

ОТЗЫВ официального оппонента  
на диссертацию на соискание ученой степени  
кандидата технических наук Чепиго Льва Станиславовича  
на тему «Методы анализа гравитационного поля с учетом сферичности»  
по специальности 1.6.9 - Геофизика (технические науки).

Актуальность работы определяется необходимостью разработки математического аппарата для решения прямых и обратных задач гравиразведки для сред с переменной плотностью. Второй задачей работы является учет сферичности при плотностном моделировании. Актуальность этой тематики связана с появлением моделей гравитационного поля Земли и Луны, которые содержат информацию о высокочастотных аномалиях гравитационного поля, поэтому, их можно использовать не только для решения планетарных задач гравиметрии, но и для геологического изучения плотностных неоднородностей литосферы и верхней мантии.

Новизна и цель представленной работы заключается в разработке алгоритма автоматизированного решения обратной задачи гравиразведки для сеточных плотностных моделей, учитывающий снижение чувствительности функционала невязки с глубиной, разработке подхода к решению обратной задачи гравиразведки на сфере для простых моделей, являющийся аналогом метода характерных точек на плоскости. Разработанные подходы были использованы для построения сеточных плотностных моделей Луны, отражающих положение и избыточную плотность источников аномалий гравитационного поля Луны.

В диссертационной работе впервые:

- создан алгоритм автоматизированного решения обратной задачи гравиразведки для сеточных плотностных моделей, учитывающий снижение чувствительности функционала невязки с глубиной;

- разработан подход к решению обратной задачи гравirazведки на сфере для простых моделей, являющийся аналогом метода характерных точек на плоскости.

Разработанные подходы использованы для построения сеточных плотностных моделей Луны, отражающих положение и избыточную плотность источников аномалий гравитационного поля Луны.

Значимость работы определяется тем, что разработанный подход к автоматизированному решению обратной задачи гравirazведки для сеточных моделей может применяться при подборе плотностных моделей с произвольным распределением плотности, как с учетом, так и без учета априорных данных. Сферический вариант данного подхода позволяет в автоматическом режиме осуществлять подбор плотностных моделей частей или целых космических тел. Использование данного подхода позволяет значительно повышать эффективность плотностного моделирования при решении геолого-геофизических задач. С помощью разработанных алгоритмов и подходов построена одна из первых подробных сеточных моделей распределения избыточных плотностей внутри Луны.

Целью работы является разработка новых подходов к решению прямых и обратных задач гравirazведки на плоскости и сфере. Для достижения цели аспирант решал задачи:

- 1) изучение существующих подходов к решению прямых и обратных задач гравirazведки на плоскости и сфере;
- 2) разработка нового подхода к решению обратной задачи гравirazведки по полю, заданному на сферической поверхности, для тел простой формы;
- 3) разработка нового подхода к автоматизации решения обратной задачи гравirazведки на плоскости и сфере;
- 4) апробация разработанных подходов на модельных и реальных геофизических данных.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 109 наименований, содержит 88 страниц, 20 таблиц и 30 рисунков.

Во **Введении** сформулированы актуальность, степень разработанности, объект исследования, цели и задачи, новизна, теоретическая и практическая значимость, защищаемые положения, достоверность и апробация, личный вклад.

Глава 1 разделена на четыре раздела, в каждом из которых рассматриваются теоретические основы решения прямой и обратной задачи гравиметрии с учетом и без учета сферичности.

В первых двух разделах кратко изложены методы решения прямой задачи гравиразведки без учета сферичности, в третьем разделе рассматриваются подходы к решению обратной задачи гравиразведки без учета сферичности, в частности методы локализации особых точек. В разделе 1.4 рассматриваются подходы к решению обратной задачи гравиразведки с учетом сферичности, а также приводятся тестовые расчеты, в которых оценивается глубина точечного источника с учетом и без учета сферичности.

