



УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИФЗ РАН,

Член-корреспондент РАН

С.А. Тихоцкий

02.03.2023

ОТЗЫВ

ведущей организации

**на диссертацию Хохловой Валерии Васильевны
«РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РЕДУЦИРОВАНИЯ ДАННЫХ
ВЫСОКОТОЧНОЙ ГРАВИРАЗВЕДКИ С УЧЕТОМ
СФЕРИЧНОСТИ ЗЕМЛИ», представленную на соискание
ученой степени кандидата технических наук
по специальности 1.6.9 – Геофизика**

Диссертационная работа Хохловой В.В. посвящена совершенствованию методов обработки и редуцирования гравитационных аномалий с учетом сферичности Земли. Целью работы является повышение точности определения аномалий силы тяжести в редукции Буге, что обеспечивает увеличение геологической информативности геофизических работ.

Актуальность темы исследований обусловлена тем фактом, что процесс обработки данных наземной гравиметрической съемки, установленный "Инструкцией по гравirazведке" и сложившейся практикой, опирается на модель "плоской Земли" и не включает в себя процедур, учитывающих ее сферичность. Высокая точность современных гравиметрических съемок и огромные мощности вычислительной техники требуют разработки более совершенных процедур редуцирования гравиметрических измерений с учетом сферичности Земли, что более адекватно современной геофизической практике. Любые методы геологической интерпретации геофизических данных опираются на данные измерений, и потеря точности на этапе первичной обработке геофизических данных уже невозможно восполнить применением даже самых совершенных приемов интерпретации. Повышение точности цифровых моделей аномального гравитационного поля за счет учета сферичности Земли, создает предпосылки для выделения аномалий силы тяжести, создаваемых слабоконтрастным и/или глубокозалегающим объектам. Отсюда заключаем, что тема диссертационного исследования направлена на решение актуальной задачи - повышение эффективности применения гравиметрической разведки при решении широкого круга геологических задач.

Структура работы и основные научные результаты. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (82

наименования) общим объемом 118 страниц, включая текст, 46 рисунков и 10 таблиц.

В начале первой главы рассмотрен процесс редуцирования данных полевых гравиметрических измерений в рамках модели «плоской Земли» в прямоугольных координатах. Далее, на основе анализа большого количества публикаций, дан критический обзор методов вычисления аномалий Буге на сферической поверхности Земли. Автор заключает, что, во многих выполненных к настоящему времени исследований доказана важность учета сферичности Земли при обработке гравиметрических данных и предложены различные подходы к учету сферичности, в практике камеральной обработки полевых гравиметрических материалов сферичность земли учитывается далеко не всегда. Обзор охватывает широкий набор подходов к учёту сферичности земли при вычислении поправок за промежуточный слой и за рельеф, и помимо методического имеет также и историческое значение.

В качестве замечаний к первой главе можно указать на отсутствие явных определений различных редукций силы тяжести, автор предполагает, что читатель легко отличает понятие поправки за топографию от поправки за рельеф, аномалий в топографической редукции от аномалий Буге и пр. В действительности имеется определённая терминологическая путаница, поэтому явное определение используемых понятий в данном случае особенно важно для избавления от заблуждений. Чёткое разграничение терминов и определений, касающихся различных видов аномалий силы тяжести сделано в третьем издании геологического словаря (ВСЕГЕИ, 2010-2012), необходимо им следовать. Также отметим, что автор никак не касается вопроса о выборе системы высот. Вместе с тем известно, что использование при редуцировании различных систем высот (геодезическая, нормальная, ортометрическая) может давать различия в значениях аномалий силы тяжести, сравнимые с теми, которые связаны со сферичностью Земли. До сих пор в литературе не был освящён вопрос о том к каким последствиям может приводить использование различных систем высот при вычислении поправки за промежуточный слой и поправок за рельеф. Между тем в современной практике это не исключено, поскольку высоты пунктов наблюдений могут определяться с использованием данных ГНСС и быть геодезическим, тогда как при вычислении поправок за рельеф могут использоваться карты и ЦММ, построенные в системе нормальных высот. Данный вопрос имеет прямое отношение к теме исследования и его следовало бы рассмотреть в работе.

