

Отзыв

официального оппонента на диссертационную работу Бызова Дениса Дмитриевича на тему «Методы интерпретации данных гравиметрии с использованием сеточных параллельных алгоритмов решения прямых и обратных задач» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых»

Актуальность работы. Изучение глубинного строения земной коры геофизическими методами и построение трёхмерных геолого-геофизических моделей на основе новых методов интерпретации геофизических данных является одним из самых перспективных направлений современных исследований в науках о Земле. Диссертационная работа Бызова Дениса Дмитриевича посвящена разработке новых методов и компьютерных технологий количественной интерпретации гравитационного поля на основе параллельных алгоритмов решения трехмерных линейных обратных задач гравиметрии и аналитического продолжения гармонических функций. Данные методики могут быть использованы при комплексной интерпретации сейсмических и гравитационных данных в целях построения моделей глубинного строения земной коры и верхней мантии. Эффективность разработанных алгоритмов и компьютерных технологий интерпретации гравиметрических данных показана автором на ряде модельных и реальных примерах.

Разработка методов трехмерной интерпретации гравиметрических данных с использованием математических методов и эффективных компьютерных технологий параллельных вычислений является актуальным и перспективным научным направлением в современной геофизике.

Диссертационная работа Бызова Дениса Дмитриевича состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Во введении приведён анализ отечественных и зарубежных публикаций по теме исследований, показана актуальность проблемы, сформулированы цели и задачи работы, ее научная новизна, отражена значимость полученных результатов.

В первой главе автор рассматривает быстрый алгоритм расчёта гравитационного поля от модели с кусочно-постоянным распределением плотности на равномерной сетке, отличающийся эффективностью и быстродействием. Приведены принципы построения алгоритма, выполнена серия вычислительных экспериментов на CPU и GPU. для трехмерной

плотностной грид-модели с различным числом элементов ее разбиения и детализацией сетки поля. Получены экспериментальные зависимости времени счета от числа разбиения сетки.

Вторая глава посвящена обоснованию выбора нормальной плотностной модели среды, используемой при создании региональных моделей земной коры и верхней мантии. Изложен метод выбора «плотности относимости» для трёхмерной модели геологической среды с переменной плотностью и вычисления аномального поля от неоднородных плотностных фрагментов. На конкретных тестовых и реальных примерах плотностной модели литосферы Тимано-Печорской плиты продемонстрированы возможности применения данного подхода при решении региональных задач плотностного моделирования по гравиметрическим данным.

В третьей главе рассматривается предложенный автором на основе сеточных алгоритмов метод трёхмерной интерпретации гравитационных аномалий, основанный на классическом решении линейной обратной задачи гравиметрии. На модельных (синтетических) примерах показано, что при использовании априорной зависимости плотности с глубиной имеет место согласованное с исходной моделью решение, в противном случае имеет место «не единственность» линейной обратной задачи гравиметрии, что обуславливает необходимость использования априорной геолого-геофизической информации. В данной главе приведены результаты использования данного алгоритма для построения плотностной модели для территории Северного и Среднего Урала.

В четвертой главе детально описан алгоритм разделения аномалий гравитационного поля по глубине залегания его источников, основанный на использовании методов аналитического продолжения гармонических функций. Автором предложена технология последовательных пересчетов на несколько высот (операция up) и глубин (операция down) с целью разделения полей по глубине и пространственной локализации источников аномальных масс в горизонтальном слое. Предложена методика использования пересчетов для построения плотностных моделей, согласованных с наблюдаемым полем. Приведен пример реализации методики для территории Северного и Среднего Урала.

В пятой главе приведены результаты построения детальной плотностной модели приповерхностного слоя земной коры по результатам среднемасштабных гравиметрических съемок (М 1:200000) с использованием предложенных автором алгоритмов и программных продуктов разделения полей и решения линейной обратной задачи гравиметрии. Полученные данные свидетельствуют об эффективности предлагаемых методов.

Структура и текст представленного автореферата диссертации полностью соответствуют диссертационной работе.

Целью диссертационной работы является разработка методов количественной интерпретации гравитационного поля на основе вычислительно эффективных параллельных алгоритмов решения трехмерных задач на сетках большой размерности: прямой задачи гравиметрии, линейной обратной задачи гравиметрии и задачи аналитического продолжения гармонических функций.

Для достижения поставленной цели автор поставил и решил следующие **научные задачи**:

1. Разработка эффективного алгоритма решения прямой задачи гравиметрии для модели с кусочно-постоянным распределением плотности на равномерной сетке и тестирование однопоточной и многопоточной программной реализации быстрого алгоритма.
2. Разработка способа выбора плотности относимости («плотности вмещающей среды») для расчета гравитационного поля от трехмерной модели среды с переменной плотностью и его апробация на синтетических и практических примерах.
3. Разработка алгоритма решения линейной обратной задачи гравиметрии, основанного на идее локализации.
4. Разработка вычислительно эффективных алгоритмов расчета интеграла Пуассона для представления гармонических функций во «внешнем» полупространстве по их граничным значениям на плоскости и аналитического продолжения гармонических функций с плоскости во «внутреннее» полупространство на основе решения интегрального уравнения Фредгольма 1-ого рода модифицированным методом локальных поправок с регуляризацией.
5. Разработка единых методических подходов для построения плотностных моделей приповерхностных объектов на основе авторских алгоритмов и программных продуктов.

