

ОТЗЫВ

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

Диссертационная работа Чепиго Л.С. посвящена методам анализа гравитационного поля на сферической поверхности как на основе адаптации уже существующих методов решения задач гравиразведки, применяемых на плоскости, так и на основе разработки новых подходов. Данное направление исследований представляет большой интерес в современной геофизике при решении прямых и обратных задач гравиразведки в региональных и планетарных масштабах, в связи с чем и возникает необходимость совершенствования методов, развитых для случая плоскости, и создания новых для применения на сферической поверхности. Востребованность таких задач в последние годы выросла в связи с появлением высокоточных глобальных моделей высокого пространственного разрешения для гравитационных полей Земли и Луны, построенных по измерениям ряда спутниковых миссий (GRACE, GOCE, CHAMP, GRAIL и пр.). Все эти обстоятельства подтверждают **актуальность** выбранной темы диссертационного исследования.

В работе автором рассмотрены прямая и обратная задачи гравиразведки на плоскости и сфере для сред с переменной плотностью, поставлены и решены задачи разработки подходов к оценке параметров источников простой геометрической формы по полю, заданному на сферической поверхности, а также впервые разработаны методы численного решения обратной задачи для сеточных моделей, позволяющие ускорять процесс подбора плотностной модели и включать в процедуру подбора не только приповерхностные, но и глубокие ячейки. Перечисленные результаты составляют **новизну** диссертационной работы.

Большое внимание при построении алгоритмов решения рассматриваемых задач уделено автором их численной эффективности, что имеет большое значение для практических приложений в силу, как правило, больших размерностей решаемых задач. Большинство полученных теоретических результатов сопровождаются числовыми примерами. Все разработанные автором алгоритмы проверены практической обработкой и внедрены в оригинальные программные пакеты.

Опишем коротко **структуру** диссертации и содержание основных **результатов**. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Во введении формулируются цели работы, обсуждается ее актуальность и научная новизна, приводятся защищаемые положения.

В первой главе сделан обзор методов, применяемых к решению прямой и обратной задач гравиразведки для случаев приближения поверхности небесного тела плоскостью и сферой. В первом случае получено выражение для комплексной напряженности гравитационного поля для многоугольника с параболическим законом изменения плотности. В обоих случаях (плоскость, сфера) рассмотрены подходы к решению прямой задачи в частотной области на основе быстрого преобразования Фурье. Рассчитаны оценки численной эффективности подходов.

Во второй главе получены аналитические выражения для притяжения тел простой формы при задании поля на сферической поверхности (тонкий радиальный стержень, сферическая призма). При рассмотрении прямой задачи для сферической призмы предложен подход к ее решению, основанный на аппроксимации набором тонких радиальных стержней. Для оценки времени и точности решения прямой задачи гравиразведки для сферической призмы на тестовом примере автором проведено сравнение трех подходов – разбиения на тонкие стержни, численного интегрирования и аппроксимации многогранником. Для каждого подхода прямая задача решалась для нескольких вариантов разбиения призмы по широте и долготе. Автором

численно показано, что а) наиболее быстрая сходимость характерна для решения прямой задачи путем аппроксимации многогранником; б) наиболее затратным по времени является численное интегрирование. Далее по результатам тестовых расчетов сделан вывод, что для приповерхностных ячеек более высокое быстродействие имеет подход на основе аппроксимации многогранником, в то время для более глубоких ячеек следует использовать подход на основе разбиения на тонкие стержни.

Третья глава посвящена численным методам решения обратной задачи гравиразведки для сеточных моделей. Подходы к решению данной некорректной задачи основаны на ее регуляризации (чаще всего по Тихонову) с последующим решением системы нормальных уравнений тем или иным итерационным методом, например, методом наискорейшего градиентного спуска или его аналогами. В разделе 3.1 формулируется проблема, возникающая при плотностном моделировании, когда в результате численного решения указанной задачи подбирается плотностная модель с контрастным приповерхностным слоем, а глубокие ячейки практически не участвуют в процессе подбора модели и, как результат, модель оказывается плохо интерпретируемой с геологической точки зрения. В связи с этим в диссертации разработан численный метод решения данной задачи на основе модификации шага градиентного спуска путем введения в него степенной зависимости от глубины. В диссертации данный метод развит как для случая анализа на плоскости, так и на сферической поверхности.

В четвертой главе приводится описание применения разработанных в диссертации методик решения прямой и обратной задач гравиразведки на сферической поверхности к гравитационному полю Луны (использована модель поля, построенная по измерениям спутниковой миссии GRAIL). Автором построена сеточная плотностная модель Луны, отражающая распределение плотностных неоднородностей, которая позволяет сделать выводы о параметрах источников аномалий гравитационного поля.

Построенная плотностная модель Луны имеет разрешением 0.7° по долготе, 0.5° по широте и 11 км по глубине до центра Луны.

