

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ  
НЕФТЯНОЙ ИНСТИТУТ»

*На правах рукописи*

**Мицын Сергей Валерьевич**

**Геоинформационный метод объёмного моделирования  
глубинного строения территории на основе данных  
геопотенциальных полей**

Специальность 1.6.20 – Геоинформатика, картография  
(технические науки)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении  
«Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт».

**Научный руководитель:** **Финкельштейн Михаил Янкелевич**, доктор технических наук, заведующий отделом «3D моделирования нефтегазоносных объектов» отделения геоинформатики ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт».

**Официальные оппоненты:** **Чесалов Леонид Евгеньевич**, доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора по информационным технологиям и защите информации ФГБУ «Гидроспецгеология»

**Вагизов Марсель Равильевич**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационных систем и технологий ФГБОУ ВО «СПбГЛТУ им. С.М. Кирова»

**Ведущая организация:** **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Университет «Дубна»**

Защита диссертации состоится « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета 24.2.365.01 при ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» по адресу: г. Санкт-Петербург, пр. Малоохтинский, д. 98, Актовый зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.rshu.ru/university/dissertations/> ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет».

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 192007, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Воронежская, д. 79, Российский государственный гидрометеорологический университет, Диссертационный совет 24.2.365.01, Ученому секретарю.

Автореферат диссертации разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.365.01  
к. воен. н., доцент

А.Г. Соколов

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность темы исследования**

Решение задач устойчивого экономического развития Российской Федерации невозможно без обеспечения народного хозяйства полезными ископаемыми. Стратегия развития минерально-сырьевой базы до 2035 года, утверждённая распоряжением Правительства № 2914-р от 22 декабря 2018 г., определяет приоритеты, цели и задачи геологической отрасли, направленные на устойчивое обеспечение минеральным сырьем потребностей экономики, которые включают развитие минерально-сырьевой базы, представляющей собой совокупность разведанных и оцененных запасов полезных ископаемых, а также локализованных и прогнозных ресурсов.

Эта задача может быть решена только благодаря обоснованному управлению геологоразведочными работами, проводимыми на разных этапах и стадиях. Стратегия отдельно выделяет важность регионального этапа этих работ как основания для формирования «поискового задела», уменьшающегося начиная с 90-х годов XX века. На региональном этапе одной из задач является изучение основных закономерностей геологического строения слабо изученных крупных территориальных единиц (напр., осадочных бассейнов, их участков). На основе аналогии строения исследуемой территории с уже изученными делается первичная оценка прогнозных ресурсов.

При камеральных исследованиях должен соблюдаться принцип модельности, постулирующий необходимость замены изучаемой территории на её модель. Пространственными объектами такого моделирования являются цифровые модели геологических объектов, для которых существенно свойство объёмности, поскольку, например, только так можно добиться топологической корректности. Информационный продукт такого моделирования – модель территории и строящиеся на её основе цифровые карты – является информационным ресурсом для первичной оценки потенциальных ресурсов полезных ископаемых и, таким образом, информационным ресурсом управления – планирования дальнейших уточняющих региональных и поисковых геологоразведочных работ. Таким образом, региональные исследования должны обеспечиваться геоинформационным объёмным моделированием глубинного строения территории.

*Геоинформационная объёмная модель* – модель, отображающая взаиморасположение подземных объёмных геологических объектов как пространственных объектов и содержащая их атрибутивные характеристики.

На первой (региональной) стадии работ имеется мало буровой и сейсмической информации, поэтому при моделировании важную роль должны играть информационные ресурсы дистанционного зондирования, в частности геопотенциальных полей. Такое моделирование должно опираться на использование геоинформационной системы, специализированной для решения геологических задач. Соответствующая ГИС должна иметь достаточное обеспечение для проведения геоинформационного объёмного моделирования глубинного строения территории. К основным компонентам ГИС относят техническое, программное и информационное обеспечение<sup>1</sup>.

В настоящее время в ФГБУ ВНИГНИ функционирует импортозамещающий программный комплекс ГИС INTEGRO, разработанный коллективом сотрудников организации. Тем самым выполняется постановление правительства РФ от 16 ноября 2015 г. N 1236 «Об установлении запрета на допуск программного обеспечения, происходящего из иностранных государств, для целей осуществления закупок для обеспечения государственных и муниципальных нужд». Этот программный комплекс предназначен для геоинформационной поддержки решения геологических задач.

Функциональные возможности ГИС INTEGRO включают визуализацию геоданных в 1D, 2D, 3D, редактирование, картографическую привязку растровых и векторных данных, пространственный анализ, решение прогнозных задач, построение и обработку объёмных моделей, подготовку и визуализацию цифровых карт и прочее. Множество задач, которые позволяет решать ГИС INTEGRO, включает: картографические задачи (сбор, систематизация, каталогизация данных, оцифровка, увязка массивов пространственных данных, оформление и печать рабочих и итоговых материалов), создание корректных цифровых карт по

---

<sup>1</sup> ГОСТ Р 52438-2005. Географические информационные системы. Термины и определения [Электронный ресурс] / Утвержден и введен в действие приказом Ростехрегулирования от 28.12.2005 г. № 423-ст. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200044680> (дата обращения: 15.08.2023 г.).

требованиям научно-редакционного совета Роснедра (блок «Геолкарта»); задачи прогноза полезных ископаемых и поиска перспективных территорий; ландшафтное дешифрирование спектрозональных изображений и т.д.

В ГИС INTEGRO имеется возможность одновременной трёхмерной визуализации и увязки картографических, профильных сейсмических, электроразведочных и скважинных данных, обработки и трёхмерной визуализации поверхностей, сечений и кубов данных. Благодаря этому могут быть построены модели глубинного строения территории, однако перечисленных информационных ресурсов недостаточно для построения достаточно точной и обоснованной модели на региональной стадии исследования. Для адекватного построения объёмных глубинных моделей, необходимых для планирования следующих стадий геологоразведочных работ, нужно пополнить информационное обеспечение ГИС INTEGRO инструментарием, основанным на обработке геопотенциальных полей.

Таким образом, важной *народно-хозяйственной задачей* является объёмное моделирование глубинного строения территории на региональном этапе для поддержки информационными ресурсами планирования последующих геологоразведочных работ. Для ее *решения* необходима разработка информационного обеспечения ГИС в виде метода геоинформационного моделирования глубинного строения территории на основе геопотенциальных полей.