Цель диссертационной работы и решенные автором научные задачи соответствуют современным направлениям развития методов интерпретации геофизических данных при разработке плотностных моделей земной коры, основанных на использовании современных математических методов и компьютерных технологий.

Автором вынесены на защиту следующие **научные результаты**:

1. Быстрый алгоритм и программное обеспечение вычисления гравитационного поля от модели с кусочно-постоянным распределением плотности на равномерной сетке, имеющий меньшую вычислительную сложность, чем расчет по «явной» формуле и использующий на порядок меньше ресурсов процессора и памяти.
2. Метод решения линейной обратной задачи гравиметрии, основанный на идее локализации, в совокупности с быстрым алгоритмом решения прямой задачи, позволяющий находить устойчивые решения в выбранном классе моделей и решать обратную задачу для моделей с количеством элементов разбиения порядка 10^6 практически в реальном времени.
3. Численный алгоритм пересчета гармонических функций в нижнее полупространство, основанный на решении интегрального уравнения Фредгольма 1-ого рода модифицированным методом локальных поправок с регуляризацией, позволяющий устойчиво разделять гравитационное поле по глубине.

Научная новизна полученных в диссертационной работе Бызова Д.Д. результатов заключается в следующем:

1. В работе предложен авторский подход представления плотностной модели строения земной коры в формате кусочно-постоянной сеточной функции с большим разрешением, значения которой модифицируются в результате количественной интерпретации гравитационного поля.
2. Используемые автором сеточные алгоритмы, относительно легко формализуемые в независимые последовательности однотипных расчетов, дают возможность применения эффективных схем параллельных вычислений.
3. Разработаны оригинальные алгоритмы решения прямой и линейной обратной задач гравиметрии для сеточных моделей, а также методика разделения разноглубинных аномалий на основе аналитического продолжения в верхнее и нижнее полупространства.

Практическая значимость диссертационной работы Бызова Д.Д. заключается в следующем:

- Предложенный автором аппарат решения линейной обратной задачи гравиметрии и пересчетов поля в рамках единой методики при наличии априорной геолого-геофизической информации позволяет строить геологически содержательные плотностные модели земной коры и

верхней мантии.

- Параллельная программная реализация предложенных алгоритмов на GPU на порядок быстрее однопоточной, что позволяет использовать ее для построения моделей с большим числом элементов разбиения.
- Получены новые данные о глубинном геологическом строении Северного и Среднего Урала

Достоверность и обоснованность результатов выполненных автором исследований подтверждается эффективностью и результативностью проведённых вычислительных экспериментов на модельных реальных гравиметрических данных.

Основные научные результаты диссертационной работы достаточно полно опубликованы в 11-ти научных статьях в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, а также в изданиях, включенных в международные базы данных Scopus/WoS. Апробация результатов исследований выполнялась на международных и всероссийских научных форумах, на которых автор неоднократно выступал с научными докладами по теме диссертации.

У оппонента имеются к диссертационной работе Д.Д. Бызова следующие замечания:

1. В работе отсутствует сравнительный анализ предложенного автором метода разделения разноглубинных аномалий с другими существующими методами разделения аномалий.
2. В главе 5 автором приведены данные обработки данных гравиметрической съемки (М 1:200000), по результатам которой получены две различающиеся друг от друга трехмерные плотностные модели, подобранные с использованием истокообразной аппроксимации локальной составляющей наблюдаемого поля и с использованием разделения локальной составляющей наблюдаемого поля по глубине. Автором не указано, какая из этих моделей, по его мнению, является более достоверной, не приведены также результаты сопоставления результатов с имеющимися геологическими данными по району исследований.

Указанные замечания не умаляют полученных автором научных результатов и не влияют на оценку диссертационной работы в целом.

Выводы

Диссертационная работа Дениса Дмитриевича Бызова посвящена решению актуальной научной задачи – разработке методов трехмерной

интерпретации гравиметрических данных с использованием сеточных параллельных алгоритмов решения прямых и обратных задач. Результаты диссертационного исследования Бызова Д.Д. имеют существенное значение для развития теории и практики интерпретации данных гравиметрических наблюдений при изучении земной коры.

Диссертация написана автором самостоятельно, является завершённым научным исследованием, обладающим внутренним единством, содержит новые научные результаты, выдвигаемые на защиту. Основные результаты получены либо при непосредственном участии автора, либо им лично. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 25.00.10 - «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых» по физико-математическим наукам. Отмеченные оппонентом замечания не умаляют достоинств диссертационного исследования.

Диссертация соответствует критериям, установленным п. 9 Положения о присуждении учёных степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) для учёной степени кандидата наук, а её автор Денис Дмитриевич Бызов достоин присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 - «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

Официальный оппонент

главный научный сотрудник лаборатории № 502 Комплексной геодинамической интерпретации наземных и спутниковых данных Института физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН,
доктор физико-математических наук, профессор



Ибрагим Ахмедович Керимов

123242, Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр. 1
17 марта 2021 года

Подпись И.А. Керимова заверяю:



