

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

ЛЫГИН ИВАН ВЛАДИМИРОВИЧ

**ФИЗИКО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К
АНАЛИЗУ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

1.6.9. Геофизика (геолого-минералогические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Москва – 2024 год

Диссертация подготовлена на кафедре геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Научный консультант: *Булычев Андрей Александрович*, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: *Жаров Владимир Евгеньевич*, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», физический факультет, отделение астрономии, кафедра небесной механики, астрометрии и гравиметрии, заведующий, лаборатория гравиметрии Государственного астрономического института имени П. К. Штернберга, заведующий;

Долгаль Александр Сергеевич, доктор физико-математических наук, доцент Горный институт Уральского отделения РАН – филиал ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения РАН, лаборатория геопотенциальных полей, главный научный сотрудник;

Соколов Сергей Юрьевич, доктор геолого-минералогических наук, ФГБУН Геологический институт РАН, лаборатория геоморфологии и тектоники океанов, заведующий, главный научный сотрудник

Защита диссертации состоится 6 декабря 2024 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета МГУ.016.6 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, геологический факультет, ауд. 415.

E-mail: dsmsu0403@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3102>

Автореферат разослан «__» октября 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук

К.М. Кузнецов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Разведочная гравиметрия (гравиразведка) имеет долгую и богатую историю своего развития. Метод хорошо разработан и теоретически, и практически. Однако, как и в любом научном направлении, с развитием аппаратурно-программных средств сбора и анализа данных появляются новые ключевые элементы, требующие совершенствования и модернизации.

Гравиразведка аналогично другим методам разведочной геофизики обеспечивает геологическую модель независимой инструментально измеренной информацией. Для того, чтобы данная информация оказалась объективной и геологически востребованной, необходимо качественно выполнять следующие ключевые этапы:

1. подготовку аппаратуры, выполнение полевых работ и обработка получаемых материалов;

2. интерпретацию, основанную на математических методах анализа, позволяющих учитывать особенности измерений (в том числе поверхность наблюдения на плоскости, сфере и другие) и особенности предполагаемого распределения плотности в разрезе (постоянная, изменяющаяся по линейному, параболическому и другим законам);

3. неформальная геологическая интерпретация, учитывающая объем и состав привлекаемой априорной информации.

Работа посвящена развитию методик и подходов на каждом из перечисленных этапов.

Современные наземные относительные гравиметры обеспечивают микрогальную измерительную точность и по-прежнему требуют периодических проверок с определением цены деления измерительного устройства и точности единичного измерения, которые можно определить только с использованием гравиметрических полигонов. В условиях быстро растущих городских агломераций сохранение традиционных наземных пунктов таких полигонов крайне затруднительно. Одним из подходов решения данной задачи является организация гравиметрических полигонов в высотных зданиях. Практическая проверка возможности гравиметрических калибровочных измерений на этажах высотных зданий является актуальной задачей.

В последние десятилетия стали широко доступны материалы зарубежных спутниковых альтиметрических и долговременных гравиметрических миссий. Необходимо знать истинные параметры (точность и разрешающая способность) спутниковых гравиметрических данных для их привлечения к решению разного рода геологических задач. Материалы долговременной спутниковой гравиметрической миссии Грейс (GRACE) используются для решения мониторинговых задач в океанографии, гидрологии, гляциологии, при изучении последствий крупных землетрясений. Разработка методики привлечения данных миссии Грейс для выяснения особенностей протекания процессов, связанных с перераспределением плотности в геодинамически активных районах, является самостоятельной и актуальной задачей, решение которой может послужить основой для внедрения нового метода геотектонического анализа.

Современным вызовом гравиразведки является задача интерактивно моделировать геологические разрезы разной степени сложности, в том числе, в которых плотность задается не постоянными значениями в блоках, а учитывается более сложное распределение в виде градиентных изменений. В связи с этим актуальной задачей является разработка математического аппарата по вычислению прямых гравитационных эффектов от многоугольников и многогранников с параболическим и линейным законами распределения плотности. В случае анализа источников гравитационных аномалий в планетарных масштабах на начальных стадиях исследований необходимо уметь определять параметры точечного источника по полю, заданному на сфере.

К настоящему времени разработано большое количество подходов интерпретации гравиметрических данных. Однако зачастую привлекаемый математический аппарат решения обратных задач в полной мере не позволяет вовлечь в анализ априорную геолого-геофизическую информацию. Поэтому существует необходимость систематизации типов априорной информации и разработки подходов их включения в начальные модели.

Таким образом, актуальность темы работы обусловлена развитием современных аппаратно-вычислительных средств, для которых необходимо совершенствовать старые и создавать новые

алгоритмы, методы и подходы измерения, обработки, анализа, интерпретации данных.

Степень разработанности темы исследования

В настоящее время существует несколько эталонных полигонов по определению цен деления гравиметров, главным образом, оставшихся от крупных организаций, занимавшихся производством гравиметрической аппаратуры или проведением полевых работ (в окрестности городов Нальчик, Геленджик, Мурманск, Санкт-Петербург, Иркутск, Казань, Екатеринбург), разной степени сохранности. В Московском регионе подобного эталонного полигона не сохранилось.

Оценки погрешностей, выполненные для ряда спутниковых миссий [Hwang C., et al., 1998; Jung W. Y., and Vogt P.R., 1992; Laxon S. and McAdoo D., 1994; Sandwekk et al., 2003; Булычев, 2000; Железняк, Конешов, 2000, 2015; Конешов 2021, 2023], продолжают использоваться и действовать, но в то же время требуют актуализации для определения границ применимости альтиметрических данных во внутренних морях, прибрежных областях и на участках акваторий с резко пересеченным рельефом дна.

С появлением высокоточных гравиметрических спутниковых миссий и развитием методов обработки получаемых данных стало возможным широкомасштабное изучение изменений гравитационного поля во времени. Изначально вариации поля силы тяжести, зарегистрированные миссией Грейс, были связаны с приповерхностными гидродинамическими процессами, крупными глубинными землетрясениями [Tapley et al., 2004]. Первые исследования динамики субдукционных зон с помощью данных миссии Грейс были представлены в работе В.О. Михайлова с соавторами [Mikhailov et al., 2004]. Однако для выделения сигнала, который может быть связан с глубинными плотностными вариациями, требуются специальные подходы, которые не были разработаны.

Крупный вклад в исследование вопросов решения прямых и обратных задач гравиразведки в разное время внесли П.И. Балк, Ю.И. Блох, Е.Г. Булах, А.А. Булычев, С.Г. Бычков, В.Н. Глазнев, Г.Я. Голиздра, В.И. Гольдшмидт, А.Ю. Давыденко, А.С. Долгаль, В.Е. Жаров, М.С., Жданов, В.И. Исаев, А.И. Кобрунов, К.М. Кузнецов, В.В.

Ломтадзе, Л.И. Лучицкий, А.Г. Манукян, П.С. Мартышко, В.Р. Мелихов, А.А. Никитин, А.В. Петров, Ю.В. Пятаков, Старостенко В.И., Страхов В.Н., К.Ф. Тяпкин, А.В. Цирульский и другие ученые. Часто основной акцент делался на получение явных аналитических выражений элементов гравитационного поля от различных моделей с постоянной плотностью, с помощью которых можно было бы аппроксимировать реальные геологические тела. Для случая переменной плотности решение прямой задачи представляет значительную трудность. Были получены аналитические выражения для гравитационного поля от частных моделей, но задача получить достаточно простые выражения для определения гравитационного эффекта многоугольника с заданным параболическим законом изменения плотности, и многогранника, ограниченного плоскими гранями, с заданным линейным законом изменения плотности, является актуальной. В связи с совершенствованием и получением новых глобальных моделей гравитационного поля Земли, Луны и других планет требуется развитие методов интерпретации, учитывающих сферичность поверхности измерения. На первых этапах развития подходов к интерпретации гравиметрических измерений на больших территориях, учитывающих сферичность, востребованным является вопрос разработки методов, анализирующих характерные точки полей.

Комплексный анализ геолого-геофизических данных при решении геологических задач давно стал нормой на всех этапах исследований недр. В настоящее время большое внимание уделяется совместной интерпретации геолого-геофизических данных с целью создания интегральных моделей среды – геоплотностных, геомагнитных, геоэлектрических и других, – в которых аккумулируется вся существующая на момент проведения исследований априорная информация, получаемая разными методами [Хмелевской, Костицын, 2010]. Необходимо разработать способы учета априорной информации в зависимости от ее объема и состава, степени изученности региона и сложности физико-геологической среды.

Цель и задачи исследования

Целью работы является повышение информативности материалов гравиразведки и статуса этого метода в общем комплексе геолого-геофизических исследований.

Основные задачи исследования.

1) Разработка подхода к эталонированию наземных гравиметров с использованием гравиметрических полигонов, часть пунктов которых расположена в высотных зданиях.

2) Анализ информативности данных спутниковой альтиметрии.

3) Разработка методики обработки гравиметрических наблюдений спутниковой миссии Грейс с целью разделения вариаций гравитационного поля на сезонные и продолжительные (более одного года).

4) Разработка методики выполнения наземных периодических гравиметрических наблюдений для выделения сезонных вариаций поля силы тяжести, связанных с гидродинамическими изменениями в верхней части разреза, без привлечения абсолютных гравиметрических измерений и без использования удаленного опорного гравиметрического пункта.

5) Разработка алгоритмов решения прямых и обратных задач гравиметрии в двумерной и трехмерной постановках, а именно:

- алгоритм расчета поля притяжения многоугольника с параболическим законом распределения плотности (двумерная задача);

- алгоритм расчета поля притяжения многогранника и многоугольной пластины с линейным законом распределения плотности (трехмерная задача);

- метод решения обратной задачи гравиразведки с переменной скоростью градиентного спуска;

- алгоритм определения параметров точечного источника по гравитационному полю, заданному на сфере.

6) Систематизация методик геоплотностного (и геомагнитного) интерактивного моделирования в зависимости от объема и состава привлекаемой априорной геолого-геофизической информации на основе формирования особых условий неформального подбора.

7) Построение согласованных физико-геологических моделей на основе интерактивного плотностного моделирования:

- модель кровли палеогеновых отложений Северной части острова Сахалин;

- трехмерная геоплотностная модель Енисей-Хатангского региона.

8) Разработка методики построения структурной поверхности с использованием методов машинного обучения с верификацией полученных прогнозных границ по гравитационному полю (на примере реконструкции границы Мохоровичича в Баренцевоморском регионе).

9) Разработка подходов к построению согласованных физико-геологических моделей (на примере изучения неоднородностей верхней части разреза Восточной Сибири).

10) Анализ пространственно-временных изменений гравитационного поля и их связь с геологическими особенностями:

- на территории Главного Здания МГУ имени М.В. Ломоносова и учебно-научной геофизической базы им. В.К. Хмелевского геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (дер. Александровка, Калужская область) по наземным периодическим гравиметрическим наблюдениям;

- в северо-восточном секторе Тихоокеанского региона по гравиметрическим материалам спутниковой миссии Грейс;

- в Африкано-Аравийско-Каспийском регионе по гравиметрическим материалам спутниковой миссии Грейс.

Научная новизна

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 (трехмерная задача); решать обратную задачу гравиразведки с переменной скоростью градиентного спуска; определять параметры точечного источника по его гравитационному полю, заданному на сфере. Перечисленные алгоритмы несут самостоятельную научную значимость.