### **Разработанность темы исследования**

Наиболее удобной моделью пространственных данных при объёмном моделировании глубинного строения территории является двух- или трёхмерная регулярная модель (регулярно-ячеистая, сеточная). Двумерная сетка используется для определения глубины залегания геологических горизонтов. Для прочих объектов наиболее удобна трёхмерная регулярная модель, где позиционность объектов определяется исходя из структуры регулярной сетки и атрибуции отдельных её трёхмерных ячеек к геологическим объектам, а также петрофизическим свойствам – например, средняя плотность, или пористость и связанная с ней нефтенасыщенность.

Региональная модель строится как композиция из двух моделей: слоистой модели и модели интрузий. Слоистая (структурная) модель представляет собой

представленные двумерной сеткой границы слоёв, соответствующих разным геологическим периодам и эпохам; отклонение границы от горизонтали соответствует различным событиям, условиям образования, может указывать на различный состав и отражаться в геопотенциальных полях в виде аномалий. Эта модель строится на основе информационных ресурсов, соответствующих сейсмическим и буровым исследованиям, а при их недостатке границы корректируются на основании информации о геопотенциальных полях. Одним из методов для построения такой модели является метод инверсии (решения обратной задачи) Приезжева<sup>2</sup>. Однако он требует доработки в виде методики, применимой к сеточным и регулярным моделям.

Интрузивные образования являются отдельными от слоёв объектами, и для их моделирования лучше всего подходят трёхмерные регулярные модели пространственных данных, где атрибуция задаёт принадлежность ячейки интрузии или фоновой слоистой модели. В этом случае моделирование – это обоснованное геопотенциальными полями позиционирование таких объектов в трёхмерном пространстве и атрибуция им петрофизических характеристик. Одним из подходящих методов такого моделирования является монтажный метод<sup>3</sup>, разрабатываемый в 70-е годы для двумерного моделирования и обретающий популярность в настоящее время в трёхмерном виде в связи с эволюционным развитием вычислительной техники.

Таким образом, анализ разработанности темы конкретизирует *решение* поставленной народно-хозяйственной задачи как разработку информационного обеспечения для ГИС INTEGRO в виде метода объёмного моделирования глубинного строения территории на основании данных геопотенциальных полей, состоящего из двух методик пересчёта данных геопотенциальных полей в распределение физического параметра на основе модификации метода Приезжева и монтажного метода.

---

<sup>2</sup> Приезжев И. И. Построение распределений физических параметров среды по данным гравиразведки, магнитометрии // Геофизика. 2005. № 3. С. 46-51.

<sup>3</sup> Страхов В. Н., Лапина М. И. Монтажный метод решения обратной задачи гравиметрии // Докл. АН СССР. 1976. Т. 227. № 2. С. 344-347.

## **Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

Тема исследования соответствует паспорту специальности 1.6.20 – «Геоинформатика, картография» по следующим пунктам:

П.11. Геоинформационные системы (ГИС). Математическое, информационное, лингвистическое и программное обеспечение ГИС и их приложений.

Соответствие имеется, так как разрабатываемое математическое и информационное обеспечение позволяет пополнить ГИС INTEGRO средствами геоинформационного моделирования глубинного строения территории на основе потенциальных полей, относящихся к пространственным данным, и такое моделирование включает позиционирование пространственных объектов в трёхмерном геопространстве.

### **Цель работы**

Целью работы является создание методического и алгоритмического обеспечения для геоинформационного объёмного моделирования глубинного строения территории на основе данных геопотенциальных полей.

### **Основные задачи работы**

1. Разработка методики и алгоритмического обеспечения пересчёта геопотенциальных полей, заданных на сетке, в эквивалентные распределения эффективного физического параметра с учётом априорных данных на основе дискретных преобразований Фурье.
2. Разработка методики экстраполяции потенциальных полей, заданных на сетке, по латерали с целью достижения корректности применения методов обработки, основанных на дискретных преобразованиях Фурье.
3. Разработка методики и алгоритмического обеспечения решения обратных задач на основе монтажного метода подбора физических параметров сеточных моделей среды с целью обеспечения возможности построения сложных моделей без использования больших вычислительных ресурсов.

**Объект исследования** – геоинформационная система обработки разнородных пространственных географических данных, специализированная для решения геологических задач.

**Предмет исследования** – процессы формирования информационного обеспечения ГИС INTEGRО при решении задачи трёхмерного моделирования глубинного строения территории.

**Научная новизна** диссертации заключается в следующем:

1. Разработана методика инверсии геопотенциальных полей на основе метода Приезжева, переносящая его на дискретные сеточные модели, обеспечивающая полную эквивалентность инверсии соответствующему ей полю и допускающая параметризацию, позволяющую подбирать модель под имеющиеся априорные данные.
2. Разработана новая методика экстраполяции полей, заданных на сетке, обеспечивающая непрерывность поля, его первых производных и периодичность поля.
3. Создана новая методика на основе монтажного метода, позволяющая строить содержательные модели среды, а также использующая групповые операции для ускорения вычислений и позволяющая строить модели без использования больших вычислительных ресурсов.

**Теоретическая значимость** работы заключается в следующем:

1. Теоретическая значимость методики, построенной на основе метода Приезжева, заключается в теоретической проработанности, которая обеспечила получение распределения физического параметра, поле от которого совпадает с наблюдаемым полем вплоть до точности, обеспечиваемой вычислительной машиной и программным обеспечением.
2. Теоретическая значимость разработанной методики на основе монтажного метода заключается в доказательстве возможности стабилизации монтажного метода через механизм приоритетов, что может использоваться для моделирования с использованием содержательных значений физического параметра.

**Практическая значимость** работы заключается в её направленности на решение актуальных для геологической отрасли задач геоинформационного моделирования глубинного строения территорий в условиях недостаточности скважинных и сейсмических данных.



Практическая ценность работы состоит в том, что разработанные методики и алгоритмическое обеспечение для обработки геопотенциальных полей, заданных на сетке, позволяют повысить точность построения трёхмерных глубинных моделей территорий, точнее локализовать геологические объекты и оценить их геометрические и физические характеристики.

### **Методология и методы исследования**

Использовались методы математического анализа, математического моделирования, методы численного решения дифференциальных уравнений, методы математической статистики, оптимального управления и распараллеливания вычислений.

