

## ОТЗЫВ официального оппонента

на диссертацию на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук Лыгина Ивана Владимировича

на тему: «Физико-геологические подходы к анализу гравиметрических данных» по специальности 1.6.9. Геофизика (геолого-минералогические науки)

Актуальность работы определяется использованием гравиметрических средств измерений, методов обработки данных и их анализа, интерпретации данных с учётом объёма и состава привлекаемой априорной информации с целью повышения их эффективности при геологических исследованиях.

Наилучшей точностью и детальностью обладают методы наземной гравиметрии, что определяет важность их применения в ряде геологических исследований, например, в задачах детального мониторинга геологической среды. Для обеспечения высоких измерительных точностей наземной гравиметрии требуется специальная методика подготовки автоматизированных гравиметров и, в первую очередь, это касается определения их цены деления.

Спутниковые альтиметрия и гравиметрия отличаются глобальным покрытием, что определяет их востребованность для решения региональных геологических задач, но при обработке данных необходимо учитывать специфику измерений. Долговременные спутниковые миссии GRACE и GRACE Follow On (GRACE-FO) предоставляют данные о пространственных и временных вариациях гравитационного поля Земли, что ставит вопрос об их использовании для решения геодинамических задач.

В этой связи научная новизна работы определяется двумя основными задачами гравиметрии: прямой задачей – расчётом поля притяжения от источника с заданными характеристиками и обратной задачей – расчётом поля по заданным измерениям, которые решаются в диссертации оригинальными методами. В частности, в работе разработаны новые математические алгоритмы, позволяющие рассчитывать поле притяжения многоугольника с параболическим законом распределения плотности (двумерная задача), поле притяжения многогранника и многоугольной пластины с линейным законом распределения плотности (трёхмерная задача), а также методы решения обратной задачи гравиразведки с

переменной скоростью градиентного спуска, определения параметров точечного источника по его гравитационному полю, заданному на сфере.

К этому надо добавить необходимость комбинирования решения при обработке локальных и глобальных измерений. Для этого разработана методика обработки и интерпретации данных потенциальных полей в зависимости от объёма и состава привлекаемой априорной информации, что представляет значительный интерес при геологических исследованиях на поиски минерального сырья во всех регионах Российской Федерации.

На основе решения указанных выше задач на защиту выносятся следующие положения диссертации:

1. Алгоритмы и методы решения прямых и обратных задач гравиразведки, которые позволяют создавать модели геологических сред со сложным кусочно-непрерывным и градиентным распределением плотности.

2. Подходы в области геоплотностного интерактивного моделирования, применяемые в зависимости от объёма и состава привлекаемой априорной геолого-геофизической информации и позволяющие учитывать условия формирования элементов геологического разреза.

3. Методика долговременных гравиметрических наблюдений, которая позволяет выделять сезонные изменения уровня грунтовых вод (и влажности грунтов).

4. Низкочастотная компонента вариаций гравитационного поля, полученная по данным миссии Грейс, связана с геодинамическими процессами в тектонически активных регионах.

Диссертанту принадлежат: постановка целей и задач исследований; постановка, выполнение и руководство полевыми экспериментами, проведение обработки, анализа и геологической интерпретации получаемых результатов.

Диссертация изложена на 224 страницах и состоит из введения, трёх глав и заключения. Работа содержит 67 рисунков и 8 таблиц. Библиографический список включает 261 источник.

Во Введении сформулированы актуальность, степень разработанности темы исследования, цели и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, положения,

выносимые на защиту, личный вклад, степень достоверности, апробация результатов.

Глава 1 «Технологии сбора и обработки гравиметрических данных» включает вводную часть и 5 разделов.

Во вводной части говорится о необходимости корректировки методик подготовки автоматизированных гравиметров и, в первую очередь, при определении их цены деления при проведении детальных геологических исследований. Спутниковые миссии GRACE и GRACE-FO предоставляют данные о вариациях гравитационного поля Земли (ГПЗ) в глобальном и региональном масштабах, и в работе рассматриваются точностные оценки глобальных моделей ГПЗ в сопоставлении с данными морских и наземных гравиметрических съемок.

В первом разделе предлагается в условиях Москвы с ее плотной застройкой и интенсивным дорожным трафиком организовывать полигоны для эталонирования гравиметров в высотных зданиях, в частности на разных этажах главного здания (ГЗ) МГУ имени М.В. Ломоносова. Практическое использование эталонного полигона ведется с 2010 года. Из статистики наблюдений в ГЗ МГУ в 15 независимых сериях, выполненных в разные сезоны, цена деления гравиметров определяется с относительной среднеквадратической погрешностью  $\pm 2-7 \cdot 10^{-5}$ .

Во втором разделе рассмотрены спутниковые технологии с точки зрения анализа полученных данных и их сопоставлении с данными морских и наземных гравиметрических съёмок, а также приводится обзор задач миссии GRACE. Подробно анализируется применение альтиметрического метода для измерения уровня моря и его использования для восстановления гравитационного поля. Сделаны конкретные выводы о применимости этого метода в береговой зоне и глубоководных котловинах. Странно, что эти результаты не выносятся на защиту, хотя в выводах к главе 1 они отражены.

В третьем разделе излагается методика обработки гравиметрических наблюдений спутниковой миссии GRACE с целью изучения временных вариаций ГПЗ на основе ежемесячных моделей ГПЗ. Подробно изложена методика обработки данных спутниковой миссии GRACE, направленная на выделение низкочастотной компоненты вариаций гравитационного поля, которая может содержать эффекты, связанные с изменением плотности в недрах тектонически активных регионов.

В четвёртом разделе предложена методика периодических гравиметрических наблюдений для выявления сезонных вариаций силы тяжести. Технология измерений позволяет обойтись без абсолютных гравиметрических измерений и без использования удалённого опорного гравиметрического пункта, на котором отсутствуют сезонные вариации поля силы тяжести.

В разделе 1.5 сформулированы основные выводы, относящиеся к Главе 1.

Глава 2 «Новые подходы в области интерактивного моделирования глубинных плотностных и магнитных моделей» включает 3 раздела.

В этой главе изложены разработанные с участием диссертанта алгоритмы решения прямых и обратных задач гравиметрии в двумерном и трёхмерном случаях, алгоритмы решения прямых и обратных задач гравиметрии на сфере.

В разделе 2.1 изучается поле, создаваемое многоугольником с параболическим законом распределения плотности (двумерная задача). Актуальность создания алгоритма расчета поля от моделей со сложным законом изменения плотности вызвана практической потребностью решения прямых задач для разрезов значительной мощности (более 10 – 15 км) в условиях их латеральной и вертикальной плотностной неоднородности. Для перехода к трёхмерным моделям определяется поле многогранника и многоугольной пластины с линейным законом распределения плотности. Результаты вычислений использованы далее при решении прямых и обратных задач для сред с градиентным распределением плотности.

В связи с получением новых глобальных моделей ГПЗ, заданных на сфере, актуальным для решения планетарных задач гравиметрии и для геологического изучения плотностных неоднородностей литосферы и верхней мантии становится актуальной разработка методов решения обратной задачи гравиразведки на сфере. Показано, что при определении положения центра масс источника без учета сферичности, глубина оказывается завышенной. Погрешность возрастает с увеличением глубины залегания центра масс и с уменьшением радиуса сферы, на которой задано аномальное поле.

В конце раздела 2.1 приводятся выводы – список результатов решения прямых и обратных задач гравиметрии в двумерном, трёхмерном и сферическом случаях.

В разделе 2.2 проводится систематизация методик геоплотностного интерактивного моделирования в зависимости от объема и состава привлекаемой априорной геолого-геофизической информации. В разделе рассматриваются возможные пути учёта априорной информации в зависимости от ее объема и состава, степени изученности региона и сложности моделей физико-геологической среды. Конечная цель процесса моделирования состоит в получении двумерных (разрезы) или трёхмерных (объёмных) моделей, гравитационный эффект которых с заданной точностью совпадает с полученными в результате инструментальных измерений аномалий поля силы тяжести. В роли подбираемого параметра выступает плотность.

Диссертант предлагает новый, опирающийся на интерактивный подбор, инструментарий для моделирования, который позволяет интерпретатору регулировать процесс моделирования (включая алгоритм решения обратной задачи) с учётом всех имеющихся априорных данных вне зависимости от их формата и объёма.

Представляемая методика моделирования реализует возможность формализации и учёта практически неограниченных по объёму и составу априорных геолого-геофизических данных, предусматривая вариативность в подходах к моделированию в зависимости от содержащейся в них информации. В тексте диссертации подробно описаны шесть основных этапов алгоритма моделирования и четыре возможных подхода.

В разделе приводится описание результатов применения каждого из четырех подходов и демонстрация возможности построения совершенно разных плотностных моделей в зависимости от объёма и типа использованной информации из комплекта данных и базовой геолого-геофизической концепции.

Пример составления плотностной модели по данным наземной высокоточной гравиметрической съемки представлен на основе результатов измерений на Александровском плато вблизи учебно-научной геофизической базы имени В.К. Хмелевского геологического факультета МГУ в дер. Александровка Юхновского района Калужской области.

В конце раздела 2.2 приводятся выводы.

В разделе 2.3 рассматриваются практические примеры, в которых реализованы подходы плотностного моделирования, описанные в разделе 2.2.

Каждый пример помимо описания метода решения задачи содержит геологические результаты, которые были получены после комплексной интерпретации.

В разделе 2.3.1 выполнено построение структурно-тектонической модели на примере комплексирования региональных сейсмических и гравиметрических исследований в северной части острова Сахалин.

Результаты применения подхода позволили сформировать непротиворечивую структурно-тектоническую и бассейновую модель северной части острова Сахалин, локализовать положение перспективных объектов и уточнить оценку ресурсного потенциала. Задача восстановления морфологии границы здесь была главной и трёхмерная плотностная модель не строилась.

В разделе 2.3.2 построена объемная плотностная модель Енисей-Хатангского региона. С учетом результатов комплексной геолого-геофизической интерпретации автор диссертации доказывает рифтогенную природу прогиба, а также указывает на некоторые геодинамические особенности его развития. Ключевым элементом построения плотностной модели является уточнение морфологии ряда границ в осадочном чехле путем установления линейной корреляционной связи между редуцированным гравитационным полем и сейсмическими данными.

В разделе 2.3.3 рассматривается методика реконструкции глубинных границ (на примере реконструкции границы Мохо в Баренцевоморском регионе) по аномалиям потенциальных полей с опорой на сейсморазведочные данные с использованием методов машинного обучения. Подробно описывается процедура машинного обучения, в частности этапы подготовки исходных данных, поиска многомерных регрессионных связей на эталонных участках между набором признаков геолого-геофизической информации и искомой поверхностью, выбора нейронной сети, распространение установленных регрессионных связей на исследуемую площадь с вычислением морфологии прогнозной границы, уточнение морфологии прогнозной поверхности по ее гравитационному (или магнитному) эффекту, оценки точности полученного решения (верификации).

Отличительной особенностью методики является верификация полученных прогнозных границ по гравитационному полю. При реализации методики сначала методами машинного обучения получается модель морфологии прогнозной границы, затем от неё рассчитывается гравитационный (или магнитный) эффект.

Для полученного эффекта решается обратная задача по подбору формы контактной границы.

Затем приводятся геологические выводы на основе реконструированной морфологии поверхности Мохоровичича, схема строения земной коры Баренцевоморского региона по результатам комплексной интерпретации.

В разделе 2.3.3 изложен метод построения согласованных физико-геологических моделей при изучении неоднородностей верхней части разреза Восточной Сибири.

В данном случае реализуется разработанный автором диссертации алгоритм моделирования, но применительно не к одному набору данных (гравиметрическому), а сразу к четырем (сейсмическому, электроразведочному, магнитному и гравиметрическому).

Отработка метода выполнялась как на синтетических примерах, так и на реальных. Использование синтетических моделей, для которых геологическая ситуация полностью известна, позволяет корректировать параметры процедур анализа и последовательность их применения, а также оценивать погрешности решения обратных задач.

После этого решается задача комплексирования геофизических данных, состоящая из сбора и анализа данных, создания геолого-геофизической базы данных, поиска проявлений зон с нарушенной корреляцией в данных несейсмических методов, выбора первичной сейсмической глубинно-скоростной модели и расчете статических поправок, итерационной корректировки томографической глубинно-скоростной модели по данным несейсмических методов, построении сейсмического разреза и количественной оценки качества обработки материалов сейсморазведки.

После интерпретационного анализа выполняется оценка точности структурных построений при использовании различных глубинно-скоростных моделей.

Показано, что применение предложенного метода для комплексирования геофизических методов, обеспечивает повышение точности структурных построений.

В разделе 2.4 сформулированы основные выводы, относящиеся к Главе 2.

Глава 3 «Пространственно-временные изменения гравитационного поля и их связь с геологическими особенностями строения Земли» включает три раздела.

В разделе 3.1 приводятся результаты анализа зарегистрированных вариаций поля силы тяжести на территории ГЗ МГУ имени М.В. Ломоносова. В период с ноября 2010 года по апрель 2011 года с периодичностью примерно один месяц (всего 5 серий измерений) выполнены измерения приращений поля силы тяжести на 16 наземных пунктах, образующих профиль. Утверждается, что наиболее вероятной причиной изменения гравитационного поля является изменение водонасыщения грунта вследствие осадков.

В разделах 3.2 и 3.3 анализируются низкочастотные вариации гравитационного поля, выделенные по методике, описанной в разделе 1.3 главы 1, в двух крупных регионах Земли – северо-восточном секторе Тихоокеанского региона (Аляскинско-Калифорнийский участок субдукции) и Африкано-Аравийско-Каспийском регионе (зоне взаимодействия Африканской, Аравийской и Евразийской литосферных плит). В указанных крупных регионах по совокупности геологических факторов особенности длительных вариаций поля силы тяжести объяснены перераспределением масс (в виде изменения плотности) в тектоносфере.

В разделе 3.4 приводятся выводы по главе 3.

В заключении формулируются результаты работы.

Все результаты теоретической части диссертации и математического моделирования были получены диссертантом в ходе анализа фундаментальных положений теории потенциальных полей, широко представленных в ряде литературных источников и являющихся общепринятыми, докладывались на семинарах и международных конференциях. Достоверность разработанных алгоритмов подтверждена выполнением тестовых расчетов на модельных данных.

Результаты экспериментальной части работы были получены с использованием современной сертифицированной гравиметрической аппаратуры, основаны на современных открытых геолого-геофизических данных. Геологические выводы независимо сопоставлены с результатами других геолого-геофизических исследований.



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 опубликованы 32 работы, включая 23 работы в рецензируемых периодических изданиях, входящих в наукометрические базы цитирования Web of Science, Scopus и РИНЦ.

Все вышперечисленные 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. На рис. 1.4 приводятся отклонения измеренных приращений силы тяжести от средних значений для 28 и 30 этажей ГЗ МГУ. Видно, что распределения имеют отклонения от нормального. В тексте диссертации отсутствует объяснение причины такого отклонения.

2. Очень много ошибок на странице 24: «Материалы спутниковой альтиметрии, имеющие свободный доступ в сети Интернет, содержат...» «Такие базы ... представляются с дискретностью 1 минуты дуги большого круга...» «Оценки погрешностей, выполненные для Geosat и ERS-1, продолжают использоваться и действовать, ...».

3. На рис. 1.6 желательно было бы указать береговую линию, так как относительно нее делаются определенные выводы.

4. Подпись к рис. 1.8 совершенно не понятна: что за точки «сдвинутые на пять лет назад; сдвинутые на 6 лет вперед»? Как получена кривая по данным GRACE для полигона МГУ в дер. Александровка? В тексте диссертации описание эксперимента дается в разделе 1.4, но все равно не ясно, как получена эта кривая.

5. В разделе 1.3 изложен алгоритм поиска временных вариаций ГПЗ по ежемесячным моделям, которые получены по данным миссии GRACE. Не понятна необходимость первого этапа: достаточно вместо «осредненного за весь рассматриваемый период поля» использовать одну из статических моделей ГПЗ, полученную, например, только по данным GRACE. В принципе, при построении таких моделей используется регуляризация решения для секториальных гармоник («страйпов»), к которым измерения GRACE не чувствительны.

6. На рис. 1.10, 1.11 приводятся временные вариации поля в районе Аравийско-Каспийского региона. Хотелось бы иметь интерпретацию этих результатов. При данной структуре текста диссертации объяснение дается через 100 страниц. Поэтому, для лучшего понимания разумно было бы поменять структуру текста диссертации: сначала поместить главу 2, в которой идет речь о теоретических разработках – алгоритмах решения прямых и обратных задачах гравиметрии, затем главу 1, в которой речь идет о технологиях сбора гравиметрических данных и, наконец, главу 3, в которой обсуждаются полученные результаты и дается интерпретация.

7. На рис. 1.12 приводятся «временные разрезы вариаций гравитационного поля» вдоль профиля 1 Нубийская плита – Индийский океан. Опять же интерпретации результатов приводится в разделе 3.3 со страницы 176. Не ясно, зачем приводятся данные о землетрясениях, произошедших в тысячах километрах от этого профиля.

8. В преамбуле к главе 3 содержится много ошибок: «Современный этап тектонических движений на Земле можно охарактеризовать как этап эволюционного развития планеты, стремящейся к минимуму затрат кинетической энергии, то есть к некоторому стационарному состоянию (???) Оно определяется двумя факторами – уровнем достигнутой симметрии моментов вращения планеты и уровнем ротационных возмущений от приливного воздействия системы Луна – Солнце (???), проявления которых можно зарегистрировать современными средствами измерения», а также спорных утверждений: «при выборе модели космического источника является требование градиентности его гравитационного поля», «Подобным полем могут обладать космические тела широкого спектра по массе, размерам, скорости движения, а также в последнее время регистрируемые гравитационные волны (???)».

9. В разделе 3.2 приводится алгоритм разбиения северо-восточного сектора Тихоокеанского региона на отдельные области, затем в каждой области вычисляются средние значения за каждый месяц за весь рассматриваемый период, на основе чего оцениваются амплитуды вариаций аномалий силы тяжести. До этого уже были вычислены «отклонения аномальных значений поля силы тяжести от среднего значения за весь период наблюдений». Кроме этого прилагательное «аномальных» здесь лишнее.

Насколько справедлива эта процедура? Есть современные методы (типа вейвлет-анализа), которые позволяют проследить изменения некоторого параметра (например, амплитуды сигнала) во времени и пространстве.

10. Вывод «Временная связь землетрясений и характера вариаций хорошо проявляется при сопоставлении крупнейших землетрясений (с магнитудой более 8 баллов) и осреднённых вариаций гравитационного поля (Рисунок 3.6)» не убедителен (см. также рис.3.9, 3.17). Почему подобный вывод не делается для Калифорнийского региона? Хотелось бы получить объяснение с геофизической точки зрения, какие физические причины лежат в основе этого заключения (раздел 3.3.3)? Как землетрясение около Суматры, Чили и т.д. может повлиять на гравитационное поле вблизи Аляски? С учетом того, что данный вывод не выносится на защиту, а он имеет право на существование, его можно обсуждать в дискуссионном порядке.

Что касается изменений гравитационного поля вблизи очагов крупных землетрясений, то такое явление действительно зарегистрировано по измерениям в миссиях GRACE и GOCE.

11. Желательно было бы список литературы структурировать по фамилиям авторов, потом для каждого автора по годам.

12. На стр. 186 дается ссылка на рис. 1.24, который отсутствует.

13. В тексте достаточно много орфографических ошибок: несогласованные падежи «На Рисунок...», «опубликована 32 работа» и др., встречается пропуск букв в словах, используются жаргонные выражения типа «грид геоида», «Вариации поля силы тяжести для январского месяца», «пункты наблюдения, расположенные на дневной поверхности», «дневной рельеф», используются сокращения и «мГал» и «мГала». Наверно было бы более правильно вместо термина «подход к построению» использовать термин «метод построения».

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 (геолого-минералогические 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 Лыгин Иван Владимирович заслуживает присуждения ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 1.6.9. Геофизика (геолого-минералогические науки).

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, профессор.

Заведующий кафедрой небесной механики, астрометрии и гравиметрии отделения астрономии 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**

28 ноября 2024 г.

Контактные данные:

тел.: 7(495)9393764, e-mail: [zharov@sai.msu](mailto: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](mailto:director@sai.msu.ru)

Подпись сотрудника МГУ В. Е. Жарова удостоверяю:

начальник отдела канцелярии

Л. Н. Новикова

28 ноября 2024 г.