Систематизированы подходы в области учета априорной геолого-геофизической информации в зависимости от её объема и состава, привлекаемой при плотностном и магнитном моделировании. В практику решения обратной задачи геофизики введено понятие весовой корректирующей функции, определяющей области приоритетного подбора или области фиксированных (известных) значений. Весовая корректирующая функция выступает в роли пространственного стабилизатора решения обратной задачи и

формируется на основе геологических представлений, объективной геофизической информации и может служить для проверки гипотез о геологическом строении среды на предмет их соответствия наблюдаемому гравитационному (или магнитному) полю.

Выявлены вариации гравитационного поля, обусловленные изменением гидродинамических характеристик вблизи Главного здания МГУ и на территории учебно-научной геофизической базы (дер. Александровка, Калужская область). Предложена методика долговременных гравиметрических наблюдений, не требующая привлечения абсолютных гравиметрических измерений и использования удаленного опорного гравиметрического пункта.

С использованием разработанной методики обработки данных спутниковой миссии Грейс выделены длительные вариации гравитационного поля в северо-восточном секторе Тихоокеанского региона и в Африкано-Аравийско-Каспийском регионе, природа которых связана с глубинными геодинамическими процессами. Разработанная методика является основой нового метода тектонического анализа регионов с активными геодинамическими режимами.

Теоретическая и практическая значимость

Предложено эталонировать наземные автоматизированные гравиметры с использованием гравиметрических полигонов, часть пунктов которых может быть расположена в высотных зданиях.

Указаны границы применимости спутниковых гравиметрических данных для акваторий, обрамленных горными сооружениями, и прибрежных акваторий. Рассчитанные оценки качества альтиметрических данных для разномасштабных построений могут быть применены при геолого-геофизических исследованиях на других акваториях внутренних и окраинных морей.

Методика обработки и интерпретации данных потенциальных полей в зависимости от объема и состава привлекаемой априорной информации представляет значительный интерес при геологических исследованиях с целью поиска минерального сырья во всех регионах Российской Федерации. Разработанный математический аппарат и инструменты учета априорной геологической информации стали основой программного обеспечения “GravMagInv” [Чепиго, 2022],

предназначенного для создания профильных, объемных и сферических плотностных и магнитных моделей.

Новые геологические модели или элементы моделей крупных регионов Российской Федерации, имеющих высокий углеводородный потенциал (модель кровли палеогеновых отложений Северной части острова Сахалин, трехмерная геоплотностная модель Енисей-Хатангского региона, трехмерная геоплотностная модель Баренцевоморского региона и др.), дополняют современные концепции о геологическом строении перечисленных территорий и могут использоваться для их совершенствования.

Результаты исследований включены в лекционные материалы таких учебных курсов, как «Основы гравиразведки и магниторазведки», «Гравиразведка», «Методы обработки и интерпретации гравиметрических и магнитометрических данных», «Прямые и обратные задачи гравиразведки и магниторазведки», «Сейсмогравитационное моделирование», «Морская гравиразведка и магниторазведка» и других, читаемых на геологическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова.

Методология и методы исследования

Важную часть фактических материалов составляют материалы, полученные автором лично или под его руководством в ходе инициативных исследований, при совершенствовании образовательного процесса и выполнении научных и производственных договоров на Геологическом факультет МГУ имени М.В. Ломоносова. Значительная часть фактического материала – это данные из открытых Интернет-источников, в том числе содержащие материалы спутниковых миссий по регистрации гравитационного поля Земли. При геологическом анализе широко привлекались открытые материалы из Российских геологических фондов.

При реализации исследований применялись специальные и общенаучные методы. Разработка подходов к эталонированию гравиметров и наземного гравиметрического мониторинга потребовала постановки экспериментальных наблюдений. Математические алгоритмы решения прямых и обратных задач разработаны в ходе общенаучных теоретических рассуждений, подкрепленных результатами моделирования. Систематизация методик

геоплотностного интерактивного моделирования выполнена путем обобщения и классификации. Практические примеры построения согласованных физико-геологических моделей – это анализ результатов моделирования, исходные данные для которого получены из разных источников в ходе обобщения и систематизации. Выявление пространственно-временных изменений гравитационного поля в их связи с геологическими особенностями базируется на методах общегеологических рассуждений (в т.ч. синтеза, аналогии, индукции и дедукции и других) и эмпирических методах (моделирование, наблюдение, описание и других).

Положения, выносимые на защиту

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 объема 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.

Личный вклад

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

Диссертантом лично или при его непосредственном участии написана существенная часть текста публикаций из списка по теме диссертации. Конфликт интересов с соавторами отсутствует.

Степень достоверности и апробация результатов

Результаты работы получены с использованием современной сертифицированной гравиметрической аппаратуры, основаны на современных открытых геолого-геофизических данных. Достоверность разработанных алгоритмов подтверждена выполнением тестовых расчетов на модельных данных. Геологические выводы независимо сопоставлены с результатами других геолого-геофизических исследований.

Результаты докладывались на научных и практических конференциях и совещаниях разного уровня, в том числе таких, как:

- Международная конференция и выставка по разработке новых технических средств и технологий для работ на шельфе и в Мировом океане: «Теория и практика морских геолого-геофизических исследований» (Геленджик, 1999, 2001);

- XXIII General Assembly of IUGG (Япония, Саппоро, 2003);

- X, XII, XIV, XV Международные конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Москва, 2003, 2005, 2007, 2008);

- 4е, 5е, 7е, 8е, 9е, 10е Геофизические чтения имени В.В. Федынского (Москва, 2002, 2003, 2005, 2006, 2007, 2008);

- 7я, 19я Международные научно-практические конференции по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа «Геомодель» (Геленджик, 2005, 2017);

- XLIX Тектоническое совещание, посвященное 100-летию академика Ю.М. Пушаровского (Москва, 2017);

- 4я, 5я, 10я, 16я Международные научно-практические конференции и выставки «Инженерная и рудная геофизика» (Геленджик, 2008, 2009, 2014, Пермь, 2020);

- 31я, 32я, 41я, 45я, 46я, 47я, 48я, 49я Сессии международного семинара им. Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей» (Москва, Екатеринбург, Казань, Пермь, Воронеж, 2004, 2005, 2014, 2018, 2019, 2020, 2022, 2023);

- Симпозиум Международной ассоциации по геодезии (IAG) «Наземная, морская и аэрогравиметрия: измерения на неподвижных и подвижных основаниях» (Санкт-Петербург, 2010, 2016, 2019);
- European Geosciences Union General Assembly (Австрия, Вена, 2014, 2019, 2020, 2021);
- Международная научно–практическая конференция и выставка «Инженерная, угольная и рудная геофизика – 2015. Современное состояние и перспективы развития» (Сочи, 2015);
- Ломоносовские чтения (Москва, 2011, 2015, 2016, 2017, 2019, 2020, 2021, 2023);
- Международная геолого-геофизическая конференция и выставка: «Современные технологии изучения и освоения недр Евразии. ГеоЕвразия» (Москва, 2018, 2019, 2020, 2021, 2023);
- Гравиметрический и магнитометрический семинар памяти профессора В.Р. Мелихова (Москва, 2017, 2018, 2020, 2023);
- IV Школа-семинар "Гординские чтения" (Москва, 2017);
- VII, IX, XII Международные научно-практические конференции «Морские исследования и образование» MARESEDU (Москва, 2018, 2020, 2023);
- Научно-практическая конференция и выставка «Морские технологии» (Геленджик, 2019, 2021);
- Научная конференция, посвященная 75-летию юбилею кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (Москва, 2019);
- 4я, 5я, 8я Международные научно-практические конференции «Инновации в геологии, геофизике и географии» (Севастополь, 2019, 2020, 2023);
- II всероссийская школа молодых учёных "Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике" (Московская область, 2022);
- Международная научно-практическая конференция «ГеоСочи. Актуальные проблемы геологии и геофизики» (Сочи, 2022, 2023);
- Всероссийская научно-практическая конференция «Школе геофизиков МГУ – 80 лет. Переключка поколений» (Москва, 2024).

Публикации

По теме диссертации опубликована 32 работа, включая 24 работы в изданиях, рекомендованных МГУ имени М.В. Ломоносова.

Структура и объем диссертации

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

Благодарности

Автор благодарен и чтит память своего Учителя – профессора В.Р. Мелихова.

Автор выражает благодарность заведующему кафедрой профессору А.А. Булычеву за наставничество и постоянную поддержку.

Автор выражает глубокую признательность сотрудникам лаборатории гравирозведка с.н.с. Т.Б Соколовой, доценту К.М. Кузнецову, ассистенту А.А. Фадееву за совместное многолетнее развитие направления «Гравирозведка» в стенах Московского Университета; своим аспирантам Н.С. Ткаченко, Д.А. Арутюняну, Л.С. Чепиго, защитившим кандидатские диссертации. Автор с благодарностью помнит всех студентов, вложивших свои силы в реализацию гравиметрических экспериментов.

Автор выражает особую благодарность своим жене, детям, родителям, поддержку которых он постоянно испытывает.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Глава 1 включает вводную часть и 5 разделов.

За последние годы достигнут значительный прогресс в качестве гравиметрических измерений: значительно улучшены точностные характеристики гравиметров и детальность измерений (Рисунок 1). Наилучшей точностью и детальностью обладают методы наземной

гравиметрии, что определяет их эффективность в ряде детальных геологических исследований, в том числе в задачах детального мониторинга геологической среды. Для обеспечения высоких измерительных точностей наземной гравиметрии требуется корректировка методик подготовки автоматизированных гравиметров и, в первую очередь, при определении их цены деления. Спутниковые альтиметрия и гравиметрия отличаются глобальным покрытием, что определяет их востребованность в региональных геологических задачах, но необходимо определить границы их применимости. Долговременные спутниковые миссии GRACE и GRACE-FO (далее миссия Грейс) предоставляют данные о вариациях гравитационного поля Земли, что позволяет рассмотреть вопрос об их использовании для решения геодинимических задач, который требует разработки.

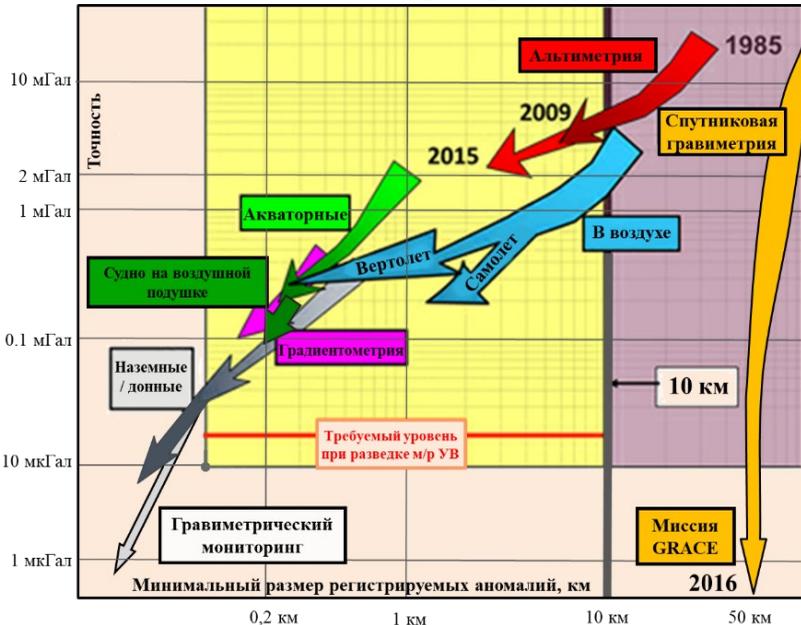


Рисунок 1. Точность и детальность гравиметрических измерений по [Fairhead, 2015] с дополнениями.