### **Научные результаты, выносимые на защиту**

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

1. Методика и алгоритмическое обеспечение решения обратных гравимагнитных задач на основе дискретного преобразования Фурье обеспечивает корректное распространение метода Приезжева на поля, заданные в виде дискретных сеток. Методика допускает параметризацию, позволяющую получать модели физической среды, согласующиеся с априорными данными и отвечающие исходному полю.
2. Методика экстраполяции потенциальных полей обеспечивает периодичность и непрерывность продолжения поля и его первых производных, что позволяет подавить краевые эффекты при применении методов инверсии, основанных на дискретных преобразованиях Фурье.
3. Методика и алгоритмическое обеспечение решения обратных гравимагнитных задач на основе монтажного метода используют механизм приоритетов и групповые операции, чем достигается возможность построения моделей сложнопостроенных сред на персональных компьютерах.

### **Достоверность результатов.**

Методика и алгоритмическое обеспечение для пересчёта сеточных моделей полей в эквивалентное распределение физического параметра на основе метода Приезжева обоснованы тщательным анализом корректности переноса результатов,

основанных на непрерывных преобразованиях Фурье, на дискретные преобразования Фурье и сеточные модели поля и среды.

Достоверность всех изложенных результатов подтверждается многочисленными численными экспериментами, проведенными с использованием модельных ситуаций.

Кроме того достоверность полученных результатов подтверждается успешной апробацией разработанного программного обеспечения на различных технологических этапах трёхмерного моделирования территории при выполнении государственного задания ФГБУ «ВНИГНИ», включая Енисей-Хатангский региональный прогиб, Предуральский прогиб, зону сочленения Волго-Уральской антеклизы и Тимано-Печорской плиты, Астраханский свод, Прикаспийскую впадину, Жигулёвско-Пугачёвский свод Волго-Уральской антеклизы, зону сочленения Байкитской антеклизы и Курейской синеклизы и др.

### **Внедрение**

В результате проведённых исследований было разработано и внедрено в ГИС INTEGRО алгоритмическое и программное обеспечение, реализующее все разработанные методики. Разработанные и модернизированные методики в составе ГИС INTEGRО используются для моделирования трёхмерного строения территорий в условиях недостаточности скважинных и сейсмических данных, актуальной для организаций геологической отрасли. В основе диссертации лежат работы, проведённые в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт». Результаты исследований были успешно применены при моделировании территории Енисей-Хатангского регионального прогиба и других территорий в рамках выполнения институтом государственного задания.

### **Личный вклад автора**

Автор самостоятельно выполнил теоретический анализ методов обработки геопотенциальных полей, выполнил их модернизацию, заключающуюся в разработке методик, и разработал алгоритмическое и программное обеспечение, реализующее разработанные методики, на языке программирования C++. Автор принимал активное участие в разработке методического и технологического обеспечения решения обратных задач на основе разработанных методик: в

разработке вычислительных схем и графов; тестировании и испытании на модельных и практических примерах; разработке методического обеспечения на основе разработанного программного обеспечения. Разработанное программное обеспечение интегрировано автором в ГИС INTEGRO.

### **Апробация**

Результаты исследований отражены в шести печатных работах по теме диссертации в журналах, рекомендованных ВАК, а также в выступлении на 48-м заседании международного научного семинара им. Д. Г. Успенского – В. Н. Страхова «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей», 2022.

### **Публикации**

Результаты работы опубликованы в шести публикациях в журналах, входящих в перечень ВАК.

### **Структура и объём публикации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения общим объёмом 155 страниц, содержит список литературы из 78 источников.

## **Основное содержание работы**

**Во введении** отражена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, её разработанность, сформулированы цели и решаемые задачи, основные положения, выносимые на защиту, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** выполнен анализ предметной области, приводятся геофизические и геоинформационные основы для создания объёмных моделей глубинного строения территории, рассмотрены методы построения таких моделей на основе обработки данных геопотенциальных полей.

Рассмотрены геофизические и геоинформационные основы для моделирования глубинного строения территории: представления для полей и физической среды, взаимосвязи между ними, роль прямых и обратных задач при моделировании, виды этих задач.

Рассмотрены различные программное обеспечение ГИС и САПР для создания моделей глубинного строения территории, выявлено, что специализированное ПО

ГИС лучше всего подходит для такого рода задач, в качестве такового выделен программный комплекс ГИС INTEGR0. Показано, что требуется доработка такого ПО в виде разработки методик, поддерживающих моделирование на основе обработки гравимагнитных данных.

**Во второй главе** представлены результаты разработки методики и алгоритмического обеспечения для пересчёта геопотенциальных полей, заданных на сетке, в эквивалентные распределения эффективного физического параметра на основе дискретных преобразований Фурье. Представлены преимущества разработанной методики. Представлен способ регуляризации метода.

При региональном моделировании глубинного строения территории важное место занимает задача пересчёта геопотенциальных полей, заданных на сетке, в эффективный физический параметр (избыточные плотности и намагниченности) в нижнем полупространстве. Представленное в данной работе алгоритмическое и программное обеспечение основано на методе, разработанном Приезжевым<sup>4</sup>, и восходящем к трудам Кобрунова, Варфоломеева<sup>5</sup> и других исследователей. Теоретические основы заключаются в инверсии способа решения прямой задачи для сеточных моделей поля и распределения физического параметра в нижнем полупространстве. Связь между распределением физического параметра, продуцирующего аномальное поле, и полем рассматривается как свёртка, а использование теоремы о свёртке для дискретных преобразований Фурье позволяет сократить вычислительную сложность.

Договоримся называть непрерывными моделями модели, выражающиеся в виде функций, определённых на плоскости  $\mathbb{R}^2$  или нижнем полупространстве  $E_- \subset \mathbb{R}^3$  (при  $z < 0$ ), при этом подразумевая все требования (например, принадлежность Гильбертову пространству и пр.). Определим скалярное произведение функций вдоль оси  $z$ :  $f \cdot h = \int_{-\infty}^0 f h^* dz$ , где  $h^*$  – комплексное сопряжение  $h$ . Решение прямой задачи для непрерывных моделей состоит в выражении первой вертикальной производной  $u = \frac{\delta W}{\delta z}$  гравитационного

---

<sup>4</sup> Приезжев И.И. Построение распределений физических параметров среды по данным гравиразведки, магнитометрии // Геофизика. 2005. № 3. С. 46-51.

