

## **ОТЗЫВ**

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

Изучение глубинного строения верхних слоёв литосферы возможно только на основе привлечения комплекса наблюдательных данных геофизики и использования эффективных алгоритмов решения прямых и обратных задач. При этом интерпретация геофизических полей должна основываться на содержательной априорной информации и разумной параметризации модели изучаемой среды.

Диссертационная работа Бызова Д.Д. посвящена разработке современных методов интерпретации гравитационного поля с использованием эффективных алгоритмов распараллеливания в процедуре численного решения трёхмерных задач на сетках большой и сверхбольшой размерности. Разработанная автором оригинальная методика решения линейной обратной задачи гравиметрии и задачи аналитического продолжения гармонических функций, нацеленная на разделение источников поля по их глубинности, является наиболее объективным подходом к изучению глубинного строения литосферы. Возможности разработанной методики продемонстрированы автором на многочисленных примерах комплексной трёхмерной интерпретации гравиметрических данных по территории Тимано-Печорской плиты и северной части Уралид.

**Разработка эффективных методов интерпретации гравитационных данных с использованием сеточных параллельных алгоритмов решения прямых и обратных задач гравиметрии является актуальным**

## **и перспективным направлением научных исследований.**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Во введении диссертации приведён достаточно подробный анализ предшествующих публикаций по направлению исследований, показана актуальность проблемы, сформулированы цели и задачи работы, ее научная новизна, отражена значимость результатов диссертационной работы.

В первой главе автор рассматривает эффективный по процессорным ресурсам, памяти и быстродействию вычислительный алгоритм расчёта гравитационного поля от модели с кусочно-постоянным распределением плотности на равномерной сетке. Автором обоснованы принципы построения алгоритма, продемонстрировано его преимущество и проведено сравнительное тестирование программных реализаций алгоритма на CPU и GPU.

Во второй главе рассматривается о выборе нормальной плотностной модели среды, используемой при создании региональных моделей земной коры и верхней мантии. Автором обосновывается выбор такой плотности относимости для территории исследования и предлагается обоснованная схема вычисления избыточной плотности для элементов модели изучаемой среды. На конкретных тестовых и практических примерах продемонстрированы возможности применения данного подхода при решении региональных задач плотностного моделирования по гравиметрическим данным.

В третьей главе диссертационной работы рассматривается метод трёхмерной интерпретации гравитационных аномалий для сеточной модели среды на основе классического решения линейной обратной задачи гравиметрии. В такой постановке автором на синтетических примерах продемонстрировано проявление «не единственности» линейной обратной задачи гравиметрии, что потребовало обосновать принципы выбора разумной параметризации начальной модели среды и использования априорной геолого-геофизической информации (данных по плотности комплексов пород, сей-

смических материалов и т.д.) для получения геологически содержательных результатов плотностного моделирования.

В четвертой главе раскрываются содержание методов разделения аномалий гравитационного поля по глубине залегания его источников, для чего автором привлекается аппарат аналитического продолжения гармонических функций. В таком подходе разделение полей по глубине и пространственная локализации источников аномальных масс в горизонтальном слое основана на предложенной автором технологии последовательных пересчётов на несколько высот и глубин, что надёжно выделяет источники аномального поля в изучаемом пространстве.

В пятой главе работы предложенный алгоритм разделения полей и решения линейной обратной задачи гравиметрии был использован при построении детальной плотностной модели приповерхностного слоя земной коры на ограниченном участке работ. Полученные результаты убедительно свидетельствуют об эффективности предлагаемой технологии решения задач плотностного моделирования.

*Представленный автореферат диссертации соответствует диссертационной работе.*

**Целью работы** стало создание методов количественной интерпретации гравитационного поля на основе вычислительно эффективных параллельных алгоритмов решения трёхмерных задач на сетках большой размерности: прямой задачи гравиразведки, линейной обратной задачи гравиразведки и задачи аналитического продолжения гармонических функций.

Автор поставил и решил ряд **научных задач**, обеспечивших достижения поставленной цели, среди которых можно отметить следующие.

1. Разработка эффективного численного алгоритма решения прямой задачи гравиразведки для модели с кусочно-постоянным распределени-

ем плотности на равномерной сетке, реализующего многопоточный алгоритм для графического процессора.

2. Определение способа выбора плотности относимости среды для расчёта гравитационного поля от трёхмерной модели среды с переменной плотностью.

3. Разработка алгоритма решения линейной обратной задачи гравивиреведки, основанного на использовании принципа локальных поправок.

4. Разработка вычислительно-эффективного алгоритма расчёта интеграла Пуассона для представления гармонических функций в пространстве по их граничным значениям на плоскости, применяемого для разделения гравитационного поля по глубине его источников.

5. Применение разработанной методики к построению крупномасштабных плотностных моделей приповерхностной части земной коры.

Цель работы и решённые научные задачи соответствуют современным тенденциям развития вычислительной геофизики, ориентированным на создание сложных комплексных моделей строения земной коры на основе использования современных высокоэффективных технологий обработки данных.