1.1. Эталонирование наземных автоматизированных гравиметров с использованием высотных зданий. В условиях Москвы с ее плотной застройкой и интенсивным дорожным трафиком

целесообразно организовывать эталонные полигоны в высотных зданиях [Фадеев и др., 2012]. Методические особенности выяснены при измерениях на разных этажах Главного здания МГУ имени М.В. Ломоносова. Измерения выполнялись на этажах 21, 24, 28 и 30 относительно опорного гравиметрического пункта, расположенного на цокольном этаже (ОП Ц08). С 2009 года [Лыгин и др., 2010] накоплена представительная статистика приращений силы тяжести между выбранными пунктами МГУ (Таблица 1).

Таблица 1. Статистика измерений приращений силы тяжести относительно ОП Ц-08 гравиметрами Scintrex CG5 на этажах Главного здания МГУ имени М.В. Ломоносова с 2009 по 2011 годы

Параметр	21 этаж	24 этаж	28 этаж	30 этаж
Кол-во гравиметров	4	3	9	8
Кол-во определений Δg	15	26	106	94
Приращение поля силы тяжести Δg относительно ОП Ц08				
Δg среднее, мГал	-29.190	-31.960	-41.400	-44.500
Δg_{\max}, мГал	-29.199	-31.970	-41.411	-44.507
Δg_{\min}, мГал	-29.170	-31.953	-41.389	-44.493
$\Delta g_{\max} - \Delta g_{\min}$, мкГал	29	17	22	14
Ср.-кв. погрешность $\epsilon_{\Delta g}$, мкГал	± 8	± 5	± 2	± 3

Средние значения приращений силы тяжести на верхних этажах ГЗ МГУ относительно ОП Ц08 определены со среднеквадратической погрешностью от ± 2 до ± 8 мкГал. Расхождения между минимальным и максимальным определением силы тяжести на каждом этаже не превышают 29 мкГал. На пунктах полигона не выявлено долговременных изменений силы тяжести. Длительность звена, включающего 3–4 пункта, составляет около 1 часа. При выполнении 6–8 звеньев цена деления гравиметров определяется с относительной погрешностью $\pm 2-7 \cdot 10^{-5}$. С использованием пунктов полигона были проэталонированы гравиметры Геологического факультета, ГАИШ имени П.К. Штернберга МГУ и ряда других производственных и научных организаций, показавшие высокую сходимость результатов при последующих производственных работах.

1.2. Спутниковые гравиметрические технологии рассмотрены с точки зрения анализа точностных оценок данных спутниковых гравиметрических миссий в сопоставлении с данными морских и наземных гравиметрических съемок, и обзора задач миссии Грейс.

На примере набора данных Torex-gravity показано, что альтиметрические данные удовлетворяют требованиям морских гравиметрических съемок масштаба 1: 1 000 000 на открытых частях акваторий (вне континентального склона) [Мелихов и др., 2004]. Спутниковые данные необходимо приводить к уровню морских съемок. После учета систематического расхождения альтиметрические базы восстанавливают аномальное гравитационное поле относительно надводных среднemasштабных съемок 1970-х годов с точностью не лучше ± 3 мГал. В береговой зоне и на континентальном склоне спутниковые наблюдения неприменимы. Расхождение по локальной компоненте гравитационного поля, оцененное на материалах детальных съемок составляет ± 20 мГал и снижается по мере увеличения периода выделяемых локальных гравитационных аномалий.

За последние десятилетия составлено обширное количество глобальных гравиметрических моделей, полученных на основе спутниковых миссий и часто с калибровкой по данным приповерхностных измерений [ICGEM...]. Об их качестве и возможности использования для геолого-геофизических задач можно судить только из сопоставления с данными более точных приповерхностных измерений. При совместном сопоставлении моделей гравитационного поля для территории Карской астроблемы, расположенной недалеко от устья реки Кара, было показано [Лыгин и др., 2024], что модели, минимально опирающиеся на наземные данные (например, XGM2019e [Zingerle et al., 2020]), обладают наименьшей детальностью. Несмотря на калибровку по наземным данным, такие модели, как Sandwell and Smith [Sandwell et al., 2014], WGM2012 [Bonvalot et al., 2012], SGG-UGM-2 [Liang et al., 2020], содержат высокочастотные помехи на уровне $\pm 3,5-4$ мГал, которые искажают формы и амплитуды изометричных и линейных аномалий. Для рассмотренного случая искажения затрагивают аномалии размером 50 км и менее.

Миссия Грейс позволяет значительно улучшить глобальные модели гравитационного поля Земли и получить информацию об изменении гравитационного поля во времени. Данные Грейс используются в океанографии, в гляциологии, в гидрологических задачах [Ткаченко, Лыгин, 2017]. Благодаря долговременности выполнения миссии Грейс стало возможным решать геологические задачи в области геодинамики. В частности, изучается реакция литосферы на крупные землетрясения [Kaftan et al., 2015; Михайлов и др., 2014]. Направление, рассматривающее связи длительных вариаций гравитационного поля, зарегистрированных миссией Грейс, с перераспределением плотности в тектонософере Земли, слабо разработано. Чтобы его изучить, необходимо, в первую очередь, разработать методику разделения вариаций на сезонные (годовые) и более длительные с выделением низкочастотной компоненты вариаций гравитационного поля, которая может содержать эффекты, связанные с изменением плотности в недрах тектонически активных регионов.

1.3. Методика обработки гравиметрических наблюдений спутниковой миссии Грейс с целью разделения вариаций гравитационного поля на сезонные и длительностью более одного года [Лыгин, Пышнюк, 2021; Лыгин, Ткаченко, Зотов, 2019]. Разработка методики выполнена с использованием материалов Грейс второго уровня, которые отфильтрованы по методике многоканального сингулярного спектрального анализа (метод МССА) [Зотов и др., 2015] или по методике декорреляции и сглаживания DDK [Kusche, 2009]. Фильтрация необходима для подавления страйпов. Исходные материалы – это помесечные оценки гравитационного потенциала в виде наборов сферических гармоник для всей Земли.

Первый этап заключается в преобразовании ежемесячного набора сферических гармоник гравитационного потенциала в ежемесячные наборы значений поля силы тяжести с расчетом ежемесячных отклонений от осредненного за весь рассматриваемый период. Результатом является набор GRID-файлов со значениями ежемесячных изменений поля силы тяжести относительно среднего поля, рассчитанного за весь рассматриваемый период, то есть временных изменений или вариаций поля силы тяжести.

Целью *второго этапа* обработки является составление динамических изображений изменения во времени гравитационного поля. Создание изображений выполняется в следующем порядке:

1) перепроецирование грид-файлов ежемесячных отклонений поля силы тяжести из географической системы координат в проекционную для минимизации искажений;

2) оформление карт вариаций поля силы тяжести с нанесением береговой линии, эпицентров землетрясений и другой необходимой «полезной» информацией;

3) экспорт карт в растровые изображения и составление анимационного изображения вариаций гравитационного поля в виде многослойного gif-изображения.

Третий этап заключается в создании единой базы данных поля вариаций и формировании «пространственно-временного куба гравитационного поля», каждый элемент которого – фиксированная в пространстве и времени точка с известным значением аномального поля силы тяжести.

Четвертый этап направлен на разделение высокочастотных (сезонных) и низкочастотных компонент поля вариаций. Высокочастотные периодические вариации распространены повсеместно и во всем временном интервале наблюдений. В соответствии с исследованиями [Ткаченко, Лыгин, 2019], рекомендуется выбирать фильтр Баттерворта с центральной длиной среза 14 месяцев и крутизной 32 степени. Остающаяся после фильтрации низкочастотная компонента поля характеризует изменения трендовых значений поля, локально распространенных по площади исследования.

Интерес для геологического анализа также представляют поля горизонтальных и вертикальных производных (градиентов) вариаций гравитационного поля, среднегодовые значения низкочастотной компоненты гравитационного поля и другие трансформации. Все они могут быть рассчитаны также на четвертом этапе. По ним создаются карты ежемесячных или с заданной дискретностью компонент поля вариаций, анимированные gif-изображения, пространственно-временные кубы трансформаций.

На *пятом этапе* для более наглядного представления характера изменений строятся временные разрезы вариаций гравитационного

поля, дополняемые геолого-геофизической информацией (эпицентры и гипоцентры землетрясений, разрезы скорости, положения глубинных границ, вулканов и т.п.) (Рисунок 2).

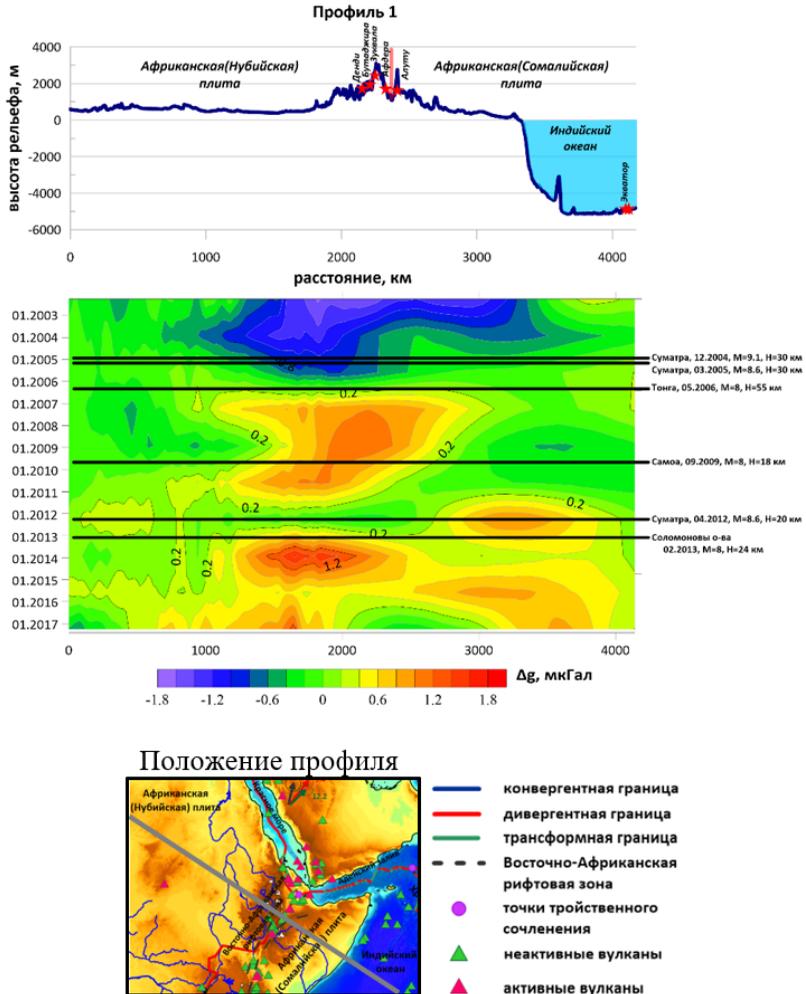


Рисунок 2. Рельеф и временной разрез аномалий поля силы тяжести вдоль профиля Нубийская плита – Индийский океан.

Сечение изоаномал 0,2 мкГал. Горизонтальные черные линии – временные отметки крупнейших мировых землетрясений. Красные линии над рельефом – границы литосферных плит. Красные звезды – вулканы, находящиеся на удалении менее 100 км от линии профиля.

1.4. Методика периодических гравиметрических наблюдений для выявления сезонных вариаций силы тяжести. Сезонные вариации гравитационного поля, обусловленные плотностными изменениями в верхней части разреза, являются естественной помехой для изучения массообменных процессов, в том числе циклических, в более глубоких частях разреза. Разделение вариаций по глубине их источников требуется при гравиметрическом мониторинге, выполняемом для контроля эксплуатации газовых, газоконденсатных месторождений, подземных хранилищ газа, при проектировании и строительстве атомных электростанций и на иных геодинамических полигонах. В современной практике гравиметрического мониторинга для выявления гравитационных эффектов, обусловленных сезонными изменениями приповерхностного слоя, используются два подхода, основанные на прямом расчете. Согласно подходу, предложенному в работе [Андреев и др., 2012], на площади работ на каждом гравиметрическом пункте проводят гидрогеологические измерения в скважинах или шурфах, по результатам которых рассчитывают искомый эффект. В подходе, описанном в [Патент..., 2009], на каждом гравиметрическом пункте необходимо выполнять дополнительные гравиметрические наблюдения в специально пробуренных скважинах. Оба способа предполагают бурение дополнительных наблюдательных скважин, что, безусловно, значительно усложняет процесс и повышает стоимость гравиметрического мониторинга.

Предлагаемая методика гравиметрических наблюдений предполагает наличие двух сегментов гравиметрических пунктов. Первый сегмент («горизонтальный») образуют пункты наблюдения, расположенные на дневной поверхности, второй сегмент («вертикальный») – пункты, возвышающиеся над поверхностью Земли (Рисунок 3).

Если рассматривать изменения плотности верхней части разреза, то в заданной геометрии пунктов (см. Рисунок 3) на вертикальном сегменте (пикеты 1 – 9) изменения силы тяжести будут незначительные, а на пунктах горизонтального сегмента (пикеты 3 – 6) – существенными. Теоретические расчеты подтверждены практическими измерениями в ходе трехлетнего эксперимента,

осуществленного на учебно-научной геофизической базе (дер. Александровка, Калужская область).

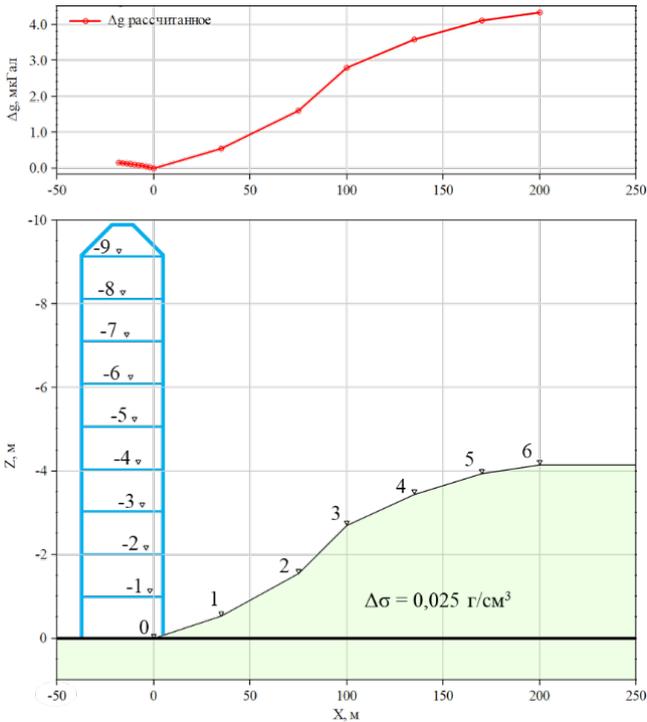


Рисунок 3. Принципиальная схема расположения пунктов гравиметрического мониторинга (снизу) и гравитационный эффект, возникающий при изменении плотности верхней части разреза на $0,025 \text{ г/см}^3$ (сверху)

Важными результатами измерений являются:

- приращения силы тяжести на пунктах вертикального фрагмента профиля постоянные, разброс значений не превышает $\pm 2-3 \text{ мкГал}$, что определяет реальную точность измерений на нестабильном основании (вышка при ветровой нагрузке или при передвижении людей раскачивается);

- на наземных пунктах значения силы тяжести в осенне-летний период в среднем на 10 мкГал больше, чем в зимний;

- изменение средних значений силы тяжести на горизонтальном фрагменте профиля за 10 серий измерений образует закономерную последовательность, близкую к периодической.

Выявленные изменения поля силы тяжести сопоставлены с независимыми данными о вариациях гравитационного поля по данным спутниковой миссии Грейс. Результаты сопоставления свидетельствуют о высокой степени сходимости вариаций по времени и амплитуде, что позволяет доверять результатам двух независимых методов и использовать их в паре для изучения сезонных изменений на региональных пространствах и на локальных площадях.

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

Глава 2. НОВЫЕ ПОДХОДЫ В ОБЛАСТИ ИНТЕРАКТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЛУБИННЫХ ПЛОТНОСТНЫХ И МАГНИТНЫХ МОДЕЛЕЙ

Достигнутый прогресс в качестве гравиметрических измерений и, соответственно, накопление сведений о структуре гравитационного поля для разных по масштабу исследования объектов определяют актуальность систематизации подходов геологической интерпретации аномалий гравитационного поля, разработки новых методов и совершенствования имеющихся алгоритмов. Важными в данном контексте являются разработанные с участием автора *алгоритмы решения прямых и обратных задач гравиметрии в двумерной и трехмерной постановках (раздел 2.1)*.

2.1.1. Поле притяжения многоугольника с параболическим законом распределения плотности (двумерная задача) [Чепиго, Лыгин, Булычев, 2019]. Для комплексной напряженности гравитационного поля многоугольника с параболическим законом распределения плотности получено выражение вида:

$$\begin{aligned}
 G(s) &= G \sum_{v=1}^N \int_{\sigma_v}^{\sigma_{v+1}} \frac{\Phi(\sigma, \alpha_v \sigma + \beta) - \Phi(s, \bar{s})}{\sigma - s} d\sigma = \\
 &= \frac{K_{3v}}{3} (\sigma_{v+1}^3 - \sigma_v^3) + \frac{K_{2v} + K_{3v}s}{2} (\sigma_{v+1}^2 - \sigma_v^2) + \\
 &\quad + (K_{1v} + K_{2v}s + K_{3v}s^2)(\sigma_{v+1} - \sigma_v) + \\
 &\quad + (K_{0v} + K_{1v}s + K_{2v}s^2 + K_{3v}s^3) \ln \left(\frac{\sigma_{v+1}s - s}{\sigma_v - s} \right),
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\left. \begin{aligned} K_{3v} &= \frac{\bar{A}\alpha_v^3}{3} + \frac{B\alpha_v^2}{2} + A\alpha_v \\ K_{2v} &= \bar{A}\alpha_v^2\beta + B\alpha_v\beta_v + \frac{\bar{C}\alpha_v^2}{2} + A\beta_v + C\alpha_v \\ K_{1v} &= \bar{A}\alpha_v\beta_v^2 + \frac{B\beta_v^2}{2} + \bar{C}\alpha_v\beta_v + C\beta_v + a_0\alpha_v \\ K_{0v} &= \frac{\bar{A}\beta_v^3}{3} + \frac{\bar{C}\beta_v^2}{2} + a_0\beta_v + \Phi(s, \bar{s}) \end{aligned} \right\}$$

Функция $\Phi(s, \bar{s})$ во внешней области равна нулю, во внутренней области вычисляется по формуле $\Phi(\sigma, \bar{\sigma}) = \int \delta(\sigma, \bar{\sigma}) d\bar{\sigma} = A\sigma^2\bar{\sigma} + \frac{\bar{A}}{3}\bar{\sigma}^3 + \frac{B}{2}\sigma\bar{\sigma}^2 + C\sigma\bar{\sigma} + \frac{\bar{C}}{2}\sigma\bar{\sigma}^2 + a_0\bar{\sigma}$.

Выражение (1) может быть использовано для расчетов вертикальной составляющей силы притяжения во внешней и внутренней областях, из чего следует его применимость в методах двумерного плотностного моделирования для условий сложного распределения плотности, а также в задачах скважинной и подземной гравиразведки.

2.1.2. Потенциал и поле притяжения многогранника и многоугольной пластины с линейным законом распределения плотности (трехмерная задача) [Булычев, Лыгин, Кузнецов, 2018] востребованы при решении прямых и обратных задач для сред с градиентным распределением плотности. Гравитационный эффект многогранника, представляющего трехмерную фигуру, определен через эффекты набора двумерных многоугольных пластин, которые, в свою очередь, выражены через эффекты сторон пластин (материальных отрезков) (Таблица 2).

2.1.3. Метод решения обратной задачи гравиразведки с переменной скоростью градиентного спуска разработан для подбора плотностных моделей с распределенными по глубине неоднородностями [Чепиго, Лыгин, Булычев, 2022].

Решение классической обратной задачи гравиразведки по подбору модели распределения плотности:

$$L_R = \|\Delta\sigma - \Delta g\|^2 + c\|\sigma - \sigma_A\|^2 \rightarrow \min,$$

решается методом градиентного спуска

$$\nabla L_R = 2A^T(A\sigma - \Delta g) + 2c(\sigma - \sigma_A),$$

Таблица 2. Компоненты притяжения многогранника с линейным изменением плотности в нем и его пластин и ребер

<p>Многогранник с объемной плотностью, изменяющейся по линейному закону $\delta(M) = a_x \xi + a_y \eta + a_z \zeta + a_0$</p>
<p>Потенциал притяжения $V(M_0) = \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q [(\zeta^q - z^q) V_q(M_0) - a_q V_q^R(M_0)]$</p>
<p>Поле притяжения $\mathbf{g}(M_0) = - \sum_{q=1}^Q \mathbf{n}_q V_q(M_0) + \mathbf{a} V^0(M_0)$</p>
<p>$V_q^R(M_0) = \int_{S_q} r_{MM_0} dS$ – можно определить численным интегрированием, $a_q = \text{grad } \delta(M) \cdot \mathbf{n}_q = (a_x i_x + a_y i_y + a_z i_z) \cdot \mathbf{n}_q = \mathbf{a} \cdot \mathbf{n}_q$, \mathbf{n}_q – внешняя единичная нормаль к q-ой грани (стороне многогранника), $V_q(M_0)$ – потенциалы притяжения пластин, совпадающие с сторонами многогранника, $V^0(M_0)$ – потенциал притяжения многогранника с постоянной единичной плотностью.</p>
<p>Пластина с линейным изменением поверхностной плотности (q-ая грань многогранника) $\delta_s(M) = \delta_s(\xi, \eta, \zeta) = a_x \xi + a_y \eta + a_0$ или $\delta_q(M^q) = a_x^q \xi^q + a_y^q \eta^q + a_0^q$</p>
<p>Потенциал притяжения $V_s(M_0) = V_q(M_0^q) = \int_{S_q} \delta_q(M^q) \frac{1}{r_{MM_0}} dS = \sum_{v=1}^N (\xi^v - x^v) V_v(M_0) - \sum_{v=1}^N a_v V_v^R(M_0) - (\zeta - z) g_z^s(M_0)$</p>
<p>Вертикальная составляющая притяжения горизонтальной многоугольной пластины с линейной поверхностной плотностью $g_z^s(M_0) = \frac{1}{(\zeta - z)} \sum_{v=1}^N (\xi^v - x^v) (V_v(M_0) - (a_y^v I_{121}^v + (a_y^v y^v + a_0^v) I_{122}^v)) - \frac{ \zeta - z }{(\zeta - z)} \sum_{v=1}^N a_v I_2^v$</p>
<p>Горизонтальные компоненты поля притяжения $g_x^s i_x + g_y^s i_y = - \sum_{v=1}^N \mathbf{n}_v V_v(M_0) + \mathbf{a} V_s^0(M_0)$</p>
<p>$V_v^R(M_0) = \frac{1}{2} [(\eta_2^v - y^v) r_2^v - (\eta_1^v - y^v) r_1^v + b^2 V_v^0(M_0)]$, r_1^v и r_2^v – расстояния от концов граней до точки M_0, $V_v(M_0)$ – потенциалы притяжения материальных отрезков, совпадающих со сторонами многоугольника, $V_s^0(M_0)$ – потенциал многоугольной пластины с постоянной единичной поверхностной плотностью.</p>
<p>Материальный отрезок с линейным изменением плотности (v-ое ребро многогранника) $\delta_v(\eta^v)$, $\delta(\eta) = a_y \eta + a_0$</p>
<p>Потенциал притяжения материального отрезка $V_v(M_0)$, расположенного вдоль оси Oy $V_v(M_0) = \int_{\eta_1^v}^{\eta_2^v} \delta_v(\eta^v) \frac{1}{r_{MM_0}} d\eta^v = a_y (r_2 - r_1) + (a_y y + a_0) V_v^0(M_0)$</p>
<p>r_1 и r_2 – расстояния от начала и конца стержня до расчетной точки M_0, $V_v^0(M_0) = \ln \frac{r_1 + r_2 + L}{r_1 + r_2 - L}$ – потенциал стержня с постоянной единичной плотностью [Страхов, 1985], L – длина стержня.</p>
<p>Вспомогательные интегралы</p>
<p>Интеграл $I_{121}^v = (r_2^v - r_1^v) - \zeta - z \ln \frac{ \zeta - z + r_2^v}{ \zeta - z + r_1^v}$</p>
<p>Интеграл $I_{122}^v = \ln \frac{(\eta_2^v - y^v) + r_2^v}{(\eta_1^v - y^v) + r_1^v} - 2 \zeta - z \frac{1}{(\xi^v - x^v)} \arctg \frac{(\xi^v - x^v)(w_2^v - w_1^v)}{w_2^v w_1^v + (\xi^v - x^v)^2}$ (по [Страхов, Лапина, 1986а])</p>
<p>Интеграл $I_2^v = \left[\xi^v - x^v \arctg \left(\frac{\eta^v - y^v}{ \xi^v - x^v } \right) - \xi^v - x^v \arctg \left(\frac{ \zeta - z (\eta^v - y^v)}{ \xi^v - x^v r_{MM_0}} \right) + \zeta - z \ln \left[2 \left((\eta^v - y^v) + r_{MM_0} \right) \right] + (\eta^v - y^v) \ln (\zeta - z + r_{MM_0}) - \eta^v \right] \frac{\eta_2^v}{\eta_1^v}$</p>

в котором скорость градиентного спуска связана с глубиной через степенную функцию:

$$\sigma_n = \sigma_{n-1} - \alpha(z)\nabla L_R(\sigma_{n-1}),$$

$$\alpha(z) = \alpha_0 z^n, n - \text{вещественное число (глубинный индекс)}.$$

Подход позволяет искусственно увеличить шаг градиентного спуска для глубоких ячеек и включить их в процесс подбора плотностной модели. При увеличении показателя степени n будет увеличиваться глубина подобранных плотностных неоднородностей.

Результаты теоретических и практических расчетов показывают, что использование переменной скорости градиентного спуска позволяет регулировать распределение плотностных неоднородностей по глубине: при увеличении показателя степени происходит увеличение глубины центра масс плотностной неоднородности в подобранной модели.

На основе априорных данных могут строиться более сложные распределения параметра α , зависящие не только от глубины, но и от горизонтальных координат. Максимальные значения параметра α в таком случае должны присваиваться ячейкам, в которых по априорным данным располагаются или ожидаются плотностные неоднородности. При привязке плотностных неоднородностей к определенным интервалам глубин в качестве функции $\alpha(z)$ может использоваться любая функция, имеющая экстремум на заданной глубине.

2.1.4. Метод определения параметров точечного источника по гравитационному полю, заданному на сфере [Чепиго, Ткаченко, Лыгин, 2019]. При решении обратных задач гравиразведки с учетом сферичности востребованы экспресс-методы оценки параметров источников аномалий. Классический среди экспресс-методов для расчетов на плоскости способ определения параметров сферической массы (положение центра и масса) по гравитационному полю адаптирован для расчетов на сферической поверхности. В случае, если поле задано не на плоскости, а на сфере, расстояние от начала координат до точечной массы R_0 можно определить через отношение соответствующих компонент гравитационного действия сферы (гравитационного потенциала V , силы тяжести V_R) в точке P к максимальному значению (k):

$$k = \frac{V_R(P)}{V_{Rmax}} = \frac{(R-R_0 \cos\psi)(R-R_0)^2}{(R^2+R_0^2-2RR_0 \cos\psi)^{3/2}},$$

где R – расстояние от начала координат до точки, θ и λ – зенитный и азимутальный углы соответственно, $\cos\psi = \sin\theta_0 \sin\theta \cos(\varphi_0 - \varphi) + \cos\theta_0 \cos\theta$.

Выражение сводится к алгебраическому уравнению 6-й степени и решается численными методами относительно R_0 :

$$\begin{aligned} k_6 R_0^6 + k_5 R_0^5 + k_4 R_0^4 + k_3 R_0^3 + k_2 R_0^2 + k_1 R_0 + k_0 &= 0 \\ k_6 &= k^2 - \cos^2\psi, \\ k_5 &= R(4\cos^2\psi - 6k^2 \cos\psi + 2\cos\psi), \\ k_4 &= R^2(12k^2 \cos^2\psi - 6\cos^2\psi + 3k^2 - 8\cos\psi - 1), \\ k_3 &= R^3(-8k^2 \cos^3\psi + 4\cos^2\psi - 12k^2 \cos\psi + 12\cos\psi + 4), \\ k_2 &= R^4(12k^2 \cos^2\psi - \cos^2\psi + 3k^2 - 8\cos\psi - 6), \\ k_1 &= R^5(-6k^2 \cos\psi + 2\cos\psi + 4), \\ k_0 &= R^6(k^2 - 1). \end{aligned}$$

Среди шести возможных корней уравнения единственное искомое решение – действительное значение, величина которого меньше R .

Масса сферы определяется с учетом найденного положения её центра: $M = \frac{V_{max}(R-R_0)}{G} = \frac{V_{Rmax}(R-R_0)^2}{G}$.

Очевидным выводом является то, 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.

2.2. Систематизация методик геоплотностного интерактивного моделирования в зависимости от объема и состава привлекаемой априорной геолого-геофизической информации на основе формирования особых условий неформального подбора [Лыгин и др., 2022]. Под геоплотностным моделированием понимается построение плотностных разрезов на основе анализа и интерпретации аномалий гравитационного поля с привлечением дополнительной геолого-геофизической информации. Разрез отображает распределение в геологической среде плотности. Конечная цель процесса моделирования состоит в получении двумерных (разрезы) или трехмерных (объемные) моделей, гравитационный эффект которых с заданной точностью совпадает с полученными в результате

инструментальных измерений аномалиями поля силы тяжести (в принятой терминологии с “наблюденным” полем). В роли подбираемого параметра выступает плотность. Поскольку подходы к составлению геомагнитных разрезов близки к подходам плотностного моделирования, нижеследующие рассуждения справедливы к моделированию источников аномальных магнитных полей.

2.2.1. Методика составления геоплотностных (и геомагнитных) моделей реализует возможность формализации и учета практически неограниченных по объему и составу априорных геолого-геофизических данных, предусматривая вариативность в подходах к моделированию в зависимости от содержащейся в них информации. В Таблице 3 схематически представлен алгоритм моделирования, включающий шесть основных этапов (Этапы I–VI в строках Таблицы 3) и четыре возможных подхода (Подходы 1–4 в соответствующих столбцах). Подход выбирается интерпретатором с учетом особенностей используемых данных.

Подход 1 выбирается при отсутствии априорной информации, когда имеется только наблюдаемое поле, представленное аномалиями поля силы тяжести в редукции Буге или других редукциях при геоплотностном моделировании.

Поскольку фактически отсутствует и какая-либо геологическая информация, то интерпретатору остается положиться только на свой опыт и интуицию или на формальные автоматизированные решения (Рисунок 4, А).

Подобная ситуация характерна для начальных стадий геологического изучения и свойственна формальным решениям.

Подход 2 реализуется, когда существует начальная физико-геологическая модель, включающая стратиграфические горизонты, тектонические нарушения, реальные или предлагаемые интерпретатором геологические разрезы в цифровом или растровом форматах, но без сейсмической основы. Элементы структурного каркаса могут быть представлены в цифровом или растровом формате.

Как правило, подобный набор данных используется при блочном моделировании в качестве каркаса (Рисунок 4, Б).

Подход 3 выбирается при наличии цифровых глубинных геофизических (сейсмических, геоэлектрических и др.) и геологических

Таблица 3. Алгоритм интерактивного геоплотностного и геомагнитного моделирования

	Подход 1 простой – “потенциальный”	Подход 2 легкий – “концептуальный”	Подход 3 средний – “геофизический”	Подход 4 полный – “геолого-геофизический”
1	2	3	4	5
Этап I <i>Сбор и подготовка исходных данных</i>	Наблюденное поле (аномалии поля силы тяжести в редукции Буге, аномалии магнитного поля и др.	Цифровые и растровые элементы структурного каркаса (структурные горизонты, тектонические нарушения, реальные и предлагаемые интерпретатором геологические разрезы) без сейсмической основы	Цифровые глубинные геофизические (сейсмические, магнитные, геоэлектрические и др.) и геологические разрезы распределения различных атрибутов, не предназначенных для прямого пересчета в плотностные и магнитные свойства среды	Модель скоростей упругих волн (глубинно-скоростная модель) и другие геолого-геофизические модели, обеспеченные эмпирическими связями перехода в модель плотности или намагниченности
Этап II <i>Построение начальной модели среды</i>	Оценки глубин и форм источников аномалий на основе методов группы “Особые точки”	Геопространственная привязка и оцифровка растровой геологической информации, формирование структурного каркаса начальной модели среды	Формирование структурно-вещественного каркаса начальной модели среды, обеспеченного физическими характеристиками среды из других методов при отсутствии данных о плотности и намагниченности	Уточнение эмпирических связей и пересчет в начальную модель среды на их основе
	Распределение начальных свойств подбираемого параметра			
	нет	Применяются идеи общего характера заполнения начальной модели подбираемого параметра (например, увеличение плотности с глубиной в слое с заданным вещественным составом)		Заполнение начальной модели подбираемого параметра по эмпирическим связям
	Распределение ограничений на изменения подбираемого параметра			
нет	Структурный каркас и диапазоны изменения подбираемого параметра, исходя из <i>общих</i> петрофизических соображений	Структурный каркас и диапазоны изменения подбираемого параметра, исходя из <i>начальных</i> петрофизических и вещественных характеристик среды	Диапазоны изменения подбираемого параметра выбираются, исходя из доверительных интервалов исходных данных	

1	2	3	4	5
<p>Этап III <i>Формирование особых условий неформального подбора с использованием специальных инструментов. Построение весовой корректирующей функции R</i></p>	<p>Основания для определения весовой корректирующей функции R (определение областей приоритетного подбора)</p>			
	<p>окрестности особых точек</p>	<p>изменение глубины горизонта; изменение мощности слоя; ядра складок; разные части слоя (вблизи кровли, подошвы, вдоль срединной линии); окрестности тектонических нарушений; зоны тектонической дислокации и наибольшей концентрации тектонических нарушений</p>	<p>аномалии в распределении атрибутов на геофизических разрезах (например, зоны потери корреляции сейсмического разреза; локальные аномалии геоэлектрического разреза); структурно-вещественные неоднородности геологических разрезов</p>	<p>с большими отклонениями от среднего/минимального значения подбираемого параметра начальной модели; с высокими градиентами подбираемого параметра начальной модели</p>
	<p>Интерактивные операции определения весовой корректирующей функции R</p>			
<p>Этап IV <i>Дополнительные ограничения при решении обратной задачи</i></p>	<p>Ручные регуляризаторы. Интерактивные инструменты выделения областей приоритетного подбора или областей фиксированных (известных) значений с учетом оснований для определения R Амплитудный регуляризатор. Приоритетный подбор в областях с отклонениями подбираемого параметра от среднего значения на горизонтали. Чем больше модуль отклонения подбираемого параметра в ячейке от среднего значения на горизонтали, тем больше приоритет. “Срединный” регуляризатор. Приоритетный подбор в области заданной криволинейной поверхности $Z_0(x,y)$, гладко уменьшающийся при удалении от нее. Положение поверхности может быть отнесено к определенной части слоя (кровля, подошва, середина). Градиентный регуляризатор. Учет кривизны кровли и подошвы слоя. Чем больше градиент глубин границ, тем больше приоритет.</p>			
<p>Этап V <i>Подбор модели среды. Решение обратной задачи</i></p>	<p>1. Учет знака избыточного значения подбираемого параметра – сохранение знака подбираемого параметра начальной модели среды. 2. Учет направления изменения подбираемого параметра. 3. Ограничение значений подбираемого параметра, исходя из априорных данных и физических ограничений</p> <p>Способы решения обратной задачи:</p> <p>1. Подбор автоматизированный (например, методом градиентного спуска с применением переменной скорости градиентного спуска в зависимости от глубины) 2. Подбор интерактивный 3. Подбор комбинированный</p>			
<p>Этап VI <i>Верификация результативной модели</i></p>	<p>Верификация модели – проверка её соответствия априорным данным. При необходимости запуск итерационного процесса – в зависимости от условий возврат к Этапам I–IV.</p>			

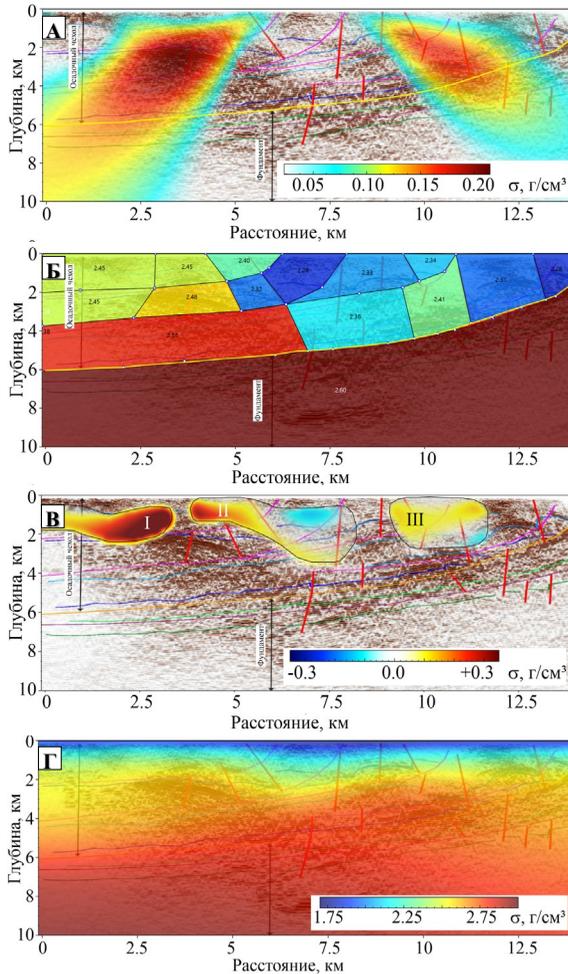


Рисунок 4. Варианты плотностных моделей среды, полученные на основе одного и того же комплекта априорных данных при подходах 1, 2, 3, 4. **А:** Подход 1. Подобранная модель распределения плотности в предположении источников типа “горизонтальный цилиндр” на фоне структурного сейсмического разреза. **Б:** Подход 2. Блочная плотностная модель, полученная в результате интерактивного подбора, с указанием значений плотности в блоках. **В:** Подход 3. Плотностной разрез после интерактивной коррекции внутри областей аномальных амплитуд сейсмического сигнала. **Г:** Подход 4. Плотностной разрез, подобранный с учетом глубинно-скоростной модели.

(реальных и предлагаемых интерпретатором) моделей распределения различных атрибутов, не предназначенных для прямого пересчета в плотностные характеристики среды (Рисунок 4, В).

Подход 4 может быть реализован в случае наличия геолого-геофизических моделей, обеспеченных эмпирическими связями пересчета в модель плотности. Например, существует модель распределения скорости упругих волн (глубинно-скоростная модель), для которой может быть установлена зависимость для пересчета в плотностную модель на основе эмпирических связей “скорость–плотность”; имеются данные для определения фактических параметров эмпирической зависимости на изучаемом объекте (Рисунок 4, Г).

Хотя набор процедур процесса моделирования в выработанных подходах общий, но внутреннее содержание каждого подхода индивидуально, то есть используемые методы и алгоритмы моделирования зависят от геологического строения (плотностной дифференциации горных пород, взаимоотношения скоростных и плотностных характеристик разреза, истории геологического развития территории и т.д.) и от объема и качества исходных данных (гравirazведки, сейсморазведки и др.).

Подходы применялись автором при восстановлении физико-геологических элементов теоретических и практических моделей на основе интерактивного плотностного моделирования:

2.2.2. для демонстрации повышения информативности модели в зависимости от объема и состава используемых априорных данных;

2.2.3. при анализе данных наземной высокоточной гравиметрической съемки, выполненной вблизи учебно-научной геофизической базы (дер. Александровка, Калужская область);

2.3.1. для уточнения морфологии кровли палеогеновых отложений северной части острова Сахалин [Лыгин и др., 2022]. Результаты применения подхода позволили сформировать непротиворечивую структурно-тектоническую и бассейновую модель северной части о Сахалин, локализовать положение перспективных объектов и уточнить оценку ресурсного потенциала. Задача восстановления морфологии границы здесь была главной, и трехмерная плотностная модель не строилась;

2.3.2. для выявления особенностей строения Енисей-Хатангской рифтовой системы [Афанасенков и др., 2017]. Построенная объемная плотностная модель Енисей-Хатангского региона вкпе с результатами комплексной геолого-геофизической интерпретации позволила доказать рифтогенную природу прогиба и выявить 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 примере не описывается детально процесс уточнения морфологии границ, но сделан упор на геологические выводы;

2.3.3. для уточнения морфологии границы Мохоровичича в Баренцевоморском регионе [Лыгин и др., 2023]. В примере рассматривается методика реконструкции глубинных границ по аномалиям потенциальных полей с опорой на сейсморазведочные данные на основе машинного обучения. Отличительной особенностью методики является верификация полученных прогнозных границ по потенциальному полю [Лыгин и др., 2023]. 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. Если в прогнозном горизонте присутствуют морфологические элементы, не создающие значительного гравитационного (или магнитного) эффекта, то при решении обратной задачи они естественным путем не восстанавливаются. В результате в окончательном варианте прогнозной границы отсутствуют эффекты, которые не могут быть подтверждены по гравиметрическим или магнитным данным. В примере продемонстрирован пример реконструкции подошвы земной коры (границы Мохоровичича) для Баренцева моря. Реконструированные с помощью разработанного подхода граница Мохоровичича и подошва осадочного чехла легли в основу трехмерной геологической модели, прояснившей взаимоотношение блоков гетерогенного основания Баренцевоморской плиты [Лыгин, Арутюнян, 2023];

2.3.4. для уточнения физико-геологических моделей неоднородностей верхней части разреза в Восточной Сибири [Мостовой и др., 2021; Молчанов и др., 2021]. В примере реализуется описанный выше алгоритм моделирования, но применительно не к одному набору данных (гравиметрическому), а сразу к четырем (сейсмическому, электроразведочному, магнитному и гравиметрическому), то есть рассматривается обобщающий подход построения согласованных физико-геологических моделей.

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

Наличие прямой связи между массами, вовлечёнными в перемещение в недрах Земли, и изменением гравитационного поля вне её, обуславливают постоянный научно-практический интерес к регистрации пространственно-временных вариаций гравитационного поля. Направление по изучению неприливных изменений силы тяжести востребовано в трех временных масштабах – в масштабе геологической истории, на промежутках длительностью от одного года до первых десятков лет и менее года.

Пространственно-временные изменения гравитационного поля в масштабе геологической истории могут быть оценены только косвенно. При участии автора выполнена теоретическая разработка модели реакции Земли на кратковременное воздействие гравитационных сил, обладающих значительным пространственным и временным градиентами [Мелихов, 2006; Мелихов, Лыгин, 2006, 2008, 2011]. Главным условием при выборе модели космического источника является требование градиентности его гравитационного поля. В этом случае оно будет действовать на разные точки Земли с разной силой, создавать напряжение между точками, инициировать разломное и пластическое перемещение масс. Подобным полем могут обладать космические тела широкого спектра по массе, размерам, скорости движения, а также гравитационные волны, некоторые из которых регистрируются в последнее время [Abbott B. P. et al., 2019]. Модель реакции Земли включает три этапа: этап воздействия космических

гравитационных сил (КГС) с резким торможением скорости вращения планеты и возникновением интенсивных тектонических процессов; этап снятия сил КГС, нарастание скорости вращения планеты, инверсия тектонических сил; длительный этап стабилизации динамики планеты, эволюционный тектонический режим, происходящий на фоне спокойных ротационных процессов. Вопрос о воздействии на Землю кратковременных гравитационных сил, обладающих значительным пространственным и временным градиентами, в работе не обсуждается.

Более короткие вариации гравитационного поля доступны для регистрации и такие данные используются в ряде глобальных, региональных и локальных геологических и смежных задач. В разделе 1.4 предложена методика регистрации вариаций, связанных с сезонными изменениями гидрологического режима, без использования абсолютных гравиметров. В разделе 1.3 предложена методика выделения долговременных (длительностью более одного года) пространственно-временных вариаций гравитационного поля из данных спутниковых наблюдений миссии Грейс, которые могут быть объяснены следствием геодинамических процессов.

В разделах третьей главы рассмотрены результаты анализа зарегистрированных вариаций поля силы тяжести на территории Главного Здания МГУ имени М.В. Ломоносова и в двух крупных регионах Земли – северо-восточный сектор Тихоокеанского региона (Аляскинско-Калифорнийский участок субдукции) и Африкано-Аравийско-Каспийский регион (зона 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. Вариации в окрестности МГУ связаны с сезонной изменчивостью гидродинамического режима.

3.1. Выявление сезонной изменчивости гидродинамического режима по наземным периодическим гравиметрическим наблюдениям на территории Главного Здания МГУ имени М.В. Ломоносова выполнено в ходе специально поставленного эксперимента. 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. Выяснено, что в центральной части профиля (пункты расположены внутри здания) гравитационное поле не изменяется, в то время как гравитационное поле на пунктах вне здания подвержено сезонным изменениям. На пунктах, относящихся к сектору «В», изменения обусловлены деформациями дневного рельефа. На пунктах, относящихся к сектору «Б», основной вклад изменений обусловлен изменением плотности грунта: осенне-зимние значения аномалий поля силы тяжести в редукции Буге на 10–12 мкГал выше, чем зимне-весенние. Наиболее вероятной причиной изменения гравитационного поля является изменение водонасыщения грунта вследствие атмосферных осадков. Если для сектора «В» водонасыщенность сохраняется примерно постоянной, то для сектора «Б», стоящего на засыпанном овраге, поступающая вместе с осадками вода стекает вдоль его тальвега.

В разделах 3.2 и 3.3. анализируются низкочастотные вариации гравитационного поля, выделенные по методике, описанной в разделе 1.3.

3.2. Геодинамические причины вариаций гравитационного поля в северо-восточном секторе Тихоокеанского региона. Во всем рассматриваемом регионе выделены только две области наиболее контрастных вариаций поля силы тяжести.

Первая – это область перехода от фронтальной субдукции к кривой коллизии между Тихоокеанской и Северо-Американской плитами [Лобковский и др., 2013], которая в дневном рельефе приурочена к восточному замыканию Алеутской дуги и Кордильер (здесь расположен Аляскинский хребет). Временная аномалия поля силы тяжести имеет изометричную в плане форму и размер 800×1000 км. За период с 01.2003 по 12.2015 гравитационное поле в этой области меняется от +8.3 до -12.2 мкГал со средней скоростью до 0.13 мкГал/месяц.

Вторая область включает разлом Сан-Андреас и рифт Юта. Под центральной частью разлома Сан-Андреас существует мантийное окно, образовавшееся 19 млн. лет назад из-за отрыва слэба Тихоокеанской плиты и его дальнейшего погружения в астеносферу. Через это окно осуществляется восходящий поток мантийного вещества [Becken et al.,

2012]. Временная аномалия гравитационного поля также изометричная в плане размером 1200×1600 км. За период с 01.2003 по 12.2015 гравитационное поле в этой области меняется от +1.8 до -3.7 мкГал со средней скоростью изменения поля до 0.04 мкГал/месяц, практически вдвое медленнее, чем на Алеутской дуге.

Обе области характеризуются повышенной сейсмичностью, вулканической активностью. Наиболее крупные землетрясения (магнитуда более 8) вызывают наиболее интенсивные отклики в изменениях плотностного разреза, выявляемых по временным изменениям гравитационного поля.

На остальной части территории рассматриваемого региона нет выраженных низкочастотных временных вариаций гравитационного поля. В частности, над зонами фронтальных частей Алеутской и Каскадной зон субдукции они отсутствуют, что указывает на то, что процессы, связанные с субдукцией, имеют установившийся характер.

В предположении того, что непрерывные плотностные перераспределения в рассматриваемых областях с малой долей вероятности могут происходить в твердых оболочках на больших площадях (превосходящих 1000 км в поперечнике), из анализа возможных глубин исключен интервал от поверхности Земли до максимальных глубин распространения гипоцентров землетрясений, то есть литосфера. Для Аляскинского хребта эта глубина составляет 150 км, для разлома Сан-Андреас – рифт Юта – 50 км. Положение подошвы литосферы контролировалось данными модели LITHO 1.0.

В астеносфере положение тел согласовывалось с особенностями распределения аномалий скорости продольных волн по данным сейсмической томографии. Так для области Аляскинской аномалии вариаций на глубинах 150 – 300 км выделяется локальная скоростная неоднородность, сменяющая знак при переходе через ось гравитационной аномалии. Для области разлома Сан-Андреас и рифт Юта на глубинах 50 – 200 км наблюдается область пониженных аномалий скорости.

Окончательные размеры и избыточные плотности источников гравитационных аномалий подобраны в процессе моделирования гравитационных эффектов на сфере. В качестве тел,

аппроксимирующих источники, для обеих областей выбрана тессероид («сферическая» прямоугольная призма).

Подобренные избыточные плотности, отвечающие вариациям поля силы тяжести, имеют порядок $10^{-2} - 10^{-3}$ кг/м³. Беря во внимание связь плотность – давление в мантии по [Галушкин, 2007] изменение плотности на 1×10^{-2} кг/м³ приводит к уменьшению давления на глубине 150 – 300 км порядка 0.5 атмосфер, а изменение плотности на 6×10^{-3} кг/м³ приводит к уменьшению давления на глубине 50 – 200 км на 0.3 атмосферы. Порядок изменения давления в мантии является реальным, исходя из современных термобарических моделей мантии Земли. Таким образом, установлены причины возникновения вариаций гравитационного поля через изменения давления в ограниченном объеме астеносферы, хотя предложенная трактовка не объясняет природу этих изменений. Для ее установления требуются дополнительные геодинамические исследования. Полученные результаты являются основой для дальнейшего геодинамического анализа области северо-восточного сектора Тихого океана и дальнейшего уточнения геодинамической природы зарегистрированных вариаций поля силы тяжести.

3.3. Геодинамические причины вариаций гравитационного поля в Африкано-Аравийско-Каспийском регионе. В рассматриваемом регионе пространственно-временные изменения поля силы тяжести имеют неярко выраженный характер над стабильными частями литосферных плит, а также над срединно-океаническим хребтом Карлсберг, его продолжением в Аденском заливе и Красноморским рифтом. Особый характер вариаций гравитационного поля связан с такими областями как Восточно-Африканская рифтовая система, Анатолийская плита, Центрально-Каспийская область (Рисунок 5).

Центрально-Каспийская область – это область наибольших по амплитуде вариаций, а значит и плотностных изменений. Положение аномальной области поля вариаций хорошо локализовано в плане:

- 1) находится вблизи береговой линии (накрывает и морскую, и сухопутную территории), но тяготеет к западному берегу;
- 2) располагается в зоне пересечения тектонических разломов земной коры среднего Каспия, в окрестности Апшероно-Прибалханского порога;

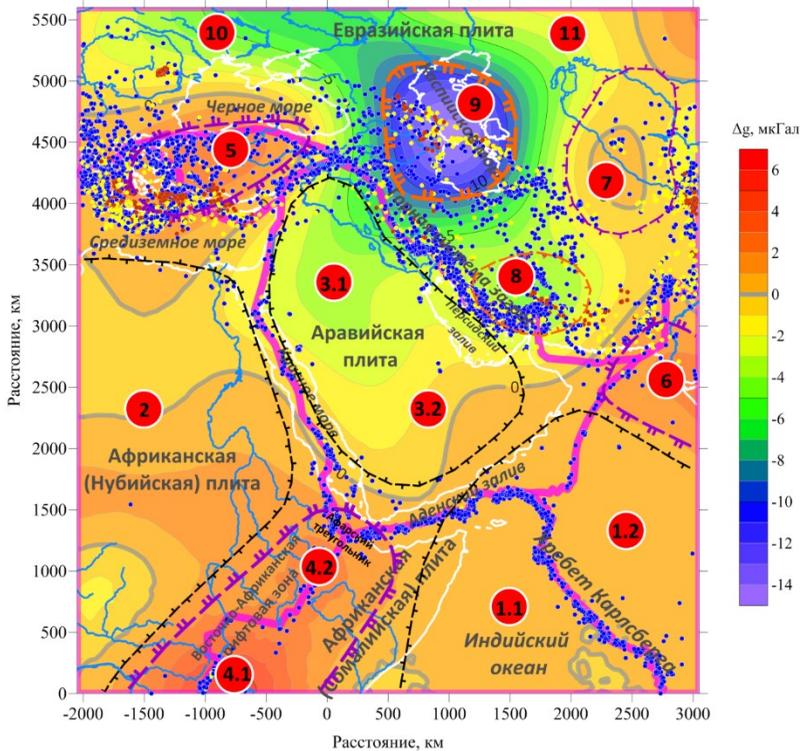


Рисунок 5. Районирование Африкано-Аравийско-Каспийского региона по характеру временных вариаций гравитационного поля на фоне разностного поля низкочастотных осредненных вариаций за 2015 и 2005 годы.

- Условные обозначения
- Границы областей вариаций гравитационного поля
 - область слабых изменений (1-3)
 - область увеличения поля со временем (4-7)
 - область уменьшения поля со временем (8-11)
 - Границы литосферных плит
 - а) б) в) Гипоцентры землетрясений:
 - а) менее 20 км; б) 20 - 50 км; в) более 50 км
 - 5 Номера областей вариаций гравитационного поля

Области интенсивности вариаций гравитационного поля: отсутствие или слабое проявление вариаций (1.1 – Африканская плита в Индийском океане; 1.2 – Индостанская плита в Индийском океане; 2 – Африканская плита, Аравийская плита, блоки: 3.1 – северный, 3.2 – южный); мало- и среднеамплитудные вариации (5 – Эгейско-Анатолийская плита; 6 – Индостанская плита, Карачи; 7 – Восточно-Туранская плита; 8 – Лут (Иранская область); Евразийская плита, части: 10 – западная, 11 – Аральская); наиболее интенсивные вариации (Восточно-Африканская рифтовая зона, блоки: 4.1 – северо-восточный, 4.2 – юго-западный; 9 – Каспийская область).

- 3) приурочена к зоне резкого изменения мощности литосферы;
- 4) включает область концентрации глубокофокусных землетрясений;
- 5) располагается над локальным выступом по кровле астеносферы.

Данные обстоятельства свидетельствуют в пользу глубинного расположения источника вариаций гравитационного поля над Апшеронским порогом Каспийского моря. Гравитационные вариации обусловлены объемным перераспределением масс (то есть плотности и давления) в выступе астеносферы и, возможно, вертикальными движениями находящегося выше относительно подвижного блока литосферы. К активизации перераспределения масс и вертикальным движениям приводят внешние воздействия, например, крупные землетрясения. С учетом тектонических условий вероятный источник интенсивных гравитационных аномалий над Каспийским бассейном расположен в астеносфере (на глубинах 100–300 км).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты анализа данных миссии Грейс являются основой для внедрения в геологическую практику нового метода геодинамического анализа, позволяющего по изменениям гравитационного поля во времени давать ответ о стабильности блоков литосферы, локализовать области изменения плотности и выполнять численные оценки этих изменений в размерности плотности или массы, или давления.

Разработанные алгоритмы и методы решения прямых и обратных задач, предложенные подходы в области геоплотностного интерактивного моделирования оказались востребованными при разработке ряда программных продуктов и используются при решении практических геологических задач. Дальнейшее развитие алгоритмов, методов, подходов должно быть продолжено в направлении их адаптации для исследований, выполняемых на замкнутых (сферических, эллиптических и др.) поверхностях. Данное направление становится актуальным в связи с развитием космических технологий.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что цель исследования – повышение информативности материалов гравиразведки в общем комплексе геолого-геофизических исследований – достигнута: разработаны новые полевые методики, математические алгоритмы и методические подходы интерпретации, с их использованием получены новые геологические результаты.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе ядра Российского индекса научного цитирования eLibraryScience index:

1. Афанасенков А.П., **Лыгин И.В.**, Обухов А.Н., Соколова Т.Б., Кузнецов К.М. Объемная реконструкция тектонических элементов Енисей-Хатангской рифтовой системы по результатам комплексной геолого-геофизической интерпретации // Геофизика. 2017. № 2. С. 60–70. (0.69 п.л., авторский вклад 40%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,4.

2. Булычев А.А., **Лыгин И.В.**, Кузнецов К.М. Поле притяжения многогранника и многоугольной пластины с линейной плотностью // Физика Земли. 2018. № 4. С. 58–67. 2024. (0.63 п.л., авторский вклад 40%). Импакт-фактор РИНЦ: 1,255.

Bulychev A.A., **Lygin I.V.**, Kuznetsov K.M. The field of attraction of a polyhedron and polygonal plate with linear density // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. 2018. Vol. 54. # 4. P. 592–601. DOI: 10.1134/S1069351318040018. (0.63 п.л., авторский вклад 40%). SJR: 0,296.

3. **Лыгин И.В.**, Арутюнян Д.А. Особенности строения земной коры Баренцева моря по результатам трехмерного плотностного и магнитного моделирования // Геофизика. 2023. №3. С. 85–93. DOI: 10.34926/geo.2023.42.21.012. (0.56 п.л., авторский вклад 50%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,4.

4. **Лыгин И.В.**, Арутюнян Д.А., Чепиго Л.С., Кузнецов К.М., Шклярук А.Д. Методика построения структурных поверхностей по геолого-геофизическим данным на основе машинного обучения на примере реконструкции границы Мохо в Баренцевоморском регионе // Гелиогеофизические исследования. 2023. № 38. С. 3–16. DOI: 10.5425/2304-7380_2022_38_3. (0.88 п.л., авторский вклад 50%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,867.

5. **Лыгин И.В.**, Булычев А.А., Гилод Д.А., Соколова Т.Б., Фадеев А.А. Результаты гравиметрических исследований на геофизическом полигоне в Калужской области // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2014. № 2. С. 3–10. (0.50 п.л., авторский вклад 40%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,380.

Lygin I.V., Bulychev A.A., Gilod D.A., Sokolova T.B., Fadeev A.A. The results of gravity surveys at geophysical grounds in the Kaluga region // Moscow University Geology Bulletin 2014. Vol. 69. # 2. P. 61–67. DOI: 10.3103/S0145875214020094. (0.50 п.л., авторский вклад 40%). SJR: 0,238.

6. **Лыгин И.В.**, Кузнецов, К.М., Шевалдышева, О.О., Гудкова, Т.В. Оценка детальности современных цифровых моделей гравитационного поля Земли на примере Карской астроблемы // Гелиогеофизические исследования. 2024. № 43. С. 4–14. (0.69 п.л., авторский вклад 35%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,867.

7. **Лыгин И.В.**, Правдивец Д.Д., Сурков М.В., Жаров А.Э., Бакуев О.В., Фомин А.Е. Модель кровли палеогеновых отложений Северной части острова Сахалин по данным гравиразведки и сейсморазведки // Геофизика. 2022. № 3. С. 32–44. (0.81 п.л., авторский вклад 40%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,4.

8. **Лыгин И.В.**, Пышнюк У.С. Связь вариаций гравитационного поля с тектоническими особенностями в Африкано-Аравийско-Каспийском регионе // Геофизика. 2021. № 6. С. 47–60. (0.88 п.л., авторский вклад 60%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,4.

9. **Лыгин И.В.**, Ткаченко Н.С. Оценка плотностных неоднородностей геодинамически активных обстановок по временным вариациям гравитационного поля в северо-восточном секторе Тихого океана // Геофизика. 2020. № 1. С. 77–83. (0.44 п.л., авторский вклад 50%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,4.

10. **Лыгин И.В.**, Соколова Т.Б., Кузнецов К.М., Фадеев А.А. Методика гравиметрического мониторинга для выявления сезонных вариаций силы тяжести // Геофизика. 2024. № 4. С. 40–45. (0.38 п.л., авторский вклад 60%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,4.

11. **Лыгин И.В.**, Ткаченко Н.С., Зотов Л.В. Анализ временных вариаций гравитационного поля над северо-восточным сектором Тихоокеанского региона по данным спутниковой миссии ГРЕЙС // Геофизика. 2019. № 2. С. 73–82. (0,63 п.л., авторский вклад 40%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,4.

12. **Лыгин И.В.**, Чепиго Л.С., Соколова Т.Б., Кузнецов К.М., Булычев А.А. Методика геоплотностного и геомагнитного интерактивного моделирования в зависимости от объема и состава априорной геолого-геофизической информации // Геофизика. 2022. № 6. С. 57–70. (0,88 п.л., авторский вклад 40%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,4.

13. Мостовой Д.В., Твердохлебов Д.Н., **Лыгин И.В.**, Молчанов А.Б., Габова М.Н., Гвоздик С.А., Емельянова К.Л., Мельников Р.С. Построение модели ВЧР на основе комплекса геофизических методов с целью улучшения качества данных сейсморазведки // Геофизика 2021. № 2. С. 25–35. (0.69 п.л., авторский вклад 30%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,4.

14. Соколова Т.Б., **Лыгин И.В.**, Кузнецов К.М., Токарев М.Ю., Фадеев А.А., Арутюнян Д.А. Современные гравиразведка и

магниторазведка при решении инженерно-геологических задач на шельфе (обзор и опыт применения) // Геофизика. 2021. Специальный выпуск. С. 54–62. (0.56 п.л., авторский вклад 40%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,4.

15. Ткаченко Н.С., **Лыгин И.В.** Применение спутниковой миссии GRACE для решения геологических и географических задач // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2017. № 2. С. 3–7. (0.31 п.л., авторский вклад 50%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,380.

Tkachenko N.S., **Lygin I.V.** Application of the GRACE Satellite Mission for Solving Geological and Geographic Problems // Moscow University Geology Bulletin. 2017. Vol. 72. # 3. P. 159–163. DOI: 10.3103/S0145875217030085. (0.31 п.л., авторский вклад 50%). SJR: 0,238.

16. Фадеев А.А., **Лыгин И.В.**, Мелихов В.Р., Копаев А.В. Эталонный полигон по определению цены деления автоматизированных гравиметров в Москве // Геофизика. 2012. № 1. С. 70–73. (0.25 п.л., авторский вклад 40%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,4.

17. Чепиго Л.С., **Лыгин И.В.**, Булычев А.А. Прямая двумерная задача гравиразведки от многоугольника с параболической плотностью // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2019. № 4. С. 89–93. (0.31 п.л., авторский вклад 40%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,380.

Chepigo L.S., **Lygin I.V.**, Bulychev A.A. A 2D Forward Gravimetry Problem for a Polygon with Parabolic Density // Moscow University Geology Bulletin. 2019. Vol. 74. # 5. P. 516–520. DOI: 10.3103/S014587521905003X. (0.31 п.л., авторский вклад 40%). SJR: 0,238.

18. Чепиго Л.С., **Лыгин И.В.**, Булычев А.А. Решение обратной задачи гравиразведки с переменной скоростью градиентного спуска // Геофизические исследования. 2022. Т. 23. № 1. С. 5–19. DOI: 10.21455/gr2022.1-1. (0,94 п.л., авторский вклад 40%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,925.

19. Чепиго Л.С., Ткаченко Н.С., **Лыгин И.В.** Определение параметров точечного источника по гравитационному полю, заданному на сфере // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2019. № 2. С. 84–89. (0.38 п.л., авторский вклад 30%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,380.

Chepigo L.S., Tkachenko N.S., **Lygin I.V.** The Parameters of a Point Source on the Gravity Field of a Sphere. Moscow University Geology Bulletin. 2019. Vol. 74. # 3. P. 83–87. DOI: 10.3103/S0145875219030037. (0.38 п.л., авторский вклад 30%). SJR: 0,238.

20. Широкова Т.П., **Лыгин И.В.**, Соколова Т.Б. Особенности сейсмогравитационного моделирования в разных физико-геологических ситуациях // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология, 2022. № 1. С. 42–53. DOI: 10.33623/0579-9406-2022-1-42-53. RSCI (0.75 п.л., авторский вклад 30%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,380.

Shirokova T.P., **Lygin I.V.**, Sokolova T.B. The features of seismic-gravity modeling in different physical–geological situations // Moscow University Geology Bulletin. 2022. Vol. 77. # 2. P. 198–210. DOI: 10.3103/s0145875222020089. (0.75 п.л., авторский вклад 30%). SJR: 0,238.

21. Кузнецов К.М., **Лыгин И.В.**, Булычев А.А. Алгоритм численного решения прямой задачи гравиметрии от сферического слоя переменной плотности // Геофизика. 2017. № 1. С. 22–27. (0.38 п.л., авторский вклад 30%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,4.

22. Мелихов В.Р., **Лыгин И.В.**, Пийп В.Б. Строение земной коры в зоне сочленения Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты по комплексу геофизических данных // Геофизика. 2011. № 2. С. 70–79. (0.63 п.л., авторский вклад 30%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,4.

23. Мелихов В.Р., **Лыгин И.В.** Тектонические катастрофы и их место в эволюционном развитии Земли // Геофизика. 2008. № 2. С. 11–19. (0.56 п.л., авторский вклад 50%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,4.

Научные статьи, опубликованные в других рецензируемых научных изданиях, включенных в дополнительный список изданий, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности и отрасли наук:

24. Молчанов А.Б., **Лыгин И.В.**, Твердохлебов Д.Н., Мостовой Д.В. Комплексирование геофизических методов для 2d и 3d данных в ПО tomplex // Приборы и системы разведочной геофизики. 2021. № 3. С. 43–52. (0.63 п.л., авторский вклад 30%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,083.

Научные статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки РФ:

25. Кривошея К.В., **Лыгин И.В.**, Соколова Т.Б., Широкова Т.П. Возможности современной гравиразведки и магниторазведки // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2019. Том 85. № 1. С. 66–72. (0.44 п.л., авторский вклад 30%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,328.

Учебные пособия:

26. Булычев А.А., **Лыгин И.В.**, Мелихов В. Р. Численные методы решения прямых задач грави- и магниторазведки (конспект лекций). Учебное пособие для студентов и магистрантов специализации

Геофизика. — МГУ Москва, 2010. — 164 с. (10.25 п.л., авторский вклад 20%).

27. Учебная практика по гравиразведке. Часть I. Краткая геолого-геофизическая характеристика района учебной геофизической практики (д. Александровка Калужской области): учебное пособие / А.А. Булычев, Е.А. Лыгина, **И.В. Лыгин** и др. — КДУ Университетская книга М, 2017. — 18 с. (1.13 п.л., авторский вклад 25%).

28. Учебная практика по гравиразведке. Часть II. Методика гравиразведочных работ: учебное пособие / А.А. Булычев, **И.В. Лыгин**, Т.Б. Соколова и др. — КДУ Университетская книга М, 2017. — 74 с. (4.63 п.л., авторский вклад 30%).

29. Конспект лекций по курсу Гравиразведка. Часть I. / А.А. Булычев, **И.В. Лыгин**, Т.Б. Соколова и др. — КДУ, Университетская книга Москва, 2017. — 124 с. (7.75 п.л., авторский вклад 20%).

30. Прямая задача гравиразведки и магниторазведки (конспект лекций). Учебное пособие / ISBN 978-591304-877-6, / А.А. Булычев, **И.В. Лыгин**, Т.Б. Соколова, К.М. Кузнецов. — Университетская книга Москва, 2019. — 176 с. (11.0 п.л., авторский вклад 20%).

31. Практические работы по основам гравиразведки и магниторазведки. Часть I. Гравиразведка: учебное пособие, [электронное издание сетевого распространения] / К.М. Кузнецов, **И.В. Лыгин**, А.А. Фадеев и др. — Москва: Доброе слово, 2023. — 66 с. (4.13 п.л., авторский вклад 35%).

Иные публикации:

32. Мелихов В.Р., **Лыгин И.В.**, Булычев А.А., Лыгин В.А. Сравнительный анализ данных набортной гравиметрии и спутниковой альтиметрии // Разведка и охрана недр. 2004. № 5. С. 72–76. (0.31 п.л., авторский вклад 40%). Импакт-фактор РИНЦ: 0,260.