Во второй главе с использованием простых теоретических моделей анализируются различия результатов решения прямой задачи гравиметрии для плоской и сферической моделей Земли. Оценивается влияние различных

факторов, включая различие между вертикальной V_Z и радиальной V_R производными гравитационного потенциала. Автор показывает, что разница в аномальном поле, вычисленном с учетом и без учета сферичности Земли может составить до 5% от значений аномального поля. В качестве оценки снизу влияния формы уровенной поверхности при гравитационном моделировании в пределах единой шестиградусной зоны координат Гаусса-Крюгера используется разность полей вертикальной и радиальной производных V_R и V_Z для одной и той же модели (сферической или плоской). Для численной реализации этой оценки применена аппроксимация поля системой точечных эквивалентных источников. Здесь следует указать, что использование термина «уровенная поверхность» по отношению к плоской либо сферической поверхности неправомерно, поскольку под уровенной поверхностью понимают поверхность равного потенциала силы тяжести (например, геоид). Более правильно использование термина «поверхность относимости», либо «координатная поверхность».

Важное замечание относится к утверждению, открывающему раздел 2.2: «При производстве гравиметрических работ гравиметр, вопреки распространённому мнению, измеряет не вертикальную составляющую силы тяжести V_Z , а радиальную V_R ». Это неправильно. Любой гравиметр устанавливается «по отвесу», т.е. его чувствительная система ориентируется по направлению вектора полной силы тяжести, которое отлично и от направления оси Z локальной системы координат и от радиус-вектора сферической системы координат). Поэтому абсолютный гравиметр непосредственно измеряет модуль вектора полной силы тяжести, а при помощи относительного гравиметра измеряют приращение модуля полной силы тяжести от точки к точке. Другой вопрос, что из-за малости модуля вектора аномального поля g_a сравнительно с нормальным полем γ , их разница (т.е. аномалия силы тяжести) с точностью до членов первого порядка по g_a/γ равна проекции аномального поля на направление нормального, т.е. производной аномального потенциала по направлению отвесной линии нормального поля (которая с высокой точностью совпадает с нормалью к референц-эллипсоиду).

Опять-таки жаль, что в работе, посвящённой анализу малых поправок к стандартным процедурам редуцирования аномалий силы тяжести, связанными со сферичностью Земли, за пределами рассмотрения остаются другие малые поправки, величина которых может быть (в условиях расчленённого рельефа и значительных аномалий силы тяжести) сопоставима с рассматриваемыми.

В третьей главе представлена разработанная диссертантом новая система обработки результатов полевых гравиметрических наблюдений, учитывающая сферическое приближение к форме Земли. В этой главе приведен

обзор аналитических решений прямой задачи гравиразведки для элементарных тел с элементами сферичности. Отдельный раздел посвящен вычислению гравитационного эффекта сферического параллелепипеда –элементарного тела, широко используемого в практике гравитационного моделирования на стадии региональных исследований. Создан оригинальный адаптивный кубатурный алгоритм вычисления V_R для сферического параллелепипеда и реализующее его программное обеспечение, которое прошло необходимые этапы тестирования. Программное обеспечение может эффективно использоваться при решении многих практических задач гравиразведки, в т.ч. при геологическом редуцировании результатов полевых измерений на больших территориях и при вычислении поправок за влияние рельефа местности на сферической Земле. Приведено обоснование применения квазиэллипсоидального приближения формы Земли (сферы Каврайского), которое реализуется простым аналитическим преобразованием геодезических координат. Данный способ отображения земного эллипсоида на заменяющую его сферу обеспечивает минимальное искажение углов и расстояний.

Несомненным достоинством диссертации является весьма подробный анализ целого ряда работ, посвященных решению прямой задачи гравиметрии от тел, ограниченных сферическими или эллиптическими поверхностями. Заметим, что количество работ в этой области исчисляется десятками, если не сотнями, особенно в области геодезических приложений. Но главные достижения и проблемы автором отражены.

В четвертой главе приведены результаты применения программно-алгоритмических разработок диссертанта, реализующих предложенный ей граф обработки гравиметрических данных для решения практических задач. Первый пример – материалы высокоточной гравиметрической съемки масштаба 1:25000, выполненной в пределах ультраосновного массив Кондёр (северная часть Хабаровского края) на площади 35 км². С этим массивом генетически связано одно из наиболее крупных месторождений платины в России. Приводится краткая физико-геологическая характеристика района работ и сведения о методике проведения наземной гравиметрической съемки. Установлено, что разность гравитационных полей в редукции Буге, вычисленных согласно «Инструкции по гравиразведке» (для плоской Земли) и предложенному алгоритму (для сферической Земли) изменяется от 0.96 до 2.41 мГал. Относительное расхождение составляет ~3,2% для аномалий силы тяжести в редукции Буге и ~12,9% для локальной (остаточной) составляющей гравитационного поля.

