

На правах рукописи

Голдобин Денис Николаевич



Разработка методики комплексного определения  
характеристик гравитационного поля  
по данным глобальных моделей геопотенциала

25.00.32 – Геодезия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Новосибирск – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ).

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент Канушин Вадим Федорович.

Официальные оппоненты:

Непоклонов Виктор Борисович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии», профессор кафедры высшей геодезии;

Ардюков Дмитрий Геннадьевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник лаборатории физических проблем геофизики.

Ведущая организация – Акционерное общество «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья» (г. Новосибирск).

Защита состоится 24 декабря 2019 г. в 12-00 на заседании диссертационного совета Д 212.251.02 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ауд. 402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»: <https://sgugit.ru/science-and-innovations/dissertation-councils/dissertations/goldobin-denis-nikolaevich/>

Автореферат разослан 30 октября 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Аврунев Евгений Ильич

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 21.10.2019. Формат 60 × 84 1/16.

Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 153.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ  
630108, Новосибирск, Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ  
630108, Новосибирск, Плахотного, 8.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность темы исследования.* Определение физической поверхности и гравитационного поля Земли в единой системе координат составляет основную задачу геодезии, для решения которой нужны глобальные гравиметрические данные. В связи с быстро развивающимися технологиями и методами изучения окружающего пространства для решения научных и практических задач в различных отраслях знаний, включая науки о Земле, исследование гравитационного поля Земли (ГПЗ), изучение свойств ГПЗ является актуальной задачей. Результаты таких исследований лежат в основе программ запусков искусственных спутников Земли и развития теорий их движения, используются при разработке космических программ, моделировании геодинамических процессов внутри Земли, исследовании природных ресурсов, а также в океанографии, оборонной отрасли страны, авиационной и морской навигации.

Использование искусственных спутников Земли значительно расширило круг задач физической геодезии. В последние десятилетия появились высокостепенные глобальные модели геопотенциала. Это стало возможно благодаря внедрению новых методов и способов измерений. С одной стороны, в этот период внедрялись различные методы космической геодезии по изучению ГПЗ – такие, как спутниковая альтиметрия, системы «спутник – спутник» (SST-метод, проекты CHAMP, GRACE и др.), спутниковая градиентометрия (SGG-метод, проекты «Аристотель», GOCE и др.), что позволило надежно определять гармонические коэффициенты геопотенциала высокой степени. С другой стороны, в это же время значительно повысилась точность спутниковых и наземных гравиметрических измерений.

В результате были созданы высокостепенные глобальные модели геопотенциала высокого разрешения и точности, параметрами которых являются гармонические коэффициенты разложения в ряд по сферическим функциям. Такие модели применяются в различных областях науки и техники, в том числе

в качестве основы для учета неоднородностей ГПЗ в задачах инженерной геодезии. Глобальные модели геопотенциала, описывающие гравитационное поле Земли в целом, обеспечивают вычисление таких его характеристик, как высоты квазигеоида, отклонения отвесной линии, аномалии силы тяжести, а также компонент тензора силы тяжести, кривизны уровенных поверхностей и силовых линий ГПЗ в любой точке земного шара. Модели геопотенциала могут быть использованы в качестве основы при картографировании и районировании характеристик ГПЗ, создании цифровых моделей этих характеристик для решения прикладных задач геодезии и геологии для региональных геолого-геофизических исследований.

На современном этапе более строго ставится задача изучения структуры гравитационного поля. Детальное изучение аномального гравитационного поля позволяет исследовать и моделировать силы, являющиеся причинами различных геодинамических процессов, повышает возможности поиска и разведки месторождений полезных ископаемых методами гравиметрии, а также коррекции параметров бортовых инерциальных навигационных систем летательных аппаратов.

Высокоточное моделирование характеристик гравитационного поля Земли необходимо для построения национальной координатной системы отсчета и ее связи с глобальной координатной основой, а также для установления единой системы высот. В настоящее время цифровые модели высот квазигеоида отнесены к отдельному блоку системы геодезического обеспечения, отвечающему за распространение спутниковых методов координатных определений на большинство видов работ топографо-геодезического производства. С помощью высот квазигеоида осуществляется связь между геодезическими высотами в геометрической пространственной системе координат и нормальными высотами в гравитационном поле. Кроме определения высот квазигеоида, актуальна задача определения отклонений отвесной линии, характеризующих отступление действительного гравитационного поля Земли от нормального. Составляющие отклонения отвесной линии используются при решении редуционных задач высшей

геодезии, установлении связи между астрономическими и геодезическими координатами, а также в инерциальной навигации.