<sup>5</sup> Кобрунов А.И., Варфоломеев В.А. Об одном методе  $\varepsilon$ -эквивалентного перераспределения и его использовании для интерпретации гравитационного поля // Физика Земли. 1981. № 10. С. 25–44.

потенциала  $W$  через непрерывные преобразования Фурье вдоль осей  $x$  и  $y$  для действительных функций:  $\mathcal{F} = \mathcal{F}_{x,y \rightarrow v_x, v_y}: (\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}) \rightarrow (\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R})$  или  $(\mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}) \rightarrow (\mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R})$  и поля точечной массы (или диполя)  $k$  ( $K = \mathcal{F}k$ ) и распределения физического параметра  $g \in \mathfrak{G}$  ( $G = \mathcal{F}g$ ):

$$u = \mathcal{F}^{-1}[U] = \mathcal{F}^{-1}[K \cdot G^*]. \quad (1.1)$$

Здесь двумерное преобразование Фурье определено как  $\mathcal{F}f = \iint_{\mathbb{R}^2} f(x, y) e^{-2\pi i(xv_x + yv_y)} dx dy$ , а результат преобразования – функция от двух переменных  $v_x$  и  $v_y$  или трёх –  $v_x$ ,  $v_y$  и  $z$ ;  $v_x$  и  $v_y$  называются волновыми числами (волновое число, или пространственную частоту, можно интерпретировать как количество колебаний пространственной синусоиды на единицу длины). Особенность уравнения (1.1) заключается в том, что в нём вместо тройного интеграла по объёму используется только одинарный интеграл по глубине благодаря теореме о свёртке, а при использовании быстрых дискретных преобразований Фурье удаётся добиться значительного прироста производительности.

Возьмём произвольное распределение  $\psi \in \mathfrak{G}$  (с преобразованием Фурье  $\Psi = \mathcal{F}\psi$ ), такое, чтобы для каждой пары волновых чисел  $v_x$  и  $v_y$  распределение  $\psi$  имело ненулевое аномальное поле:

$$\forall v_x, v_y: [K \cdot \Psi^*](v_x, v_y) \neq 0. \quad (1.2)$$

При соблюдении условия (1.2) с помощью следующего выражения из  $\psi$  можно получить другое распределение плотностей, эквивалентное по полю  $u$ :

$$A_{\Phi}^{-1}[u] = \mathcal{F}^{-1} \frac{\Psi}{K \cdot \Psi^*} \mathcal{F}u = \mathcal{F}^{-1}[\Phi \mathcal{F}u]. \quad (1.3)$$

Таким образом, выбирая произвольную функцию  $\psi$ , для которой выполняется (1.2), можно получить оператор инверсии согласно (1.3). На практике неравенство (1.2) формулируется более строго:  $K \cdot \Psi^*$  должно быть далеко от нуля для всех пар волновых чисел. В непрерывном виде композиция оператора прямой и обратной задачи – тождественный оператор:

$$AA_{\Phi}^{-1} = I. \quad (1.4)$$

В работах Приезжева получен класс функций для построения оператора обратной задачи в аналитическом виде:  $\Phi_n(\omega, z) = \frac{n^{n+1}}{n!} z^n \omega^n e^{-n\omega z}$

( $\omega = 2\pi\sqrt{v_x^2 + v_y^2}$  – угловая частота), при этом предлагается использовать аналитический вид для дискретных моделей  $\dot{\Phi}_n$ , из-за чего равенство (1.4) выполняется лишь приблизительно. Это является недостатком предложенного им метода; вместо этого в данной работе предлагается задавать аналитический вид для  $\Psi$  или  $\psi$ , а  $\dot{\Phi}(\Psi)$  получать численно. Такой же способ предлагается в некоторых работах Приезжева при использовании априорно заданной плотностной модели, полученной по сейсмическим данным в результате решения обратной динамической задачи, но он не затрагивает общий вид без априорных данных.

Аналогом непрерывных преобразований Фурье (НПФ) в сеточных моделях являются дискретные преобразования Фурье (ДПФ); необходимо учитывать ряд их особенностей. Требования к разрешающей способности сеточных моделей для различения спектров отдельных точечных источников изложены в работе Приезжева<sup>6</sup>; остальные особенности изложены в работе:

1. Эффекты периодичности сигнала ДПФ и наложения спектров<sup>7</sup>.
2. На сеточных моделях использование точечных масс в качестве аппроксимации элементов модели среды может приводить к значительным ошибкам, поэтому требуется особый вид ядра свёртки  $\dot{k}_z(x, y) \neq k_z(x, y)$ . Так, в ГИС INTEGRO используется тип модели, где точкам сеточной модели физической среды соотносятся элементы – прямоугольные призмы, имеющие постоянную плотность; тогда  $\dot{k}$  равна тройному интегралу от  $k(x, y, z)$  по объёму такой ячейки.
3. Сеточные модели конечны по глубине, и, как следствие, в формуле скалярного произведения значения подынтегральной величины ниже некоторой глубины равны нулю вне зависимости от выбранной  $\psi$ .

В связи с вышеперечисленным результаты, полученные на непрерывных моделях, транслируются на сеточные модели нетривиальным образом, а использование аналитического вида для  $\dot{\Phi}$  ведёт к потере свойства

---

<sup>6</sup> Приезжев И.И. Информационные технологии комплексной интерпретации геофизических данных для геологического моделирования: дис. ... д-ра техн.наук: 25.00.10. М., 2010. 232 с. : ил.

<sup>7</sup> Смит С. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников / Пер. с англ. А. Ю. Линовича, С. В. Витязева, И. С. Гусинского. М.: Додэка-XXI, 2012. 720 с. +CD: ил.

тождественности композиции прямого и обратного операторов. Поэтому в ГИС INTEGRО используется аналитический вид только лишь для  $\dot{\Psi}$  с дальнейшим численным решением для  $\dot{\Phi} = \frac{\dot{\Psi}}{\dot{K} \cdot \dot{\Psi}}$ . По сравнению с методом Приезжева теряется физический смысл в виде разделения точечных источников, но зато выполняется равенство  $AA_{\dot{\Phi}}^{-1}\dot{u} = \dot{u}$ .