Глава 2 также разделена на четыре раздела, в каждом из которых рассматриваются теоретические основы и подходы к решению прямой и обратной задач гравиразведки для тел правильной (простой) геометрической формы на сферической поверхности, в том числе аналог метода характерных точек (МХТ). В разделе 2.1 рассматривается модель тонкого радиального стержня, являющегося аналогом тонкого вертикального стержня, который широко применяется в гравиразведке для аппроксимации, например, магматических тел. В разделе 2.2 рассматриваются подходы к решению прямой задачи гравиразведки для тессероида (сферической призмы), который может использоваться в качестве элемента разбиения непрерывных сеточных моделей. Тессероид с размерами  $0.7^\circ \times 0.5^\circ \times 2$  км в дальнейшем используется для построения сеточной модели Луны. В разделах 2.3 и 2.4 рассматривается решение обратной задачи методом характерных точек с учетом сферичности

для точечного источника и тонкого радиального стержня. В разделе 2.5 приводится заключение по Главе 2 и формулируются первое и второе защищаемые положения.

Глава 3 разделена на 5 разделов, в которых описываются теоретические основы решения обратной задачи гравиразведки для сеточных моделей и рассматривается новый подход к решению данной задачи.

В разделе 3.1 рассматриваются теоретические основы решения прямой и обратной задачи гравиразведки для сеточных моделей и их асимптотика при вычислениях в частотной области с помощью быстрого преобразования Фурье и с применением метода градиентного (наискорейшего) спуска при решении обратной задачи. В разделе 3.2 представлено теоретическое обоснование снижения чувствительности решения обратной задачи гравиразведки при увеличении глубины ячеек сеточной модели и предложено решение данной проблемы путем использования переменной скорости (шага) градиентного спуска  $\alpha$ , зависящей от глубины как степенная функция с показателем степени  $n$ . В разделах 3.3, 3.4 и 3.5 приводятся тестовые расчеты с использованием алгоритма, приведенного в разделе 3.2, для двумерного случая, трехмерного без учета сферичности и трехмерного с учетом сферичности соответственно.

По результатам, приведенным в главе 3, сформулировано третье защищаемое положение.

Глава 4 содержит 3 раздела и посвящена применению разработанных в рамках научной работы подходов на реальных данных – аномалиях гравитационного поля Луны в редукции Буге.

В разделе 4.1 содержится обзор модели гравитационного поля Луны, полученной в ходе миссии GRAIL, в разделе 4.2 приводятся оценки глубин источников шести масконов, расположенных в пределах кратеров Гримальди (1), Бейс-Баллот (4) и Ридберг (6), а также лунных морей Кризисов (2), Гумбольдта (3) и Восточное (5). Оценки проводились как с учетом, так и без учета сферичности. Показано, что оценки глубин без учета сферичности

превышают аналогичные оценки с учетом сферичности. В разделе 4.3 приводятся результаты автоматизированного подбора сеточной плотностной модели Луны целиком. Были подобраны две сеточные модели, отличающиеся глубинностью и детальностью по глубине.

В заключении подводятся итоги диссертационной работы.

На защиту выносятся следующие положения диссертации:

1. Алгоритм решения прямой задачи гравиразведки для сферической призмы на основе ее аппроксимации набором тонких радиальных стержней.
2. Методика решения обратной задачи гравиразведки для тел простой формы по полю, заданному на сферической поверхности.
3. Методика подбора сеточной плотностной модели, в основе которой лежит использование скорости градиентного спуска, зависящей от глубины как степенная функция.

Все результаты теоретической части диссертации и математического моделирования получены лично автором, докладывались на семинарах и международных конференциях.

Основные выводы диссертационной работы были получены в ходе анализа фундаментальных положений теории потенциальных полей, широко представленных в ряде литературных источников и являющихся общепринятыми. Защищаемые положения не противоречат материалам ранее опубликованных работ по данной тематике, а также полностью согласуются с результатами математического моделирования, что доказывает их достоверность.