Решение задачи получения детальных высокоточных математических и цифровых моделей характеристик гравитационного поля требует разработки методики комплексного определения характеристик ГПЗ.

Таким образом, разработка методики комплексного определения характеристик гравитационного поля Земли по данным глобальных моделей геопотенциала является актуальной задачей.

*Степень разработанности темы.* Решению проблемы определения параметров глобального ГПЗ, его математического и цифрового моделирования посвятили свои труды многие отечественные и зарубежные ученые. Концептуальные и теоретические разработки выполнили ученые: Молоденский М. С., Юркина М. И., Еремеев В. Ф., Бровар В. В., Бровар Б. В., Шимбирев Б. П., Юзефович А. П., Пеллинен Л. П., Жонголович И. Д., Бузук В. В., Грушинский Н. П., Машимов М. М., Мещеряков Г. А., Марченко А. Н., Петровская М. С., Холшевников К. В., Нейман Ю. М., Бывшев В. А., Остач О. М., Мазурова Е. М., Непоклонов В. Б., Конешов В. Н., Рапп Р., Вейс Г., Кенлейн В., Чернинг С., Краруп Т., Шварц К., Хейсканен В., Мориц Г., Каула У. М., Бьерхаммар А., Бурша М., Pavlis E. и др. Современные глобальные модели геопотенциала создавались под руководством и при участии ученых: Демьянов Г. В., Liang W., Xu X., Pail R., Fecher T., Ries J., Gilardoni M., Förste C., Bruinsma S. L., Tapley B. D., Pavlis N. K. и др.

Благодаря результатам работ этих исследователей в настоящее время существует фундаментальная теоретическая база физической геодезии, получены уникальные модели геопотенциала, внесен большой вклад в развитие космической геодезии, навигации и ГНСС-технологий. Дальнейшее развитие научного направления идет в области уточнения теоретических положений, повышения точности измерений и моделирования, оперативности получаемой информации.

*Цель и задачи исследования.* Целью исследования является разработка комплексной методики определения характеристик гравитационного поля по дан-

ным глобальных моделей геопотенциала на физической поверхности Земли с оценкой точности по независимым наземным данным.

*Задачи исследования.* Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие задачи:

– выполнить анализ теоретических основ существующих методов моделирования ГПЗ. Исследовать и оценить погрешности аппроксимации для 15 моделей геопотенциала;

– разработать алгоритмы оценки разрешающей способности и точности глобальных моделей геопотенциала на основе спектрального анализа;

– разработать методику и алгоритмы комплексного определения характеристик гравитационного поля на физической поверхности Земли с использованием глобальных моделей геопотенциала;

– разработать методику и алгоритм учета гравитационного влияния топографических масс для уточнения величин уклонения отвесной линии в горной местности, полученных по данным глобальных моделей геопотенциала;

– разработать комплекс компьютерных программ для определения характеристик ГПЗ по данным глобальных моделей геопотенциала. С помощью разработанного комплекса построить цифровые модели характеристик ГПЗ на территорию Западной Сибири;

– выполнить исследование методики комплексного определения характеристик ГПЗ и произвести оценку точности по независимым наземным данным.

*Объект и предмет исследования.* Объектом исследования является гравитационное поле Земли, представляемое глобальными моделями геопотенциала.

*Предметом* исследования является методика комплексного определения характеристик гравитационного поля по данным глобальных моделей геопотенциала.

*Научная новизна* диссертационного исследования заключается в следующем:

– разработана методика комплексного определения характеристик ГПЗ в заданной точке пространства по набору гармонических коэффициентов гло-

бальных моделей геопотенциала, в которой для выбора модели геопотенциала выполняется оценка ее разрешающей способности и точности аппроксимации. В отличие от существующих математических моделей, при получении производных геопотенциала силы тяжести центробежный потенциал учитывается как отдельный параметр, что значительно упрощает получение самих производных геопотенциала на поверхности Земли, позволяет выполнять оценку их точности, сокращает вычислительные затраты, а также повышает универсальность методики, позволяя применять ее в любой заданной точке пространства;

– на основе построения трехмерной модели топографических масс и вычисления уклонения отвесной линии от каждого элемента модели разработана методика учета гравитационного влияния этих масс на уклонения отвесной линии в ближней зоне в горных районах. Особенностью методики является автоматическое определение радиуса учитываемой области при заданной плотности горных пород, что позволяет повысить точность определения модельных уклонений отвесной линии в горах;

– впервые выполнены исследования глобальных моделей геопотенциала на территории Западной Сибири с целью оценки возможности их применения для создания региональных цифровых моделей характеристик ГПЗ на основе разработанной методики комплексного определения характеристик гравитационного поля по данным глобальных моделей геопотенциала.