Второй пример – результаты мониторинговых исследований на Верхне-Камском месторождении калийных солей. Рассматривается участок, расположенный на западном склоне соляного поднятия в пределах которого развилась

область интенсивного оседания земной поверхности. Здесь сформировалось техногенное озеро длиной 1.2 км и шириной 0.4 – 0.7 км. На этом участке выполнялись повторные гравиметрические измерения масштаба 1:10000 (сеть 100×100 м). Сопоставление результатов применения разных графов обработки данных гравиразведки демонстрирует необходимость учета влияния сферичности Земли даже при небольших размерах площади съемки.

Научная новизна диссертации состоит:

1. В количественных оценках различия в аномалиях Буге, определенных в рамках плоской и сферической моделей Земли, достигающих 5% и более от амплитуды поля. Эти различия вносят погрешность, амплитуда которой в ряде случаев заметно превышает точность современных гравиметрических съемок.

2. В обосновании способа оценки влияния сферичности Земли при решении прямых задач гравиразведки на основе различия радиальной и вертикальной компонент гравитационного поля для одной и той же модели эквивалентных источников поля (точечных масс).

3. В создании нового способа расчета радиальной составляющей силы тяжести для сферического параллелепипеда, базирующегося на адаптивном квадратурном алгоритме для функций с особенностями, который обеспечивает высокую точность результатов и быстродействие (примерно 0.002 с для 1-го тела в 1-й точке).

4. В разработке эффективных алгоритмов редуцирования данных гравиметрической съемки на шарообразной Земле. Для перехода от геодезических координат к сферическим использована сфера Каврайского, слабо отличающаяся от земного эллипсоида вращения, и не требующая перехода к прямоугольной геоцентрической системе координат при выполнении дальнейших расчетов.

Практическая значимость исследований заключается:

1. В повышении точности вычисления аномалий силы тяжести и качества соответствующих цифровых моделей гравитационного поля с помощью созданного программно-алгоритмического обеспечения для редуцирования гравиметрических данных.

2. В создании компьютерных технологий, которые могут использоваться в производственных организациях, выполняющих гравиметрические съемки любого масштаба.

3. В разработке вычислительной схемы, обеспечивающий высокую точность и скорость вычислений гравитационного эффекта сферического параллелепипеда, которая может использоваться при решении прямых и обратных задач гравиразведки в рамках сферической модели Земли.

4. Оба примера, приведенных в главе 4, важны с практической точки зрения.

Обоснованность основных положений диссертации. В процессе проведения исследований, а также при изложении полученных результатов диссертант опирался на известные положения и сведения из прикладной геофизики, геологии, математики, вычислительной математики, физики и программирования. Выполнен всесторонний анализ проблемы редуцирования результатов полевых гравиметрических наблюдений и применен широкий спектр аналитических, теоретических и экспериментальных исследований. Теоретические предпосылки, положенные в основу работы и программно-алгоритмические разработки, привели к созданию новой компьютерной технологии редуцирования полевых данных высокоточной гравиметрической съемки, учитывающей близкую к реальной форму Земли. Результаты исследований Хохловой В.В. позволяют повысить качество обработки первичной информации, повысить точность построения гравиметрических карт в редукции Буге и цифровых моделей поля, что создает предпосылки для обнаружения слабоконтрастных и глубокозалегающих аномалиеобразующих объектов методом гравиразведки.

Все основные представленные в диссертации результаты получены лично автором, выполнившим анализ и обобщение информации по теме исследований, разработку алгоритмов и программ, ряд вычислительных экспериментов. Диссертант принимала участие в полевых гравиразведочных работах, проводила полный цикл обработки материалов съемки.

Помимо указанных выше в тексте отзыва, имеется ещё ряд замечаний по диссертации.

1. В разделе 3.2. диссертационной работы написано, что в статье Мартышко П.С. и др. «О решении прямой задачи гравиметрии в криволинейных и декартовых координатах: эллипсоид Красовского и “плоская” модель», опубликованной в журнале «Физика Земли», № 4, 2018 г, осуществляется аппроксимация тессероида сферическими треугольниками. В этой статье авторами произведено представление моделируемых геоплотностных границ многогранниками с последующим суммированием гравитационных эффектов. Сами эффекты вычисляются с помощью полученного аналитического выражения, без использования формул численного интегрирования. Это выражение приведено в тексте диссертации под номером (3.70).

2. В разделе 3.5. приводится сопоставление решений прямой задачи гравиразведки для сферического параллелепипеда на поверхности сферической Земли с радиусом 6371 км и сферы Каврайского. Рис 3.14 иллюстрирует заметное различие полученных результатов, которое в евклидовой метрике составляет около 14.5 мГал. Но это еще не говорит о близости сферы

Каврайского к эллипсоиду вращения при вычислении радиальной и нормальной производных гравитационного потенциала. Для этого необходимо провести сравнение решений прямой задачи именно для указанных моделей Земли.

3. Глава 3 диссертации носит название «Компьютерная система обработки результатов полевых гравиметрических наблюдений, учитывающая реальную форму Земли». Реальной формой Земли является геоид, а в данном случае речь идет о сферообразной модели.

4. Вычисление аномалий Буге при анализе временных вариаций гравитационного поля на Верхне-Камском месторождении калийных солей представляется не обязательной операцией, т.к. для контроля состояния горного массива используются аномалии силы тяжести, представляющие собой разность наблюденных значений гравитационного поля в разные периоды времени. Все неизменные составляющие поля при этом автоматически устраняются.

5. Следует отметить погрешности оформления работы, например, ряд таблиц и заголовки к ним, а также рисунков и подрисуночных подписей, располагаются на разных страницах текста диссертации. Заметим также несколько вольное обращение с терминами фигура Земли и геоид в разделе 3.5.

Перечисленные выше замечания не умаляют достоинств рассматриваемой диссертации.

Общая оценка диссертационной работы. Диссертация Хохловой В.В. представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, в которой решена актуальная задача совершенствования обработки результатов полевых гравиметрических наблюдений на основе вычислительных процедур, использующих сферическую модель Земли. Увеличение точности определения аномалий силы тяжести в редукции Буге за счет отказа от модели плоской Земли способствует повышению информативности гравиметрической съемки. Диссертационная работа в целом полностью отвечает формуле специальности 1.6.9 и п.п. 14–17 паспорта специальности.

Результаты исследований можно классифицировать как научное достижение в области прикладной геофизики, которое может использоваться при решении широкого круга геологических задач с целью воспроизводства минерально-сырьевой базы, поиска полезных ископаемых, а также для обеспечения условий и требований рационального недропользования.

Все три сформулированные диссертантом защищаемые положения полностью раскрыты в тексте работы. Содержание автореферата отвечает содержанию диссертации. Следует отметить четкий и лаконичный стиль изложения материала и высокое качество рисунков в текстах диссертации и автореферата.

Автореферат и 37 опубликованных работ, из которых 10 – в журналах, включенных ВАК в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК отражают основное содержание диссертационной работы. Также имеется результат интеллектуальной деятельности – свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВИ ФИПС (Роспатент) №2019613387 от 15.03.2019 г. Основные результаты исследований представлялись в виде докладов на ряде региональных, всероссийских и международных научных конференций.

По своему содержанию, научной новизне и практической ценности полученных результатов диссертационная работа «Разработка методики редуцирования данных высокоточной гравиразведки с учетом сферичности Земли» удовлетворяет требованиям, указанным в Постановлении Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 "О порядке присуждения ученых степеней" (с изменениями и дополнениями, ред. от 26.01.2023), а ее автор, Хохлова Валерия Васильевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности по специальности 1.6.9 – Геофизика.

Отзыв подготовлен на основании обсуждения диссертационной работы на семинаре лабораторий 202 и 502 ИФЗ РАН (протокол №3 от 01 марта 2023 г.).

Заведующий лабораторией 502

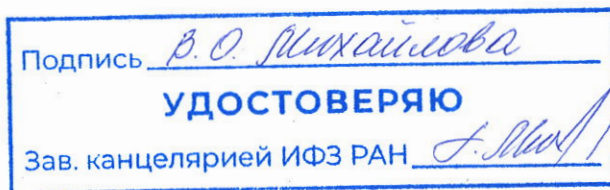
Комплексной геодинамической интерпретации
наземных и спутниковых данных ИФЗ РАН
член-корреспондент РАН, доктор физ.-мат. наук



В.О. Михайлов

Михайлов Валентин Олегович, доктор физико-математических наук по специальности 25.00.10 - Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Тел: (499) 254 95 77 mikh@ifz.ru



02.03.2023