По тематике диссертации автор имеет 4 статьи, опубликованные в российских журналах, входящих в список Russian Science Citation Index (RSCI) Web of Science. Также автор имеет 6 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Все вышеперечисленные работы соответствуют теме диссертации и полностью отражают ее содержание. Вклад диссертанта в совместных публикациях обозначен.

Автореферат отражает содержание диссертации.

К работе есть ряд замечаний.

1. В тексте достаточно много орфографических ошибок.
2. Многие рисунки плохо воспринимаются из-за мелкого шрифта (рис.2,4,15,29,30), неудачная цветовая гамма (рис.16,29).
3. В разделе 1.4 решается модельная задача восстановления поля точечного источника с учетом сферичности, в таблице 2 приводится разность решений (глубины источника) с учетом сферичности и для плоской поверхности. В тексте раздела 1.4 для понимания результата не хватает ссылок на формулы для вычисления поля (прямая задача) для этих вариантов. В случае сферичности – это формула (10), для плоской задачи, по видимому, формулы (1,2). Но в явном виде выражения для  $dV/dz$  (если ось  $z$  перпендикулярна плоскости) нет. Хотелось бы видеть разницу формулы (10) и  $dV/dz$  в плоском случае в явном виде (может в виде рисунка) для понимания разницы двух подходов, а, главное, необходимости учета сферичности.
4. Интуитивно можно предположить, что разница в двух подходах должна проявляться на больших масштабах, т.е. когда появляется различие между сферической поверхностью и касательной к ней плоскостью. Из рис. 4 можно оценить этот масштаб на уровне нескольких десятков или даже сотен км. В терминах сферических гармоник это гравитационные аномалии 200-100 степени. На стр.26 указывается, что использование сферических гармоник возможно для решения обратной задачи и приводятся ссылки. Возникает вопрос: насколько лучше, точнее, оптимальнее подход диссертанта? Этот вопрос связан и с содержанием главы 4, в которой проводится построение плотностных моделей для Луны. С учетом больших размеров площади, на которой проводятся измерения гравитационного потенциала, возникает

вопрос: с какой детальностью надо проводить эти измерения для корректного восстановления плотностной структуры?

5. В главах 1-3 развит математический аппарат для решения прямой и обратной задач гравиметрии. Это всего лишь инструмент, который должен в умелых руках использоваться для решения фундаментальных и прикладных задач. В связи с такой структурой диссертации диссертант защищается по специальности геофизика (технические науки). К сожалению, приложение этого инструмента для решения реальной научной задачи – построения плотностных моделей Луны может рассматриваться только в информативном плане, так как результаты главы 4 не выносятся на защиту.

6. Технический подход диссертанта явно виден в разделе 3.1, где приводятся временные затраты на решение обратной задачи в зависимости от числа слоев, числа ячеек в слое. С моей точки зрения надо просто использовать более мощный компьютер для решения задачи, а сосредоточиться нужно на вопросе с какой точностью будет восстанавливаться плотностная структура в зависимости от числа слоев, числа ячеек в слое.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.6.9 – Геофизика (технические науки), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена, согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Чепиго Лев Станиславович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.6.9 – Геофизика (технические науки).

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, профессор  
ЗАВЕДУЮЩИЙ кафедрой небесной механики, астрометрии и гравиметрии  
физического факультета Московского государственного университета имени  
М.В.Ломоносова

ЗАВЕДУЮЩИЙ лабораторией гравиметрии Государственного  
астрономического института имени П. К. Штернберга Московского  
государственного университета имени М.В.Ломоносова

Жаров Владимир Евгеньевич

16 ноября 2023 г.

Контактные данные:

тел.: 7(495)9393764, e-mail: zharov@sai.msu

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:

01.03.01 – астрометрия и небесная механика

Адрес места работы:

119234, г. Москва, Университетский пр., д. 13,

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,  
Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга

Тел.: +7(495)9392046; e-mail: director@sai.msu.ru

Подпись сотрудника МГУ В. Е. Жарова удостоверяю:

начальник отдела канцелярии



Л. Н. Новикова

16 ноября 2023 г.