Полученные в диссертации практические и теоретические результаты весьма полезны и могут использоваться в дальнейшем при решении научных и прикладных задач, связанных с изучением глубинного строения как локальных участков земной коры, так и всей Земли и других небесных тел.

Содержание автореферата полностью **соответствует** содержанию диссертации.

Степень обоснованности положений, выносимых на защиту, а также научных выводов и рекомендаций, сделанных в диссертации

На защиту автором выносятся следующие положения:

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

Все теоретические результаты диссертации получены аналитическими методами и имеют четкое математическое и геолого-геофизическое обоснование. Часть результатов диссертации получена при помощи методов численного интегрирования и методов оптимизации и сопровождается подробным обсуждением и сравнением с другими применяемыми в геофизике методами. Все научные выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, достоверны и имеют практическое или теоретическое обоснование. Все три положения, выносимых на защиту, полностью **обоснованы**.

Диссертационная работа носит прикладной и в меньшей степени теоретический характер, а основные результаты **опубликованы** в четырех

научных статьях в журналах из списка RSCI Web of Science. Кроме того, автор имеет 6 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ, разработанных по теме диссертационного исследования.

Диссертация производит хорошее впечатление, однако приведу ряд **замечаний**, которые носят редакционный характер:

- 1) Подписи на некоторых рисунках неразборчивы (например, рис.15, 21).
- 2) В ряде случаев неудачное использование терминологии («простые модели», «алгоритм автоматизированного решения», и т.п.); также, на мой взгляд, не вполне удачен оборот «с учетом сферичности» в тех случаях, когда не уточняется, к чему относится сферичность.
- 3) На стр. 5 отмечается, что методы решения обратных задач на сфере исследователями в настоящее время «практически не рассматриваются». Это утверждение спорно, тем более что сам автор в главе 1 делает подробный обзор этих методов.
- 4) При формулировке вывода о необходимости адаптации методов решения обратных задач на плоскости к случаю сферы (стр. 5) не поясняется, почему выбирается именно сфера. В случае Земли, например, эллипсоид был бы более подходящей поверхностью.
- 5) Во Введении утверждается, что алгоритмы решения обратной задачи гравиразведки на плоскости «зачастую не дают желаемого результата». Здесь не хватает пояснения, что конкретно имеется в виду - некорректность обратной задачи, несовершенство алгоритмов или другие причины, а также какой результат считать желаемым.
- 6) В главе 1 (стр. 20) отмечается, что при больших значениях N_λ решение прямой задачи в частотной области позволяет решать прямую задачу быстрее. Для наглядности не хватает числового примера.
- 7) В обзоре методов решения обратной задачи гравиразведки (глава 1) рассмотрены только методы, базирующиеся на детерминированных математических постановках. Однако нет упоминаний о методах на основе стохастического подхода (например, методы на основе

Байесовского оценивания - см. книгу F. Sanso, D. Sampietro, Analysis of the Gravity Field: Direct and Inverse Problems, Springer, 2022).

- 8) В аналитическом выражении (33) решения задачи минимизации (раздел 3.1) пропущен знак транспонирования матрицы A при ее умножении на вектор Vz и отсутствует единичная матрица I , на которую должна умножаться константа (вместо cI стоит c).
- 9) При постановках задач (31)-(34) не расшифрованы индексы N, M и n у переменных. Индекс n в переменной σ_n имеет двойной смысл - номер элемента в векторе и номер шага при итерационном оценивании этого вектора. Для наглядности не хватает рисунка, иллюстрирующего, как вводится сеточная модель, и пояснения, как выбираются числа N, M .
- 10) При изложении регуляризованных методов решения обратной задачи (раздел 3.1) стоило пояснить, что исходная задача относится к классу некорректно поставленных.
- 11) При модификации шага градиентного спуска с помощью степенной функции от глубины, неясно, почему номер итерации и степень обозначены одной буквой n . Ведь во втором случае n является вещественным числом в работе, а не только целым.
- 12) Разделы 3.2-3.5, в которых приводятся результаты применения модифицированного метода градиентного спуска, стоило бы расширить, дополнив их информацией о количестве итераций в градиентном спуске и о числе обусловленности матриц коэффициентов при неизвестных. Эти данные представляют интерес, поскольку позволили бы оценить скорость сходимости выбранного метода в рассмотренных задачах.

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:

кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории управления и навигации механико-математического факультета Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

ВЯЗЬМИН Вадим Сергеевич

29 ноября 2023 г.

Контактные данные:

тел.: +7 (495) 939 59-33, e-mail: vadim.vyazmin@math.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.02.01 – «Теоретическая механика»

Адрес места работы:

119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д.1, стр. 52

Тел.: +7(495)939 12 63; e-mail: office@mech.math.msu.su

Подпись сотрудника Вязьмина В.С. заверяю

Начальник отдела кадров



Соколова Т.А.