*Теоретическая и практическая значимость работы.*

*Теоретическая значимость* исследования заключается в разработке теоретических основ алгоритмов синтеза потенциала силы тяжести и его производных (первого и второго порядка) по набору нормированных гармонических коэффициентов геопотенциала в сферической (глобальной) и прямоугольной (локальной) системах координат, обеспечивающих комплексное определение характеристик ГПЗ в заданной точке пространства.

Разработан алгоритм учета гравитационного влияния топографических масс на уклонения отвесной линии в ближней зоне в горных районах, позво-

ляющий определять радиус учитываемой области при заданной плотности горных пород, что обеспечило повышение точности определения уклонов отвесной линии.

*Практическая значимость* работы состоит в оперативности получения необходимой информации о гравитационном поле в цифровом виде в любой точке земного шара и околоземного пространства с оценкой точности. Эта информация, совместно с геодезическими данными, может использоваться для решения задач, связанных с изучением строения, фигуры и размеров Земли, в реальном времени, а также для создания глобальных и региональных цифровых моделей характеристик ГПЗ в трехмерном пространстве. Разработан комплекс программ, реализующих процесс комплексного определения всех характеристик ГПЗ по данным современных глобальных моделей геопотенциала. Разработанный алгоритм учета гравитационного влияния топографических масс позволяет повысить точность комплексного определения характеристик ГПЗ по глобальным моделям геопотенциала в горных районах.

*Методология и методы исследования.* В качестве методологической основы научного исследования использованы методы математического моделирования и методы решения задач физической геодезии, в том числе применен метод гармонического анализа и синтеза поля по системе сферических и шаровых функций с помощью ряда Фурье. В качестве математической основы для решения поставленных задач применены методы вычислительной математики, математического анализа, математической статистики и теории вероятности. Эмпирической основой служили гармонические коэффициенты глобальных моделей геопотенциала и результаты независимых наземных измерений характеристик гравитационного поля.

*Положения, выносимые на защиту:*

– методика и алгоритмы комплексного определения характеристик гравитационного поля в заданной точке пространства по данным глобальных моделей геопотенциала;

– методика и алгоритмы учета влияния топографических масс на уклонения отвесной линии в ближней зоне в горных районах на основе трехмерного моделирования рельефа.

*Соответствие диссертации паспорту научной специальности.*

Диссертация соответствует областям исследования: 1 – Определение параметров земного эллипсоида, геоида и гравитационного поля Земли, изменение их в пространстве и во времени; 11 – Теория и практика математической обработки результатов геодезических измерений и информационное обеспечение геодезических работ. Автоматизированные технологии создания цифровых трехмерных моделей технологических объектов, процессов и явлений по геодезическим данным паспорта научной специальности 25.00.32 – Геодезия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки России.

*Степень достоверности и апробация результатов исследований.* Результаты выполненных исследований представлены:

– на международных научных конгрессах «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014» (18–22 апреля 2014 г., Новосибирск) и «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2018» (25–27 апреля 2018 г., Новосибирск);

– Генеральной ассамблее Европейского геофизического союза «EGU-2015» (12–17 апреля 2015 г., Вена, Австрия);

– Генеральной ассамблее Международного Союза Геодезии и Геофизики «IUGG-2015» (22 июня – 2 июля 2015 г., Прага, Чехия);

– Национальной научно-практической конференции «Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и информационное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения» (7–8 декабря 2017 г., Новосибирск).

Исследования выполнены в рамках гранта Российского научного фонда 14-27-00068: «Разработка фундаментальной теории, методов и алгоритмов координатно-временного и навигационного обеспечения для решения приоритетных государственных задач геодезии и дистанционного зондирования с учетом

классических и релятивистских эффектов гравитационного поля Земли и других массивных тел Солнечной системы».

Результаты исследований внедрены в научную деятельность Федерального научно-технического центра геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных и в учебный процесс Сибирского государственного университета геосистем и технологий (кафедра космической и физической геодезии) при обучении бакалавров направления подготовки 21.03.03 Геодезия и дистанционное зондирование, профиль «Геодезия».

*Публикации по теме диссертации.* Результаты исследований представлены в 17 научных работах, 4 из которых опубликованы в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, 5 работ опубликованы в изданиях, входящих в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus.

*Структура диссертации.* Общий объем диссертации составляет 201 страницу машинописного текста. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы, включающего 134 наименования, содержит 19 таблиц, 49 рисунков и 17 приложений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Во введении* обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, перечислены методы исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту, сведения о степени достоверности и апробации результатов исследования.