Формула (1.3) позволяет использовать целый спектр разнообразных функций для  $\dot{\Psi}$ . В работах Приезжева среди прочего предлагается использовать плотностную модель, унаследованную от сейсмических априорных данных. Методом проб и ошибок в ходе практического применения алгоритмов и программ была получена формула, модифицирующая некоторую общую цилиндрическую в плоскости  $xOy$  функцию  $f(r, z)$ :  $\psi(r, z) = |z|^{-\beta} f(r, \alpha z)$ , где  $\alpha$  – множитель по глубине,  $\beta$  – экспонента при  $z$ ,  $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ . Меняя параметры  $\alpha$  и  $\beta$ , можно переносить «основную» массу ненулевых значений физического параметра (избыточная плотность, эффективная намагниченность) по оси  $Oz$ . В ходе апробации выяснено, что во многих ситуациях удаётся подобрать  $\alpha$  и  $\beta$  так, что результат инверсии не противоречит другим априорным данным (профильным сейсмическим, электроразведочным и пр.). Используется  $f(r, z) = (1 - (rz^{-1})^2)e^{(rz^{-1})^2}$ , хотя теоретически класс подходящих функций достаточно большой.

Для случаев, когда из априорных данных следует такая параметризация методики, что решение обратной задачи становится нестабильным, разработан способ регуляризации метода. Для этого оператор  $A_{\dot{\Phi}}^{-1}$  рассматривается в спектральном виде:  $A_{\dot{\Phi}}^{-1} = \mathcal{F}^{-1} \mathfrak{K}_{\dot{\Phi}}^{-1} \mathcal{F} u$ . Оператор  $\mathfrak{K}_{\dot{\Phi}}^{-1}$  имеет соответствующую матрицу, для которой легко выводятся её собственные числа и способ модификации оператора  $\mathfrak{K}_{\dot{\Phi}}^{-1}$ , при котором ограничивается его число обусловленности. Приведено два алгоритма для нерегуляризованной и регуляризованной методики. Регуляризация позволяет получить стабильную методику для пересчёта в распределение физического параметра, продуцирующее поле, близкое к наблюдаемому.

Таким образом, разработанная методика является модернизацией метода построения инверсии Приезжева и отличается от него тем, что, во-первых,

вычисляемая инверсия действительно является эквивалентным распределением физического параметра, и, во-вторых, позволяет задавать параметризацию ( $\alpha$  и  $\beta$ ) так, чтобы подбирать инверсию под априорные данные. Ограничением разработанной методики является невозможность иметь различные распределения в разных областях сетки (например, различные параметры  $\alpha$  и  $\beta$  в различных областях сетки).

**В третьей главе** представлены результаты разработки методики экстраполяции сеточных моделей геопотенциальных полей по латерали, необходимые для корректного применения методики инверсии гравимагнитных полей, основанных на дискретных преобразованиях Фурье.

Методы пересчёта геопотенциальных полей, заданных на сетке, в эквивалентные распределения физического параметра, обсуждаемые в главе 2, основаны на дискретных преобразованиях Фурье (ДПФ), важным свойством которых является периодичность преобразовываемого сигнала. Если же сигнал не периодичен, то такая ситуация эквивалентна периодическому сигналу с разрывом, и обработка сеточных данных такого сигнала вызывает значительные краевые эффекты. Также такой вид обработки требует наличия заполненной прямоугольной сетки (без пропусков данных). С целью решения этих проблем была разработана методика экстраполяции геопотенциальных полей, заданных на сетке, подавляющая краевые эффекты за счёт периодичности результирующего сигнала, непрерывности первых производных и, как следствие, отсутствия ложных экстремумов на границе между областью, содержащей исходные данные, и областью экстраполяции.

Обозначим исходную сеточную модель аномального геопотенциального поля как функцию  $u = u(x_j, y_i)$ . Обозначим  $B$  подмножество прямоугольной сетки, на котором известны значения функции  $u(x_j, y_i) = \alpha_{j,i}$ , и которая дополняется до другой, большей сетки  $\Omega = \{x_j = j\Delta x\} \times \{y_i = i\Delta y\}$ ,  $i \in \{0, 1, \dots, n_y - 1\}$ ,  $j \in \{0, 1, \dots, n_x - 1\}$ , причём  $B \subset \Omega$ . Задача экстраполяции модели геопотенциального поля заключается в построении функции  $\hat{u}$ , определённой везде на  $\Omega$ , причём для  $\forall (x_j, y_i) \in B: \hat{u}(x_j, y_i) = \alpha_{j,i}$ .

Разработанная методика экстраполяции основана на постановке и решении краевой задачи, не обязательно описывающей физический процесс,



продуцирующий поле, а индуцируемой требованиями к свойству периодичности сеточных моделей:

1. Отсутствие разрыва  $\hat{u}$  на границе  $\partial V$  области  $V$  и в области экстраполяции  $\bar{V} = \Omega \setminus V$  в целом. Разрыв функции  $\hat{u}$  продуцирует большие ложные аномалии в объёме физической среды, находящейся под разрывом.
2. Отсутствие разрыва первых частных производных  $\hat{u}$  на границе  $\partial V$  области  $V$  и в области экстраполяции  $\bar{V}$ . ДПФ функции  $\hat{u}$ , содержащей разрывы первых частных производных, содержит высокочастотный шум, который отражается в инверсии в виде ложных аномалий, находящихся близко к поверхности.
3. Периодичность  $\hat{u}$  требуется исходя из требования к периодичности сигнала, для которого строится ДПФ.

С целью экстраполяции осуществляется вычисление экстраполированного поля  $\hat{u}$  через численное решение следующей краевой задачи:  $Q(\hat{u}) = \partial^4 \hat{u} / \partial x^4 + \partial^4 \hat{u} / \partial y^4 = 0$  для области экстраполяции с использованием краевых условий в виде  $\hat{u} = u$  для точек сетки, в которых значения поля заданы. При этом границы сетки соединяются с противоположными границами в виде тора. Для численной аппроксимации оператора  $Q$  методом конечных разностей используется следующий оконный шаблон:

$$\left\{ \begin{array}{ccccc} & & 1 & & \\ & & -4 & & \\ 1 & -4 & 12 & -4 & 1 \\ & & -4 & & \\ & & 1 & & \end{array} \right\}.$$

При использовании такого шаблона краевые условия накладываются не на одну точку из границы  $\partial V$ , но и на соседние с ней точки из  $V \setminus \partial V$ , таким образом достигая не только непрерывности  $\hat{u}$ , но и её первых производных тоже. В противоположность этому можно было бы выбрать задачу Лапласа  $\Delta u = 0$ , в предположении, что в плоскости  $z = 0$  не содержится ненулевых значений физического параметра. Однако необходимо учитывать, что физический закон распространяется на трёхмерное пространство, т.е. оператор Лапласа необходимо рассчитывать по трём направлениям, однако сетка, на которой задано поле, – двумерная, и, значит, выбор задачи  $\Delta \hat{u} = 0$  соответствует физическим законам не

более, чем  $Q(\hat{u}) = 0$ . На практике оператор Лапласа хотя и продуцирует непрерывную экстраполяцию поля с непрерывными первыми производными, но на границе экстраполяции имеется разрыв первой производной по перпендикулярному к границе направлению, что ведёт к появлению ложных аномалий в рассчитываемой инверсии.

