данных проведенных полевых работ, и качество проектирования этих работ существенно зависят от уровня эквивалентности. На сегодняшний день разработаны

методы анализа эквивалентности геоэлектрических моделей для оценки результатов 1D-инверсий, которые рассмотрены, например, в работах N. Christensen, K. Lawrie, T. Hansen, Л.А. Табаровского, М.И. Эпова. Но их применение к 3D-моделям, которые получены в результате 3D-инверсий и характеризуются значительно большим числом типов эквивалентностей, не представляется возможным. В связи с этим актуальным является развитие подходов к анализу эквивалентности для оценки результатов 3D-инверсий.

Основной **научной проблемой** является проблема создания и реализации в проблемно-ориентированном программном комплексе новых методов обработки данных технологий геофизических зондирований Земли, позволяющих повысить их разрешающую способность и надежность геофизического прогноза.

Цель работы состоит в разработке эффективных методов 3D-инверсий для обработки данных технологий электроразведки воздушного, наземного и морского базирования, с привлечением данных магниторазведки, и анализе эквивалентности получаемых 3D-моделей, устанавливающим пределы неопределенности физических свойств и границ целевых геологических тел.

Научные задачи:

1. Разработка алгоритмов построения неконформных оптимизированных сеток для решения прямых трехмерных задач геоэлектрики с большим количеством трехмерных объектов и для расчета производных по геометрическим параметрам.
2. Разработка метода совместной 3D-интерпретации данных ЭМ и магнитной съемки при создании моделей существенно неоднородных сред.
3. Разработка способов анализа эквивалентности 3D-моделей геологической среды, получаемых в результате 3D-инверсий.
4. Реализация разработанных методов и специальных средств графического интерфейса пользователя в проблемно-ориентированном программном комплексе.

Методология и методы исследования

Методы решения обратных задач основаны на минимизации функционала невязки наблюдаемых и расчетных данных с линеаризацией откликов на основе метода Гаусса-Ньютона со специальной адаптивной регуляризацией. Для моделирования трехмерных электромагнитных полей используется векторный метод конечных элементов на неконформных сетках с использованием технологии выделения части поля.

На защиту выносятся:

1. Алгоритмы построения оптимизированных неконформных конечноэлементных сеток, обеспечивающие совпадение сеточных поверхностей с границами трехмерных объектов и решение трехмерных задач геоэлектромагнетизма с заданной точностью.
2. Метод совместной 3D-интерпретации данных электромагнитной и магнитной съемки в ситуациях, когда целевые заглубленные объекты находятся под неоднородными по электрическим и магнитным свойствам приповерхностными слоями.

3. Методы проверки эквивалентности трехмерных геоэлектрических моделей, построенные на основе процедур конечноэлементного 3D-моделирования и геометрических 3D-инверсий.

4. Программный комплекс для проектирования электромагнитных зондирований, разработки и обоснования новых технологий и совместной обработки данных электромагнитной и магнитной съемки.

Научная новизна:

1. Предложен и реализован в программном комплексе алгоритм встраивания трехмерных объектов в неконформные конечноэлементные сетки, обеспечивающий совпадение сеточных поверхностей с границами трехмерных объектов при решении прямых трехмерных задач геоэлектрики с большим количеством трехмерных объектов и при расчете производных по геометрическим параметрам в процедурах решения обратных задач.

2. Разработаны методы 3D-моделирования и 3D-инверсии для решения задач совместной обработки данных электромагнитной и магнитной съемок. Эти методы позволяют оценивать сверху магнитную восприимчивость для локальных проводящих структур, расположенных под неоднородными по электрическим и магнитным свойствам приповерхностными слоями.

3. Впервые проведено 3D-моделирование для новой старт-стопной технологии «Звезда». Это позволило обосновать преимущества технологии «Звезда» перед существующими технологиями при поиске морских месторождений углеводородов и при решении задачи мониторинга нефтенасыщенной зоны в процессе их разработки.

4. Предложен способ анализа эквивалентности полученных в результате 3D-инверсии геоэлектрических 3D-моделей, позволяющий определить пределы неопределенности физических свойств и границ целевых геологических тел и ее влияние на решение геологической задачи.

Достоверность результатов

Алгоритмы построения неконформных оптимизированных сеток протестированы путем сравнения получаемых численных решений с решениями на согласованных (конформных) сетках.

Адекватность получаемых физических свойств и геометрии локальных структур в условиях, когда они находятся под неоднородными по электрическим и магнитным свойствам приповерхностными слоями, с помощью предложенного и реализованного в проблемно-ориентированном программном комплексе метода совместной 3D-интерпретации подтверждена совпадением подобранных и истинных моделей при тестировании на синтетических данных, а также данными бурения и хорошим совпадением практических и расчетных аэрогеофизических данных, полученных на месторождении полиметаллических руд на площади Creighton (Канада).

Теоретическая значимость работы

Метод совместной 3D-интерпретации данных электромагнитной и магнитной съемок может служить основой для создания методик комплексной многомерной обработки аэрогеофизических данных.

Результаты 3D-моделирования электромагнитных сигналов для новой конфигурации приемно-генераторной установки «Звезда» в совокупности с

проблемно-ориентированным программным комплексом, реализующим 3D-моделирование и 3D-инверсии с анализом эквивалентности, могут служить теоретической основой для создания технологии мониторинга границы нефтенасыщенной зоны в процессе разработки морских месторождений углеводородов и соответствующей интерпретационной базы.

Практическая значимость работы

Разработанные подсистемы вычислительной части и инструментальные средства графического интерфейса в составе проблемно-ориентированного программного комплекса могут применяться при проектировании полевых электроразведочных работ, включая разработку новых конфигураций приемно-генераторных установок, а также для совместной 3D-интерпретации данных электромагнитной и магнитной съемок с анализом эквивалентности получаемых 3D-моделей.

По результатам проведенных работ было зарегистрировано в ФИПС (Роспатент) 3 программы для ЭВМ [31,32,33]. Разработанное программное обеспечение применялось для проектирования полевых работ и трехмерной обработки практических данных, полученных на золоторудных месторождениях Дальнего Востока [27] и медно-порфировых месторождениях на территории Северного Казахстана [18,29] (2 акта внедрения), на месторождении золото-порфирового типа в Приморье [28], на месторождении углеводородов в Северном море [1,8,24].

Результаты диссертационной работы использовались при выполнении 4-х крупных научно-исследовательских работ, среди которых 2 проекта, выполненных в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» в интересах и при софинансировании Индустриальных партнеров ООО Геофизическое предприятие «Сибгеотех» (соглашение № 14.574.21.0156 от 26.09.2017 г.) и ООО «Сибирская геофизическая научно-производственная компания» (соглашение № 14.577.21.0216 от 03.10.2016 г) и 3 проекта в рамках гос.заданий № 5.978.2017/ПЧ (2018-2019 гг.) и FSUN-2020-0012 (2020-2023 гг.), FSUN-2024-0003 (2024-2025 гг.), а также при выполнении междисциплинарного проекта, поддержанного грантом РНФ № 20-61-47072.

Личный вклад

Разработан и реализован алгоритм встраивания трехмерных объектов в неконформные конечноэлементные сетки, обеспечивающий совпадение сеточных поверхностей с границами трехмерных объектов. Разработан метод совместной 3D-интерпретации данных электромагнитной и магнитной съемок в ситуациях, когда целевые объекты перекрыты неоднородными по электромагнитным и магнитным свойствам слоями. Предложены методы анализа эквивалентности 3D-моделей, получаемых в результате 3D-инверсии данных. Проведены исследования разработанных методов и алгоритмов на синтетических и практических данных электромагнитных и магнитных съемок. Разработаны инструментальные средства графического интерфейса и подсистемы проблемно-ориентированного программного комплекса, реализующие алгоритм совместной 3D-интерпретации данных электромагнитной и магнитной съемок с анализом эквивалентности получаемых 3D-моделей.

В совместных публикациях автору принадлежат следующие результаты.

В работе [6] автором реализованы алгоритмы встраивания трехмерных объектов в неконформные конечноэлементные сетки, обеспечивающие совпадение сеточных поверхностей с границами трехмерных объектов. В работах [4,22] автором предложен алгоритм совместной 3D-интерпретации данных электромагнитной и магнитной аэросъемок, а в работе [26] – реализация инструментальных средств параметризации геологической модели для мультифизической обработки данных. В работах [1,24] автором проведен анализ возможностей технологии «Звезда» с исследованием области эквивалентности получаемых 3D-моделей. Кроме того, в работе [1] автору принадлежат результаты 3D-моделирования, демонстрирующие возможности технологии «Звезда» при решении задач мониторинга границы нефтенасыщенной зоны в процессе разработки морских нефтегазовых месторождений. В работах [9,11,19,23,25] автором предложены двухэтапные методики 3D-обработки аэроэлектроразведочных данных. В работах [7,8] автором разработаны алгоритмы построения сеток для расчета производных по геометрическим параметрам.

Апробация работы

Основные результаты работы были представлены на международной научно-практической конференции «ГеоБайкал 2020» (Иркутск, 2020 г.); научно-практической конференции «Инженерная и рудная геофизика» «ЕАГЕ Геомодель-2020» (Пермь, 2020 г.), «ЕАГЕ Геомодель-2021» (Геленджик, 2021 г.), «ЕАГЕ Геомодель-2022» (Геленджик, 2022 г.), «ЕАГЕ Геомодель-2023» (Санкт-Петербург, 2023), «ЕАГЕ Геомодель-2024» (Казань, 2024 г.); международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2021 (Новосибирск, 2021 г), АПЭП-2023 (Новосибирск, 2023 г.); научно-практической конференции «Морские технологии» (Санкт-Петербург, 2023), всероссийской научно-технической конференции молодых ученых «Наука. Технология. Инновации» «НТИ-2020» (Новосибирск, 2020 г.), «НТИ-2023» (Новосибирск, 2023 г), всероссийской конференции «XXII Уральская молодежная научная школа по геофизике» (Екатеринбург, 2021), «XXIII Уральская молодежная научная школа по геофизике» (Екатеринбург, 2022).

Публикации

По результатам выполненных исследований опубликовано 30 научных работ, в том числе 3 научные публикации в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК РФ, 8 научных публикаций, индексируемых в международной информационно-аналитической системе научного цитирования Web of Science (включая 1 публикацию в журнале квартиля Q1, 3 публикации в журналах квартиля Q2 и 3 публикации в журналах квартиля Q3), 20 научных публикаций, индексируемых в международной информационно-аналитической системе научного цитирования Scopus (включая 2 публикации в журналах квартиля Q1 и 4 публикации в журналах квартиля Q2), 9 публикаций, входящих в «Белый список» журналов (4 публикации в журналах первого уровня и 4 публикации в журналах второго уровня).

Структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы (139 наименований) и 2-х приложений. Общий объем диссертации – 173 страницы, в том числе 63 рисунка и 2 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснованы актуальность темы диссертации, представлены цели и задачи, научная новизна, теоретическая и научная значимость работы, методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности, апробация результатов и общие сведения о диссертации.

Первая глава диссертационной работы посвящена математическим методам и алгоритмам для решения прямых и обратных задач электроразведки и магниторазведки. В ней представлены алгоритм построения неконформных шестигранных конечноэлементных сеток [6], обеспечивающий совпадение сеточных поверхностей с границами трехмерных объектов, и математические модели электромагнитных полей, возбуждаемых гальваническим источником или индукционным источником, и аномальных магнитных полей.

При описании алгоритмов построения неконформных сеток особое внимание уделено проблеме «висячих углов» при моделировании трехмерного электромагнитного поля, описываемого уравнением [1,5-7]:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} + \sigma \partial \vec{A} / \partial t = \mu_0 \vec{J}^{source}, \quad (1)$$

где $\sigma(x, y, z)$ – электропроводность среды, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, $\vec{J}^{source}$ – плотность сторонних токов, $\vec{A}$ – вектор-потенциал, связанный с магнитной индукцией и напряженностью электрического поля соотношениями $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$ и $\vec{E} = -\partial \vec{A} / \partial t$.

Ситуация «висячих углов» не является недопустимой с точки зрения построения конечноэлементных аппроксимаций, но она может приводить к очень существенным погрешностям и в конечном итоге даже приводить к тому, что не будет сходиться процесс при решении обратной задачи. Разрешение данной ситуации путем дополнительного разбиения соседних конечных элементов не приводит к существенному увеличению вычислительных затрат, по сравнению с ситуациями, когда используются регулярные сетки, однако существенно повышает точность расчета сигналов в приемниках.