В работе получены следующие **научные результаты**, вынесенные автором на защиту:

1. Предложенный в работе быстрый алгоритм для точного вычисления гравитационного поля от модели с кусочно-постоянным распределением плотности на равномерной сетке имеет меньшую вычислительную сложность, чем расчёт по «явной» формуле, а созданное на его основе программное обеспечение использует на порядок меньше ресурсов процессора и памяти. Алгоритм можно использовать как важную составную часть методов автоматизированной интерпретации

2. Метод решения линейной обратной задачи гравиметрии, основанный на идее локализации, в совокупности с быстрым алгоритмом решения прямой задачи позволяет находить устойчивые решения в выбранном классе моделей. Параллельная программная реализация метода для GPU позволяет решать обратную задачу для моделей с количеством элементов разбиения порядка  $10^6$  практически в реальном времени.

3. Численный алгоритм пересчёта гармонических функций в нижнее полупространство, основанный на решении интегрального уравнения Фредгольма 1-ого рода модифицированным методом локальных поправок с регуляризацией, позволяет устойчиво разделять гравитационное поле по глубине на составляющие, относимые к горизонтальным слоям модели на соответствующих глубинах.

**Новизна** полученных результатов характеризуется следующими позициями:

- Предложенной оригинальной методикой представления плотностной модели строения земной коры в формате кусочно-постоянной сеточной функции с большим пространственным разрешением, что даёт возможность эффективно использовать схемы параллельных вычислений в процедуре количественной интерпретации гравитационного поля.

- Разработанной автором методики и оригинальных алгоритмов решения прямой и линейной обратной задач гравиразведки для сеточных моделей среды.

- Диссертационная работа раскрывает возможности и особенности применения методики разделения разноглубинных аномалий на основе аналитического продолжения поля.

Высокая эффективность и наглядность проведённых сравнительных вычислительных модельных экспериментов с использованием различных

методов решения задач гравиметрии подтверждает **достоверность и обоснованность** результатов выполненных исследований.

Основные научные результаты достаточно **полно опубликованы** в рецензируемых научных изданиях. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 11 статьях в реферируемых журналах, входящих в перечень Scopus, Web of Science и/или ядро РИНЦ. Автор неоднократно принимала участие с докладами на международных научных конференциях по проблемам вычислительной гравиметрии.

Существенных недостатков работа не содержит, тем не менее, у оппонента имеется **замечание**, сформулированное ниже.

Декларируемый автором тезис о «предложенном методе выбора плотности относимости для расчёта гравитационного поля от трёхмерной модели среды с переменной плотностью» носит достаточно частный характер, поскольку реализация этого метода зависит от суммарной мощности модельного слоя, априорно определяемой по данным сейсмических/сейсмологических построений, а также допущения об изостатической компенсации на выбранном глубинном уровне. Как первое, так и второе допущение не могут быть проверены только в рамках гравиметрических построений и требуют привлечения данных о современных вертикальных движениях и, желательно, надёжных геотермических построений по оценке реологии изучаемой области мантии и нижней коры. Кроме того, предложенный подход может быть применён только для моделирования относительно однородных плотностных литосферных блоков, поскольку на конвергентных границах плит отдельные слои коры, а равно и мантии, существенно меняют свои физические свойства, морфологию и геологическое наполнение.

Таким образом, конкретные результаты Д.Д.Бызова по трёхмерной интерпретации гравиметрических данных, для достаточно однородной и стабильной территории Тимано-Печорской плиты и северной части Уралид, основанные на сформулированном принципе плотности относимости являются вполне обоснованными и достоверным, но общность предлагаемого подхода - не очевидна.

### **Выводы**

Диссертация Дениса Дмитриевича Бызова содержит решение актуальной научной задачи – разработку современных методов интерпретации гравитационного поля с использованием эффективных алгоритмов распараллеливания в процедуре численного решения трёхмерных задач на сетках большой и сверхбольшой размерности. Результаты диссертационного исследования имеют существенное значение для практической интерпретации данных гравиметрических наблюдений и построения трёхмерных плотностных моделей литосферы Земли.

Диссертация написана самостоятельно, является завершённым научным исследованием, обладающим внутренним единством, содержит новые научные результаты, выдвигаемые на защиту, и свидетельствует о значимом личном вкладе автора в науку. 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 Д.Д. Бызов достоин присуждения учёной

степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10  
- «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук

заведующий кафедрой геофизики геологического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный университет»

**ГЛАЗНЕВ Виктор Николаевич**

  
11.03.2024

Контактные данные:

тел.: +7(473) 2-208-385, e-mail: glaznev@geol.vsu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 25.00.10 - «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

Адрес места работы:

394018, РФ, г. Воронеж, Университетская площадь, д. 1,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет», геологический факультет, кафедра геофизики.

Подпись сотрудника геологического факультета  
Воронежского государственного университета  
В.Н. Глазнева удостоверяю