Разработанная методика экстраполяции сеточных моделей позволяет трансформировать поле в периодическое для использования в процедурах инверсии обратной задачи. Метод имеет высокую эффективность подавления краевых эффектов по сравнению с другими обычно используемыми методами (отражение, линейная интерполяция).

Другим преимуществом предложенной методики продолжения поля по латерали, по сравнению с отражением, является то, что при использовании отражения размер сетки увеличивается в 4 раза (в 2 раза по каждой оси), в то время как в указанном методе достаточно сделать экстраполяцию на 10-30%, в зависимости от конкретного поля, а также наличия тренда и используемых методов редукции поля. Это уменьшает требования к вычислительным ресурсам при дальнейшей обработке данных.

**В четвёртой главе** представлены результаты разработки методики и алгоритмического обеспечения обратных гравимагнитных задач на основе монтажного метода. Методика предназначена для моделирования геометрии интрузивных тел в рамках построения объёмных моделей глубинного строения территории.

Монтажный метод можно описать как метод, заключающийся в итеративном процессе последовательного приближения решения (квазирешения) обратной задачи через итеративную модификацию атрибута принадлежности отдельных элементов сеточной модели среды к интрузивному телу или среде, осуществляемую с учётом исходящих из априорной информации ограничений на возможные модификации и значения плотностей. Процесс решения просто интерпретируется исследователем, например, как заполнение пространства геологическими аномалообразующими объектами.

На основе опыта работы с монтажным методом разработано алгоритмическое и программное обеспечение для ГИС INTEGR0 на его основе,

позволяющее проводить региональное трёхмерное моделирование в виде неоднородной вмещающей среды с большим количеством аномалообразующих объектов. В различных работах указывается на неустойчивость монтажного метода даже при решении задач на два тела с разнознаковой плотностью. В ГИС INTEGRО реализован механизм приоритетов для стабилизации метода и работы с некорректными задачами в контексте регионального моделирования. Также важной проблемой является значительная (не асимптотическая) сложность вычислительной задачи в связи с большим размером получаемой модели.

Поле и территория моделируются сетками, причём сетка территории состоит из прямоугольных элементов  $\mathbb{V} = \{v\}$ . Для моделирования тел вводится понятие класса, представляющего собой множество элементов, логически объединённых, а класс не пересекается с другими классами; например, классом может быть вмещающая среда, тело, а может быть группа тел одного состава или генеза. Каждому элементу ставится в соответствие метка класса, и вводится классовое отображение  $L(v): \mathbb{V} \rightarrow \mathbb{L}$ ,  $\mathbb{L} \subset \mathbb{Z}_0$  – множество меток классов. Значения физического параметра элементов определяются функциями физического параметра  $D: \mathbb{L} \times \mathbb{V} \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $D(l, v) = D_l(v)$ , и их основе определяется композитная модель  $M = M_{L,D}: \mathbb{V} \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $M(v) = D(L(v), v)$ . Эволюция модели состоит в выборе и применении модификации  $\mu$  на шаге  $i$ , мы это обозначаем как  $L_{i+1} = L_i + \mu$ . Модификация – атомарное изменение классового отображения, и описывается парой элементов  $\mu = (v, w) \in \mathbb{W} \subset \mathbb{V}^2$ , где метка переназначена у элемента  $v$ , а новое значение его метки – это значение метки элемента  $w$ . Для выбора общего направления эволюции используется невязка поля и разница норм невязок  $r(\mu)$  между моделями  $L_i$  и  $L_{i+1}$ .

Далее изложены два важных аспекта разработанной методики и алгоритмического обеспечения, имеющие практическую ценность в виде возможности работы с большими и сложными моделями на ограниченных вычислительных ресурсах.

1. Смещение акцента с минимизации функционала на контроль эволюции модели: эволюция определяется не стремлением минимизировать функционал, а через приоритет, провоцирующий желаемую эволюцию. Для применения выбирается модификация с максимальным приоритетом, который на данный момент учитывает не только изменение невязки, но и глубину залегания целевого

элемента и метки класса других элементов в небольшой его окрестности. Учёт окрестности элемента позволяет создавать гладкие классы (тела), не содержащие отростков, но не обязательно выпуклые. Эта особенность алгоритма стабилизирует решение обратной задачи и в результате позволяет работать с некорректно поставленными задачами, каковыми являются задачи построения сложных моделей на основе данных гравимагнитных полей. Этот результат обоснован практикой применения метода при построении 3D модели территории Енисей-Хатангского прогиба.

Использование приоритетов поощряет построение адекватных моделей, но не запрещает построение неустойчивых решений. В связи с этим следует рассматривать не конечное решение, а эволюцию системы в виде цепочки её промежуточных состояний. Так, если метод неустойчив, то при завершении алгоритма, как правило, получаются неадекватные модели – например, ветвистые. Такие модели можно назвать явно неадекватными в том смысле, что при беглом осмотре ясно, что они не могут соответствовать хоть какой-то рациональной геологической обстановке. Но в реализованном варианте алгоритма модели становятся явно неадекватными не сразу, а только начиная с некоторой итерации. Таким образом, строится ряд моделей, например,  $L_0, L_n, L_{2n}, \dots, L_{mn}$ , и отбрасываются явно неадекватные модели в хвосте цепочки.