Для выполнения 3D-инверсий геофизическая модель представляется как набор слоев и трехмерных неоднородностей. Параметры геофизической модели определяются на основе минимизации функционала

$$\Phi^{\alpha}(\mathbf{b}) = \beta^{EM} \sum_{i=1}^{N^{EM}} \sum_{k=1}^T \left(\omega_{ik}^{EM} \delta \varepsilon_{ik}^{EM}(\mathbf{b}) \right)^2 + \beta^M \sum_{j=1}^{N^M} \left(\omega_j^M \delta \varepsilon_j^M(\mathbf{b}) \right)^2 + \sum_{p=1}^P \alpha_p \left(b_p - \bar{b}_p \right)^2 \rightarrow \min_{b_p}, \quad (2)$$

где N^{EM} – количество точек съемки электромагнитного поля, T – количество временных каналов для электромагнитной съемки, N^M – количество точек съемки магнитного поля, $\delta \varepsilon_{ik}^{EM} = \tilde{\varepsilon}_{ik}^{EM} - \varepsilon_{ik}^{EM}$, ε_{ik}^{EM} – сигналы электромагнитного поля, зарегистрированные в i -м приемнике в момент времени t_k , $\tilde{\varepsilon}_{ik}^{EM}$ – теоретический сигналы, полученные в результате моделирования электромагнитного поля, $\delta \varepsilon_j^M = \tilde{\varepsilon}_j^M - \varepsilon_j^M$, ε_j^M – сигналы магнитного поля, зарегистрированные в j -м приемнике, $\tilde{\varepsilon}_j^M$ – теоретический сигналы, полученные в результате моделирования магнитного

поля, b_p – компоненты вектора искомых параметров $\mathbf{b}$ (геометрических и физических), $\bar{b}_p$ – значения параметров с предыдущей итерации (на первой итерации – их начальное значение), α_p – параметры регуляризации, ω_{ik}^{EM} и ω_j^M – весовые коэффициенты. Глобальные веса β^{EM} и β^M используются для приведения сигналов от разных съемок к одному уровню.

Сигналы магнитного поля $\vec{\mathbf{B}}^{mag}$ рассчитывались с использованием математической модели, полученной при условии небольших отличий магнитной проницаемости среды μ от магнитной проницаемости вакуума μ_0 :

$$\vec{\mathbf{B}}^{mag} \approx \sum_k \vec{\mathbf{B}}^{T^k}, \quad B_{\xi}^{T^k} = \frac{\mu_0}{4\pi r^3} \left(T_{\xi}^k \left(3 \frac{\xi^2}{r^2} - 1 \right) + T_{\eta}^k \left(3 \frac{\xi \eta}{r^2} \right) + T_{\zeta}^k \left(3 \frac{\xi \zeta}{r^2} \right) \right), \quad (3)$$

где ξ – это координата x , y или z точки измерения магнитного поля при переносе начала координат в центр Ω_k (Ω_k – ячейки, на которые разбита расчетная область), η и ζ – две другие координаты, r – расстояние от центра Ω_k до точки измерения. Величина $\vec{\mathbf{T}}^k$ связана с намагниченностью $\vec{\mathbf{M}} = (((\mu - \mu_0)/\mu_0) \vec{\mathbf{H}}^E + \vec{\mathbf{H}}^C)$ в ячейках Ω_k соотношением $\vec{\mathbf{T}}^k = \int_{\Omega_k} \vec{\mathbf{M}} d\Omega$, где $\vec{\mathbf{H}}^E$ – напряженность магнитного поля Земли, а $\vec{\mathbf{H}}^C$ – возможная собственная намагниченность.

Для верификации процедуры мультифизичной инверсии с одновременным подбором параметров электропроводности и магнитной восприимчивости была создана синтетическая модель. В ней целевые объекты, неоднородные по магнитной восприимчивости, не были перекрыты неоднородными по магнитной восприимчивости слоями (верхний слой был неоднородным только по электропроводности) и поэтому совместный подбор всех физических и геометрических параметров дал хорошие результаты.

Однако на практике гораздо чаще встречается более сложная ситуация, когда целевые объекты перекрыты слоями, неоднородными не только по электрическим, но и по магнитным свойствам. Эта ситуация рассматривается **во второй главе**. В ней предлагается и соответствующий метод совместной 3D-интерпретации.

В ситуациях, когда приповерхностные слои являются существенно неоднородными как по электрическим, так и по магнитным свойствам, совместную 3D-интерпретацию предлагается проводить следующим образом: сначала выполнять восстановление геометрии (потенциально целевых) локальных высокопроводящих тел по данным ЭМ съемки с помощью подходов, предложенных в [9], и затем определять в них максимально возможную магнитную восприимчивость по данным магнитной съемки следующим образом [4]. Вначале подбирается магнитная восприимчивость (χ) в приповерхностном слое. Затем выделенные проводящие структуры помещаются поочередно в модель, в них фиксируется значение χ и с помощью 3D-инверсий корректируется верхний слой. Максимально возможная магнитная восприимчивость в локальных структурах определяется по сохранению низкого уровня отличий между практическими и расчетными данными магнитной съемки. Увеличение невязки свидетельствует о том, что такого уровня магнитной восприимчивости в выделенной по данным ЭМ съемки локальной структуре быть не может.

Для апробации предложенного подхода использовались полевые данные электромагнитных и магнитных измерений, выполненных на площади Creighton (Канада) с помощью аэрогеофизической вертолетной платформы HeliTEM.

На рис. 1 приведены результаты предварительного этапа обработки данных. Из представленного распределения магнитной восприимчивости видно, что среда является неоднородной и магнитной.

На рис. 2 показаны графики расчетных и практических сигналов в процессе подбора магнитной восприимчивости для одной из глубинных локальных структур, выделенных на заключительном этапе 3D-интерпретации данных ЭМ съемки.

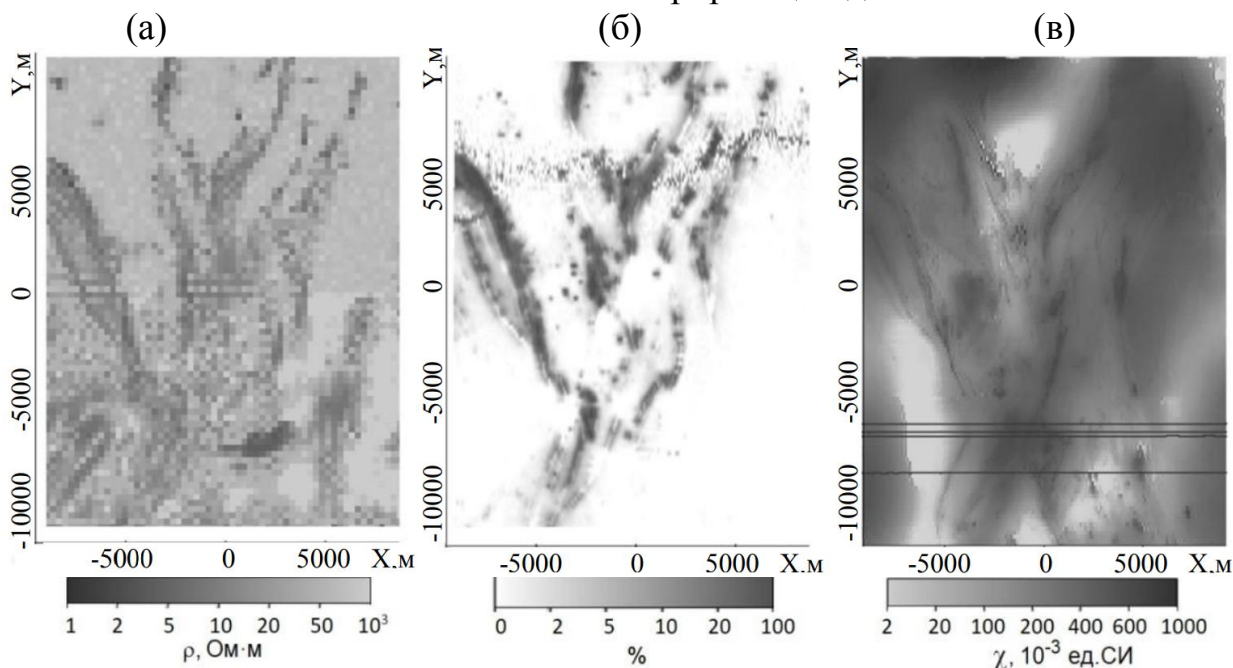


Рисунок 1 – Результаты предварительного этапа совместной 3D-интерпретации: предварительное распределение сопротивления в перекрывающем слое (а), невязки в ЭМ данных на времени 767 мкс (б) и предварительное распределение магнитной восприимчивости (в)

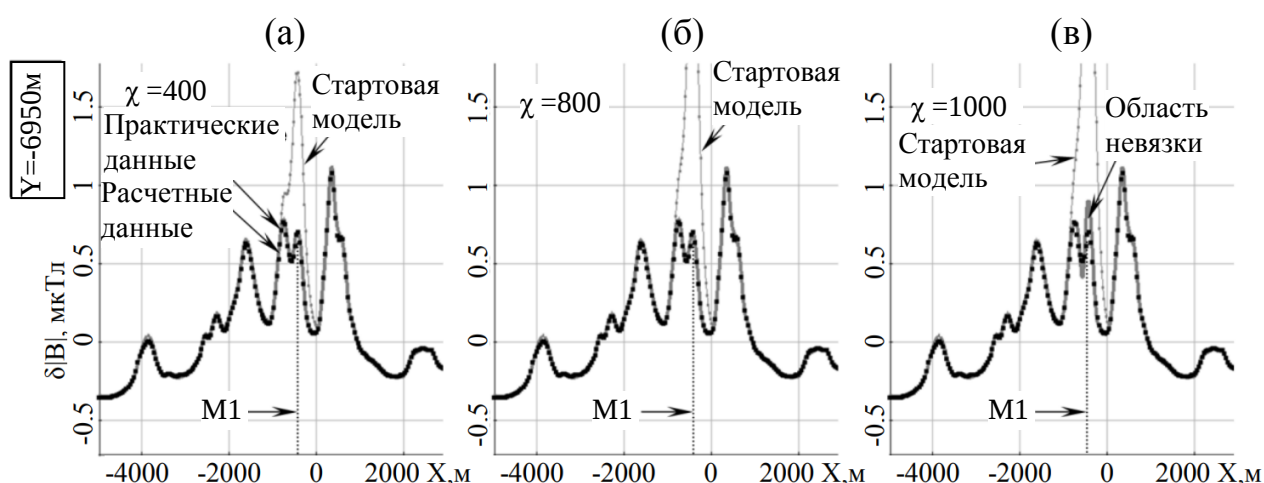


Рисунок 2 – Графики расчетных сигналов (светлые линии без меток) для модели, полученной в результате 3D-инверсии данных магнитной съемки при помещении в модель магнитной структуры со значениями $\chi = 400$ (а), $\chi = 800$ (б), $\chi = 1000$ (в) (10^{-3} ед.СИ), и графики практических сигналов вдоль профиля (черные точки).

Полученные результаты 3D-интерпретации были выданы вдоль траекторий скважин и сопоставлены с данными магнитной восприимчивости, измеренными по скважинам, и данными литологии [D. Fleming, G. Sidhu, O. Mahmoodi]. Результаты для одной из скважин представлены на рис. 3.

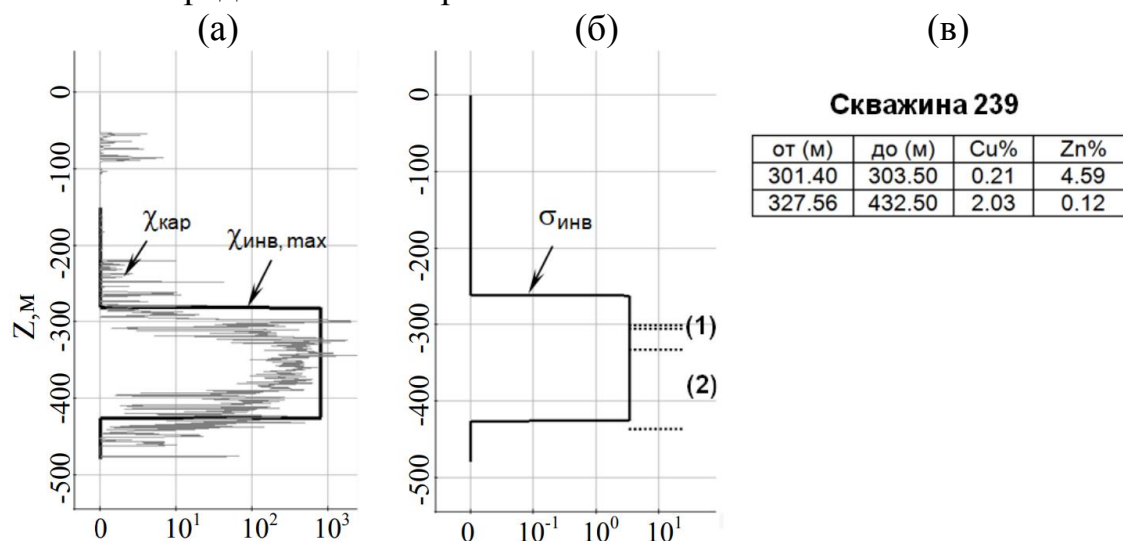


Рисунок 3 – Сравнение данных магнитной восприимчивости ($\chi_{кар}$) и литологии по скважине 239 с результатами совместной 3D-интерпретации ($\chi_{инв, max}$ и $\sigma_{инв}$); (1) – богатый цинком сульфидный горизонт, (2) – богатая медью зона; магнитная восприимчивость (а), электропроводность (б), литология (в)

В **третьей главе** диссертационной работы рассмотрен метод проверки эквивалентности трехмерных геоэлектрических моделей, построенных на основе процедур конечноэлементного 3D-моделирования и геометрических 3D-инверсий.

В данной работе предлагается проводить оценку эквивалентности на основе следующих принципов:

- 1) изменение структуры стартовой модели для целевых тел с повторением локальных 3D-инверсий и локальной оценкой получаемых невязок;
- 2) изменение и фиксация отдельных параметров целевых тел, полученных в результате 3D-инверсии, с повторением локальных 3D-инверсий при этих условиях и локальной оценкой получаемых невязок.

Конкретная последовательность действий максимально связывается с решаемой геологической задачей.

Проведенный анализ эквивалентности для геоэлектрической модели, полученной в результате трехмерной обработки аэроданных ЭМ съемки на площади Creighton (Канада), показал, что основная эквивалентность связана с размерами блоков между полетными линиями. При этом для большинства блоков эквивалентные модели характеризуются уменьшением размера блоков между профилями за счет увеличения их размера вдоль полетной линии и изменения сопротивления. Поэтому при проведении 3D-инверсии по полной модели, положения границ блоков локальных структур между полетными линиями были зафиксированы. Еще одна эквивалентность связана со слабой чувствительностью к положению нижней кромки нижних проводящих блоков. Остальные параметры структуры для рассмотренной системы наблюдений определяются достаточно надежно.

С использованием процедур 3D-моделирования и 3D-инверсии проведены

исследования возможности применения технологии «Звезда» на морском шельфе при поиске, разведке и мониторинге месторождений углеводородов.

Исследования показали, что технология «Звезда» позволяет получить гораздо более высокий уровень как абсолютного, так и относительного сигнала от залежей небольшого размера, расположенных на достаточно больших глубинах, по сравнению с известными как старт-стопными (ВЭД-ВЭЛ), так и буксируемыми (ГЭД-ГЭЛ) технологиями.

Выполненный для технологии «Звезда» анализ эквивалентности «сопротивление целевого объекта – положение его границы» показал, что выявленная зона эквивалентности не ухудшает решение рассматриваемой задачи: для рассмотренных геоэлектрических условий, характерных для шельфовых зон, полученное минимальное сопротивление вместо истинного также будет свидетельствовать о наличии целевого объекта, а разница в положении границ у эквивалентных моделей не превышает 150 м (см. рис. 4).

Исследование возможности решения мониторинговых задач показало, что может быть предложен достаточно простой способ интерпретации результатов, основанный на том, что положение границы нефтенасыщенной зоны определяется сменой знака между экстремумами в графиках отклонений сигналов, полученных при смещении этой границы в процессе добычи нефти, а сопротивление области, оставшейся после вытеснения основного объема нефти, определяется уровнем этих экстремумов. При этом уровень эквивалентности «смещение границы – сопротивление в зоне вытеснения» оказывается невысоким.

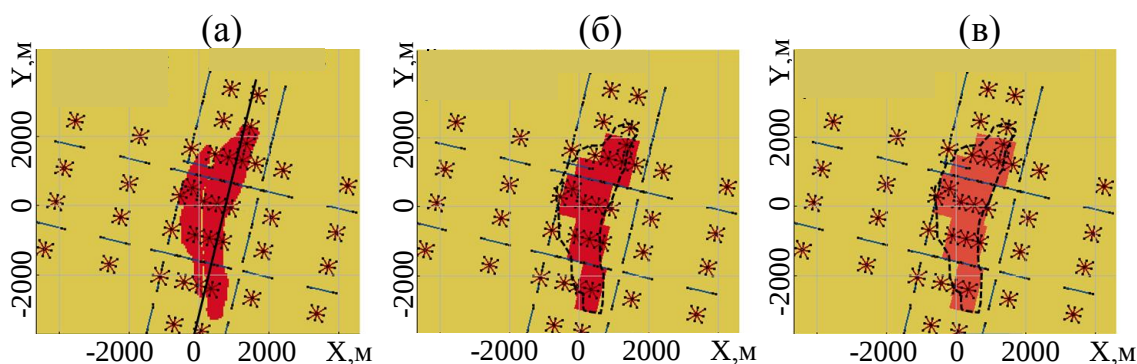


Рисунок 4 – Оценка эквивалентности при определении границы целевого объекта и его сопротивления: а – истинная модель; б – результат инверсии; в – эквивалентная модель

Четвертая глава диссертационной работы содержит описание частей разработанного программного комплекса и примеры его использования для проектирования электроразведочных работ.

Пост- и пре- процессорные части объединены в рамках графического интерфейса пользователя. В графическом интерфейсе реализовано задание геофизических моделей, систем наблюдения, запуск и просмотр результатов решения прямых и обратных задач электроразведки и магниторазведки. Поскольку программный комплекс предназначен для проведения трехмерных инверсий, то предусмотрена возможность задания стартовых моделей инверсии и загрузка полевых систем наблюдения с измеренными сигналами.

Описан инструментарий, предназначенный для использования в многоэтапных методиках 3D-интерпретаций и при анализе чувствительности и эквивалентности (главы 2, 3).

Представленные в диссертационной работе методы моделирования и алгоритм проведения трехмерной совместной инверсии интегрированы в состав программного комплекса. Все приведенные в автореферате рисунки получены с использованием интерфейса этого программного комплекса, а его укрупненная схема представлена на рис. 5.

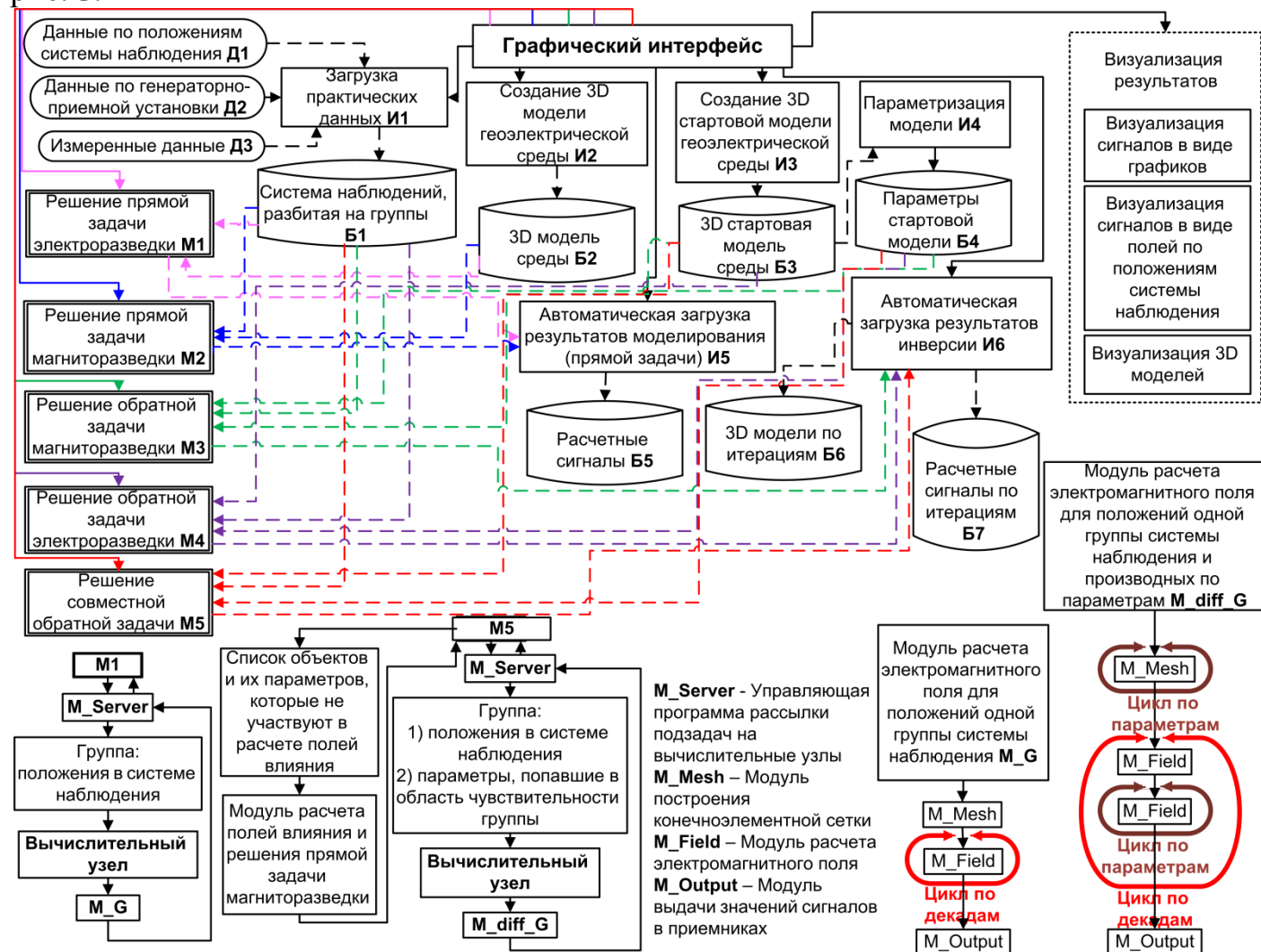


Рисунок 5 – Укрупненная схема программного комплекса 3D-обработки данных геологоразведки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан алгоритм построения оптимизированных неконформных конечноэлементных сеток, обеспечивающий совпадение сеточных поверхностей с границами трехмерных объектов и предназначенный как для решения прямых задач, в том числе с большим числом 3D-объектов, так и для расчета полей влияния геометрических параметров. Помимо непосредственного включения 3D-объектов в сетку и устранения «перехлестов», алгоритм включает в себя процедуру устранения «висячих углов» – ситуацию, когда к нетерминальному («большому») ребру примыкают терминальные ребра конечных элементов с разными материалами. При

этом «большой» конечный элемент и «малые» конечные элементы могут иметь как общую грань, так и только общее ребро.

Показано, что если не устранять ситуацию «висячих углов», то в некоторых случаях ошибка может резко возрастать (даже на порядок), что в конечном итоге будет приводить к проблемам в решении обратных задач. При этом даже для геоэлектрических моделей с очень большим количеством встраиваемых объектов, получаемых из-за аппроксимации объектов сложной формы (что, как правило, используется при решении прямых задач при проведении различного рода методических расчетов), время расчета электромагнитного поля возрастет всего лишь в 1.5 раза (при этом, если решать эту проблему уменьшением шага в базовой сетке, вычислительные затраты вырастут более, чем в 2.5 раза). Для геоэлектрических же моделей, характерных для обратных задач (которые являются наиболее вычислительно затратными), время расчета электромагнитного поля практически не изменится при устранении ситуации с «висячими углами» и резко возрастет при использовании регулярных (или более подробных базовых) сеток.

2. На основе результатов исследования эквивалентности при определении глубины тел с повышенными магнитными свойствами и полученных ранее положительных результатов восстановления свойств и геометрии локальных проводящих объектов по данным ЭМ съемки разработан метод совместной 3D-интерпретации данных электромагнитной и магнитной съемок. Он основан на 3D-моделировании и 3D-инверсии и позволяет оценивать сверху магнитную восприимчивость для локальных проводящих структур, расположенных под неоднородными по электрическим и магнитным свойствам приповерхностными слоями.

Работоспособность предложенного подхода показана как на синтетических данных, так и на практических данных аэрогеофизических исследований, проведенных на площади Creighton (Канада) при поиске полиметаллических руд. Качество реконструкции морфологии и физических свойств локальных структур подтверждено сравнением с результатами бурения набора наклонных скважин.

3. Предложены методы проверки эквивалентности трехмерных геоэлектрических моделей, основанные на использовании процедур конечноэлементного 3D-моделирования и геометрических 3D-инверсий. Их работоспособность продемонстрирована на 3D-модели, полученной в результате 3D-инверсии практических данных аэроэлектроразведки на площади Creighton (Канада), и при обосновании возможностей новой перспективной технологии «Звезда» при восстановлении границ нефтегазонасыщенной зоны.

Для 3D-модели, полученной в результате 3D-инверсии данных аэроэлектроразведки, показано, что основная эквивалентность возникает из-за большого расстояния между полетными линиями, и еще одна эквивалентность связана со слабой чувствительностью к положению нижней кромки нижних проводящих блоков. Остальные параметры выявленных локальных целевых объектов для рассмотренной системы наблюдений определяются достаточно надежно и в целом, было получено, что по критерию проводки скважин полученные эквивалентные модели достаточно близки и с геологической точки зрения принципиальной разницы между полученными эквивалентными моделями нет.

Для технологии «Звезда» показаны ее преимущества по сравнению с известными старт-стопными (ВЭД-ВЭЛ) и буксируемыми (ГЭД-ГЭЛ) технологиями при решении задачи оконтуривания нефтегазовых залежей небольшого размера на шельфе, а также перспективы ее использования для решения мониторинговых задач. При этом анализ эквивалентности «сопротивление целевого объекта – положение его границы» показал, что выявленная зона эквивалентности не ухудшает решение рассматриваемых задач.

4. Разработаны подсистемы вычислительной части и инструментальные средства графического интерфейса, которые включены в состав проблемно-ориентированного программного комплекса.

Работоспособность программного комплекса для предложенного в данной работе комплекса методов продемонстрирована на примере решения задач совместной 3D-интерпретации практических аэрогеофизических данных большого объема на площади Creighton (Канада) при поиске полиметаллических руд, обоснования новой технологии «Звезда» для электромагнитных зондирований на шельфе, а также анализа эквивалентностей 3D-моделей для различных технологий электроразведки.