2. На каждой итерации применяется сразу группа модификаций классовой модели. Для этого в алгоритме каждая итерация разбивается на два этапа: сбор наиболее приоритетных дескрипторов модификаций и их применение по очереди в соответствии с их приоритетом на момент сбора. Таким образом алгоритм выполняется намного быстрее, но расплатой становится потеря «оптимальности» (в некотором смысле): если стоит цель применения модификаций в соответствии с их приоритетом, то после применения каждой модификации из очереди приоритет остальных модификаций необходимо пересчитывать, иначе может возникнуть ситуация, когда применяются менее приоритетные модификации в ущерб более приоритетным. На практике было решено придерживаться принципа, при котором производится перерасчёт невязки для наиболее приоритетной из оставшихся модификаций, и применение модификации осуществляется только в случае уменьшения невязки. В этом случае тот факт, что текущая невязка  $r(L_i)$  всегда

уменьшается, гарантирует сходимость, хотя на практике сходимость не важна ввиду наличия первого пункта.

Вычисления на первом этапе (этапе сбора потенциальных модификаций) распараллеливаются идеально, так как имеется идеальный параллелизм по данным. Благодаря этому реализованы одновременные параллельные вычисления и на центральном процессоре, и на графических ускорителях (GPGPU) с использованием технологии CUDA. Поскольку для успешного ускорения расчётов с помощью технологии CUDA на доступных графических ускорителях необходимо использовать вычисления с одинарной точностью (32 бита), был проведён анализ точности вычислений с одинарной машинной точностью. Было выявлено, что вычисление значений аномального поля одного единичного аномалообразующего элемента в точечной аппроксимации допустимо производить с использованием одинарной точности, а влияние вычисленного поля на уменьшение нормы невязки при применении модификации необходимо рассчитывать уже с двойной (64 битной) точностью.

На втором этапе (этапе применения модификаций) каждый дескриптор необходимо обрабатывать последовательно, т.к. производится пересчёт невязки. Для сбора дескрипторов модификаций используется очередь дескрипторов модификаций с приоритетом и с ограниченной максимальной длиной, и при превышении длины очереди наименее приоритетные дескрипторы удаляются.

Использование групповых операций значительно ускоряет исполнение алгоритма, позволяя строить большие модели при использовании малых объёмов вычислительных ресурсов. Этот результат также обоснован практикой применения алгоритма, а также моделированием на простых модельных данных.

Итак, разработана методика и алгоритмическое обеспечение для построения больших 3D моделей глубинного строения территорий на основе обработки данных гравимагнитных полей монтажным методом, предназначенные для моделирования интрузивных тел. Разработки позволяют обходить проблему некорректности решения обратной задачи и допускают работу с большими моделями с использованием малых вычислительных ресурсов.

**В пятой главе** описано практическое применение разработанных методик и алгоритмического обеспечения при моделировании глубинного строения Енисей-

Хатангского регионального прогиба (ЕХРП) по геолого-геофизическим материалам исследований Гыданской и Енисей-Хатангской нефтеперспективных областей.

В рамках этих работ при создании региональной геоинформационной 3D модели территории ЕХРП использовались методические подходы и технологические разработки построения комплексных 3D геолого-геофизических моделей, базирующиеся на разработанных методиках и алгоритмическом обеспечении. Применяемые методы анализа гравиметрических данных опирались на результаты сейсморазведки 2D, электроразведки, магниторазведки и априорную геологическую информацию.

Основой для построения структурного каркаса базовой плотностной слоистой модели являются профильные сейсмические разрезы по сети региональных профилей МОГТ2D и ГСЗ, а в ряде случаев – разрезы удельных электрических сопротивлений по профильным данным МТЗ. Для задания горизонтов, выделенных на разрезах, в межпрофильном пространстве была построена серия гравиметрических инверсий по разработанной методике на основе дискретных преобразований Фурье с различными параметрами, и была выбрана инверсия с оптимальными параметрами по наилучшему согласованию с априорными данными. Особенности распределения физического параметра в оптимальном случае служили основой для продолжения границ горизонтов, выделенных на опорных профилях, в пространство между профилями. Таким образом, на основе результатов инверсии, построенной разработанным методом, были уточнены структурные поверхности региональной модели.

Построенная модель в виде структурного каркаса не могла объяснить всё аномальное гравитационное поле, поскольку не содержала латеральные неоднородности разреза – интрузивные тела, разломные зоны и др. Моделирование таких образований проводилось с помощью монтажного метода обработки гравиметрических данных. Наглядным примером его использования являлось моделирование совокупности глубинных магматических образований в окрестности Гулинского массива в рамках построения модели строения южного борта ЕХРП (рис. 1). Магматические объекты имеют ярко выраженный контраст физических свойств по отношению к вмещающим породам, благодаря чему

хорошо запечатлеваются в геофизических полях (в частности, в поле силы тяжести).

На основе включения в полученную ранее слоистую модель латеральных неоднородностей была построена стартовая модель территории средствами ГИС INTEGRО. Она состояла из вмещающего структурного каркаса (градиентно-слоистой среды), а также тел пяти классов различной плотности, инициализированных набором эллипсоидов (рис. 1а). Монтажным методом была скорректирована геометрия классов, представлявших интрузивные тела. Построенная модель позволила скорректировать представления о морфологии и физических свойствах магматических объектов на изучаемой территории.

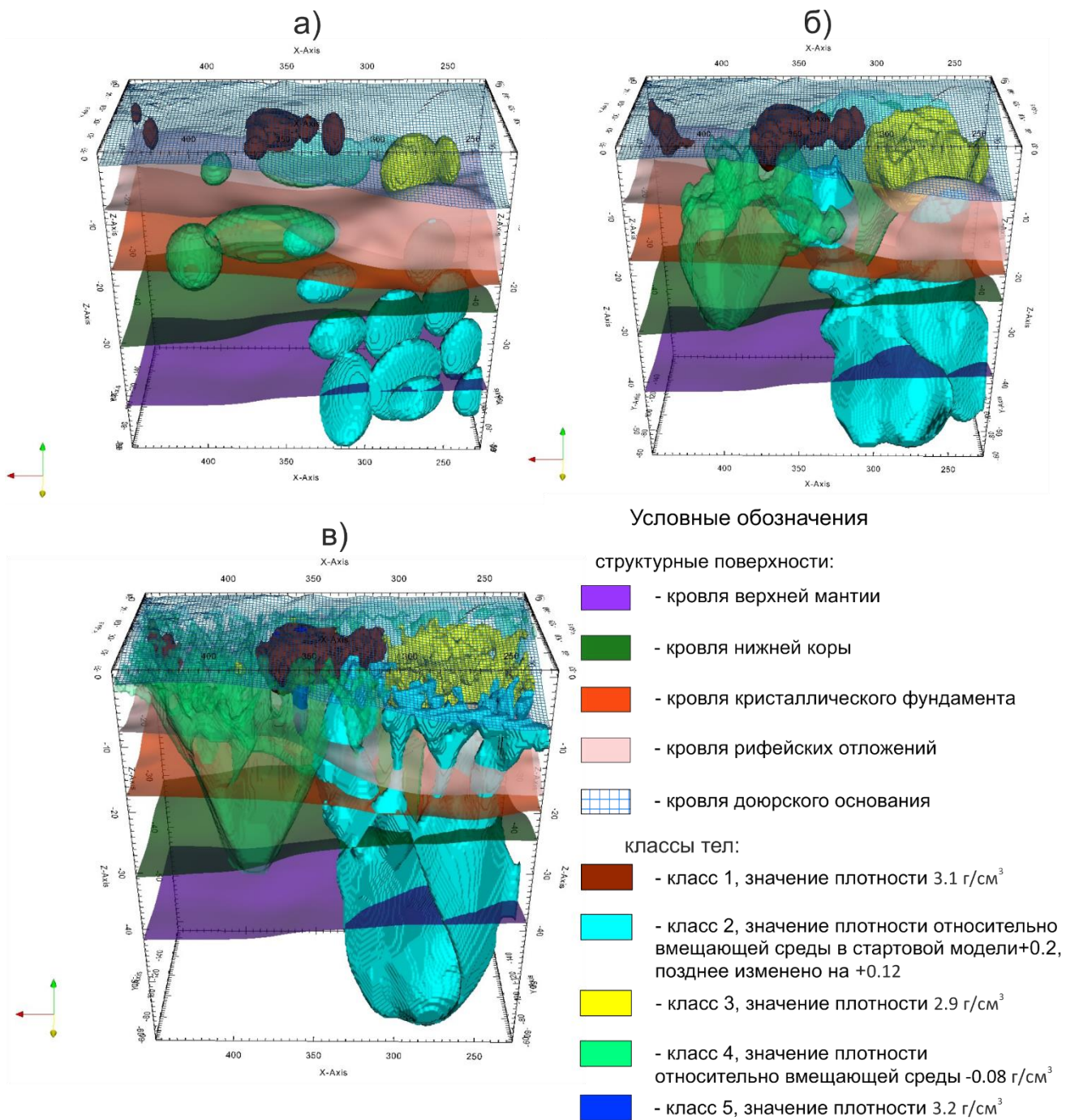


Рис. 1. Эволюция плотностной модели в 3D: а) стартовая модель; б) промежуточный вариант; в) итоговая модель

**В заключении** описаны основные выводы из проведённых исследований, а также изложены потенциальные направления для дальнейших исследований в затронутых областях.

Автором было разработано методическое и алгоритмическое обеспечение для решения ряда задач, возникающих при 3D моделировании глубинного



строения территории и на данный момент входящих в соответствующую технологию в составе ГИС INTEGRО. Разработанная методика и программное обеспечение, связанные с первым и вторым защищаемыми положениями, позволяют строить различные эквивалентные распределения плотностей и намагниченности и этим предоставляют возможности корректировки структурного каркаса, выявления и приблизительной локализации интрузий. Разработанные методика и алгоритмическое обеспечение на основе монтажного метода позволяют строить геометрию интрузивных образований и включать их в интегрированные геоинформационные 3D модели глубинного строения территории с учётом априорных данных. При этом они позволяют обходить проблему неоднозначности и некорректности обратной задачи, с одной стороны, и решают проблему большой вычислительной сложности монтажного метода – с другой.

### **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы**

Для методики обработки гравимагнитных данных на основе метода Приезжева как направление дальнейших исследований можно выделить вопрос о возможности введения различной параметризации для различных областей сетки или интеграции таких областей.

Для разработок на основе монтажного метода ввиду того, что даже с введённой параллельной обработкой и групповыми операциями метод является вычислительно сложным, для дальнейших исследований можно предложить вопрос о реализации возможности работы с отдельными участками (областями) исследуемого района, и здесь главной становится задача о интеграции и совмещении частных решений в одну модель. Другим потенциальным направлением разработки является реализация распределённых вычислений, а также разрешение частных вопросов об оптимальных значениях различных параметров оптимизации.

### **Список работ, опубликованных автором по теме диссертации**

*Публикации в журналах, входящих в перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученых степеней доктора и кандидата*

*наук, определенный Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации:*

1. Мицын, С.В. Экстраполяция сеточных моделей геофизических полей методом конечных разностей / С.В. Мицын, Г.А. Ососков // Геоинформатика. – 2016. – № 3. – С. 29-34.
2. Мицын, С.В. О численной реализации спектрального метода решения обратной задачи гравиразведки / С.В. Мицын // Геоинформатика. – 2018. – № 3. – С. 89-97.
3. Мицын, С.В. Трёхмерное плотностное моделирование земной коры юго-восточной части Фенноскандинавского щита в ГИС Integro / Н.Н. Пиманова, В.А. Спиридонов, Н.В. Шаров, С.В. Мицын // Геоинформатика. – 2019. – № 1. – С. 24-35.
4. Мицын, С.В. Новые методы решения прямых задач на геопотенциальные поля на профилях / С.В. Мицын // Геоинформатика. – 2020. – № 1. – С. 27-37.
5. Мицын, С.В. Монтажный метод в ГИС INTEGRО и его использование для решения обратной гравитационной задачи / С.В. Мицын, Е.М. Большаков // Геоинформатика. – 2021. – № 3. – С. 36-47.
6. Мицын, С.В. Монтажный метод в ГИС INTEGRО для решения обратной задачи магнитного поля / Т.П. Широкова, И.В. Спиридонов, С.В. Мицын // Геоинформатика. – 2022. – № 3. – С. 30-38.

*Доклады на конференциях:*

1. Мицын, С.В. Монтажный метод в ГИС INTEGRО для построения сложных моделей территории / С.В. Мицын, Е.М. Большаков // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей : Материалы 48-й сессии Международного научного семинара им. Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова: Сборник научных трудов, Санкт-Петербург, 24–28 января 2022 года. – Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2022. – С. 186-189.

Подписано в печать 10.08.2023.  
Формат 60x90/16. Усл. печ. л. 1,75.  
Тираж 100 экз. Заказ № 3.

Отпечатано в ФГБУ «ВНИГНИ».  
105118, Москва, шоссе Энтузиастов, 36.