Разработанное программное обеспечение применялось для проектирования полевых работ и трехмерной обработки практических данных, полученных на золоторудных месторождениях Дальнего Востока и медно-порфировых месторождениях на территории Северного Казахстана.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в журналах из перечня ВАК ведущих рецензируемых научных изданий для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук:

1. Персова, М.Г. Анализ возможностей технологий морской электроразведки при решении задач картирования и мониторинга нефтегазовых месторождений с помощью 3D-моделирования и геометрической 3D-инверсии / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, **А.П. Сивенкова**, Д.В. Вагин, Д.С. Киселев // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. -2024. -Том 69. -№ 2 – С. 274–302.

2. **Сивенкова, А.П.** Анализ эквивалентности трехмерных моделей при 3D-интерпретации данных аэроэлектроразведки // Системы анализа и обработки данных, 2024. – Том 94. – .№2 – С. 69 – 84.

3. Персова, М.Г. Особенности расчета чувствительностей при реализации геометрических 3D-инверсий в задачах электроразведки / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, Д.В. Вагин, **А.П. Сивенкова**, Е.И. Симон, М.Г. Токарева. // Вычислительные технологии. – 2025. – Т. 30. – № 1. – С. 64–79. <https://doi.org/10.25743/ICT.2025.30.1.007>.

Работы, опубликованные в журналах, индексируемых в международных информационно-аналитических системах научного цитирования Web of Science и Scopus, а также входящих в «Белый список»:

4. Persova, M.G. Sequential 3D inversion strategy of airborne geophysical survey data for exploration of ore mineral deposits overlapped by layers with heterogeneous conductivity and magnetic susceptibility / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, **A.P. Sivenkova**,

D.V. Vagin, D.S. Kiselev, Y.I. Koshkina //Journal of Applied Geophysics. – 2025 – Vol. 238. – Art. 105738 (22 p.). <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2025.105738>

5. Soloveichik, Y.G. Comparative analysis of computational schemes for FEM modeling of 3D time-domain geoelectromagnetic fields excited by a horizontal grounded-wire source / Y.G. Soloveichik, M.G. Persova, D.V. Vagin, **A.P. Sivenkova**, D.S. Kiselev, Y.I. Koshkina //Computers & Geosciences. – 2024. – Vol. 183. – Art. 105514 (17 p.). <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2023.105514>.

6. Persova, M.G. Improving the computational efficiency of solving multisource 3-D airborne electromagnetic problems in complex geological media / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.V. Vagin, D.S. Kiselev, **A.P. Sivenkova**, A.M. Grif //Computational Geosciences. – 2021. – T. 25. – №. 6. – C. 1957-1981. <https://doi.org/10.1007/s10596-021-10095-6>

7. Persova, M.G. Three-dimensional inversion of airborne data with applications for detecting elongated subvertical bodies overlapped by an inhomogeneous conductive layer with topography / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.V. Vagin, D.S. Kiselev, A.M. Grif, Y.I. Koshkina, **A.P. Sivenkova** //Geophysical Prospecting. – 2020. – T. 68. – №. 7. – C. 2217-2253. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12979>.

8. Persova, M.G. Geometric 2.5D inversion of marine time domain electromagnetic data with application to hydrocarbon deposits prospecting / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, J.K. Kjerstad, **A.P. Sivenkova**, A.S. Kiseleva, D.S. Kiselev //Journal of Applied Geophysics. – 2023. – Vol. 212. – Art. 104996 (23 p.). <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2023.104996>.

9. Persova, M.G. Geometric 3-D inversion of airborne time-domain electromagnetic data with applications to kimberlite pipes prospecting in a complex medium / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, G.M. Trigubovich, D.V. Vagin, A.M. Grif, D.S. Kiselev, **A.P. Sivenkova** //Journal of Applied Geophysics. – 2022. – Vol. 200. – Art. 104611. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2022.104611>.

10. Persova, M.G. 3D Modeling of Time-domain AEM Fields with IP Effect in Complex Media with Topography/ M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.V. Vagin, **A.P. Sivenkova**, A.S. Kiseleva, D.S. Kiselev, M.G. Tokareva //Journal of Environmental and Engineering Geophysics. – 2022. – T. 27. – №. 1. – C. 23-32. <https://doi.org/10.32389/JEEG21-027>.

Работы, опубликованные в изданиях, индексируемых в международной информационно-аналитической системе научного цитирования Scopus:

11. Persova, M.G. Application of 3D Airborne Electrical Survey Data Processing in a Distributed Computing System when Solving the Problem of Searching for Polymetallic Ores / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.S. Kiselev, **A.P. Sivenkova**, D.A. Leonovich, M.G. Tokareva //2023 IEEE XVI International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). – IEEE, 2023. – C. 1240-1243. <https://doi.org/10.1109/APEIE59731.2023.10347904>.

12. Soloveichik, Y.G. Comparative Analysis of Airborne Electrical Prospecting Technologies Using Helicopter Platforms and UAVs when Searching for Kimberlite Pipes / Y.G. Soloveichik, M.G. Persova, **A.P. Sivenkova**, D.S. Kiselev, E.I. Simon, D.A. Leonovich, //2023 IEEE XVI International Scientific and Technical Conference Actual

- Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). – IEEE, 2023. – C. 1-4. <https://doi.org/10.1109/APEIE59731.2023.10347567>.
13. Persova, M.G. Comparative Analysis of the Resolution of Marine Electromagnetic Technologies in the Time and Frequency Domains / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.V. Vagin, **A.P. Sivenkova**, Y.I. Koshkina, M.G. Tokareva //2023 IEEE XVI International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). – IEEE, 2023. – C. 1210-1214. <https://doi.org/10.1109/APEIE59731.2023.10347768>.
14. Persova, M.G. Improving the Accuracy of 3-D Modeling Electromagnetic Fields in Marine Electrical Prospecting Problems / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.V. Vagin, **A.P. Sivenkova**, A.S. Kiseleva, M.G. Tokareva //2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE). – IEEE, 2021. – C. 583-586. <https://doi.org/10.1109/APEIE52976.2021.9647511>.
15. Persova, M.G. Resolution Analysis of Airborne Electromagnetic Survey Using Helicopter Platform and UAV / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.V. Vagin, D.S. Kiselev, **A.P. Sivenkova**, E.I. Simon //2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE). – IEEE, 2021. – C. 591-594. <https://doi.org/10.1109/APEIE52976.2021.9647480>.
16. Persova, M.G. Improving The Computational Efficiency of 3-D Modeling of Induced Polarization in Airborne Time-Domain Electromagnetic Problems / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.V. Vagin, A.S. Kiseleva, **A.P. Sivenkova**, E.I. Simon //Engineering and Mining Geophysics 2021. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2021. – T. 2021. – №. 1. – C. 1-9. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152081>.
17. Persova, M.G. The possibilities of geometric 3-D inversion for processing the UAV-TDEM data / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.V. Vagin, **A.P. Sivenkova**, A.S. Kiseleva, M.G. Tokareva //Engineering and Mining Geophysics 2021. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2021. – T. 2021. – №. 1. – C. 1-7. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152042>.
18. Belova, A.Y. Application of 3D Modeling of Electromagnetic Sounding Data to Identify Zones of Sulfide Mineralization of Copper-Porphyry Type in The Territory of Northern Kazakhstan / A.Y. Belova, M.S. Shkirya, M.G. Persova, **A.P. Sivenkova**, T.S. Shoykhonova, Y.A. Davydenko //Engineering and Mining Geophysics 2021. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2021. – T. 2021. – №. 1. – C. 1-11. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152039>
19. Persova, M.G. An approach to the geometric 3D inversion of airborne EM data for detection and geometrization of local targets overlapped by laterally inhomogeneous layers / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.V. Vagin, D.S. Kiselev, **A.P. Sivenkova**, Y.I. Koshkina //Engineering and Mining Geophysics 2020. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2020. – T. 2020. – №. 1. – C. 1-8. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202051090>.
20. Persova, M.G. The approaches to geometric EM 3-D inversion with consideration for IP effect in survey with electric lines / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, O.S. Trubacheva, D.V. Vagin, D.S. Kiselev, **A.P. Sivenkova**, Y.I. Koshkina //GeoBaikal 2020. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2020. – T. 2020. – №. 1. – C. 1-6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202052022>.

21. Persova, M.G. The induced polarization effect in airborne EM prospecting of ore deposits in the Ural Region / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.V. Vagin, **A.P. Sivenkova**, E.I. Simon, M.G. Tokareva //Engineering and Mining Geophysics 2020. – European Association of Geoscientists & Engineers, 2020. – Т. 2020. – №. 1. – С. 1-6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202051105>.

Работы, опубликованные в других изданиях:

22. Персова, М.Г. Об идентификации заглубленных объектов с высокой магнитной восприимчивостью, перекрытых неоднородным по магнитным свойствам верхним слоем, по данным комплексных аэрогеофизических съемок /М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, **А.П. Сивенкова**, Д.В. Вагин // Инженерная и рудная геофизика – 2024 : сб. материалов 20 науч.-практ. конф. и выст., Казань, 13 - 16 мая 2024 года – Москва : ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ, 2024. – С. 315–319. - ISBN 978-5-9651-1491-7.

23. Персова, М.Г. Возможности применения совместной 3D-инверсии для обработки аэрогеофизических данных. Методика и анализ чувствительности / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, **А.П. Сивенкова**, Д.В. Вагин, Д.С. Киселев, А.С. Киселева //Инженерная и рудная Геофизика 2023. – 2023. – С. 485-492. - ISBN 978-5-9651-1472-6.

24. Персова, М.Г. Возможности многомерной инверсии данных морской электроразведки при решении задачи поиска нефтегазовых месторождений. Опыт и перспективы/ М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, **А.П. Сивенкова**, Д.В. Вагин, Д.С. Киселев //Инженерная и рудная Геофизика 2023. – 2023. – С. 719-724. - ISBN 978-5-9651-1472-6.

25. Персова, М.Г. Параллельная реализация геометрической 3D-инверсии данных аэроэлектроразведки / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, Д.С. Киселев, А.С. Киселева, **А.П. Сивенкова**, Д.В. Вагин //Инженерная и рудная геофизика 2022. – 2022. – С. 457-464. – ISBN 978-5-9651-1407-8.

26. Персова, М.Г. Подход к мультифизичной 3D-инверсии данных электроразведки, магниторазведки и гравиразведки при поиске твердых полезных ископаемых / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, Д.В. Вагин, Д.С. Киселев, А.П. Сивенкова, А.С. Киселева, А.М. Гриф //Инженерная и рудная геофизика 2022. – 2022. – С. 422-429. – ISBN 978-5-9651-1407-8.

27. Бирюков, П.Г. Применение импульсной электроразведки для выделения кварц-сульфидных жил на Дальнем Востоке / П.Г. Бирюков, А.С. Башкеев, И.Н. Горячев, **А.П. Сивенкова**, М.С. Шкиря // XXIII Уральская Молодежная научная школа по геофизике. Сборник научных материалов. - Екатеринбург. - 2022. - С. 24-28..

28. Бирюков, П.Г. Первые результаты опытно-методических работ на месторождении золото-порфирового типа в Приморье / П.Г. Бирюков, С.А. Терешкин, М.С. Шкиря, **А.П. Сивенкова**, А.А. Гилишев //22-я уральская молодежная научная школа по геофизике: сборник научных материалов. Пермь – 2021. – С. 12-16.

29. Шойхонова, Т.С. Трехмерная инверсия данных импульсной электроразведки для поисков зон сульфидной минерализации на территории северного Казахстана / Т.С. Шойхонова, Е.А. Крайнова, М.С. Шкиря, А.Ю. Белова, **А.П. Сивенкова** //22-я уральская молодежная научная школа по геофизике: сборник научных материалов. Пермь – 2021. – С. 130-135.

30. **Сивенкова, А.П.**, Персова, М.Г. Интерпретация данных электромагнитного зондирования по технологии MobileMT // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. : в 9 ч., Новосибирск, 30 нояб.–4дек. 2020 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2020. – Ч. 2. – С. 152-155.

Программы для ЭВМ, зарегистрированные в ФИПС (Роспатент):

31. Персова, М.Г. Информационно-программная система обработки данных для сопровождения электромагнитных технологий геологоразведки / Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Вагин Д.В., Гриф А.М., Киселев Д.С., Кошкина Ю.И., Патрушев И.И., **Сивенкова А.П.**, Симон Е.И., Токарева М.Г. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019662177 от 18.09.2019. М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). – 2019

32. Персова, М.Г. Программный модуль для расчета процесса индукционной вызванной поляризации / Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Вагин Д.В., **Сивенкова А.П.** // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664136 от 09.11.2020. М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). – 2020

33. Персова, М.Г. Программный модуль для расчета нестационарных электромагнитных полей, порождаемых заземленной электрической линией в трехмерных средах с сложной геометрией поверхностей геологических слоев/ Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Вагин Д.В., **Сивенкова А.П.** // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021661749 от 15.07.2021. М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). – 2021

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К.Маркса, 20,
тел./факс (383) 346-08-57
формат 60 X 84/16 объем 1.25 п.л., тираж 100 экз.
Заказ № Р-04667. Подписано в печать 05.09.2025 г.