*В первом разделе* выполнен аналитический обзор и анализ методов численно-аналитического и аналитического представления геопотенциала. По ре-

зультатам обзора выявлено, что наиболее перспективным для описания низкочастотных (планетарных) и среднечастотных (региональных) особенностей геопотенциала является традиционное представление гравитационного потенциала силы тяжести разложением в ряд Фурье по системе сферических и шаровых функций в сферических геоцентрических координатах.

Рассмотрено аналитическое представление потенциала силы тяжести  $W(\varphi, \lambda, r)$  разложением в ряд Фурье по системе сферических и шаровых функций, получаемого путем суммирования гармонических коэффициентов потенциала притяжения с учетом центробежного потенциала.

*Во втором разделе рассмотрены современные методы изучения глобального гравитационного поля, теоретические основы получения гармонических коэффициентов для построения глобальных моделей геопотенциала гравиметрическим методом и с использованием методов космической геодезии. Исследованы существующие современные модели геопотенциала, представленные набором гармонических коэффициентов. Выполнена оценка разрешающей способности и точности современных комбинированных глобальных моделей геопотенциала на основе спектрального анализа и оценка погрешности аппроксимации геопотенциала и его производных, обусловленной ограничением ряда Фурье.*

Анализ методов космической геодезии и гравиметрического метода получения гармонических коэффициентов для построения глобальных моделей геопотенциала показал, что низкочастотные и среднечастотные особенности геопотенциала наиболее точно представляются методами космической геодезии, а высокочастотные (локальные) – наземными гравиметрическими данными. Это свидетельствует о необходимости комбинирования спутниковых и наземных гравиметрических данных для получения гармонических коэффициентов глобальной модели геопотенциала.

Для исследования было выбрано 15 комбинированных глобальных моделей геопотенциала с максимальной степенью разложения от 360 до 2 190, соз-

данных в 2008–2018 гг. рядом авторов (Демьянов Г. В., Liang W., Xu X., Pail R., Fecher T., Ries J., Gilardoni M., Förste C., Bruinsma S. L., Tapley B. D., Pavlis N. K.) и опубликованных в открытых источниках. При создании моделей использовались следующие исходные данные: альтиметрические и наземные гравиметрические данные, результаты космических гравиметрических миссий CHAMP, GRACE, GOCE.

Для исследования указанных глобальных моделей разработан алгоритм оценки разрешающей способности и точности современных моделей геопотенциала на основе спектрального анализа.

По результатам спектрального анализа получены оценки разрешающей способности и точности исследуемых глобальных моделей геопотенциала, которые приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Спектральные характеристики исследуемых моделей ГПЗ

Модель	Максимальная степень модели $N_0$	$\Delta$ (км) при $N_0$	Степень $n$ при $d_n = 1$	$\Delta$ (км) при $dn = 1$	Степень $n$ при $\delta\zeta < 1$ см	$\Delta$ (км) при $\delta\zeta < 1$ см	Степень $n$ при $\delta\Delta g < 1$ мГал	$\Delta$ (км) при $\delta\Delta g < 1$ мГал
1 EIGEN-6C4	2190	9	2170	9	110	177	574	34
2 SGG-UGM-1	2159	9	1702	12	110	177	571	35
3 EGM2008	2190	9	1845	11	110	177	571	34
4 GECO	2190	9	1787	11	110	177	571	34
5 EIGEN-6c	1420	14	–	–	111	175	530	37
6 EIGEN-6c2	1949	10	–	–	110	177	567	34
7 EIGEN-6c3stat	1949	10	–	–	110	177	567	34
8 XGM2016	719	28	–	–	110	177	411	49
9 GOCO05c	720	28	506	39	110	177	411	49
10 GGM05C	360	56	–	–	109	183	271	74
11 GAO2012	360	56	–	–	107	187	248	81
12 GIF48	360	54	–	–	109	178	271	72
13 EIGEN -51c	359	54	–	–	109	178	283	69
14 EIGEN -5c	360	54	–	–	106	183	254	77
15 GGM03C	360	54	–	–	106	183	265	75

Из таблицы 1 видно, что для всех рассмотренных моделей значение высоты квазигеоида с погрешностью ( $\delta\zeta$ ) не более 1 см можно определить при учете гармоник степени  $N$  от 106 до 110. Значения аномалий силы тяжести с погреш-

ностью ( $\delta\Delta g$ ) не более 1 мГал можно получить при учете гармоник от 248-й до 574-й степени. Относительная ошибка гармонических коэффициентов геопотенциала ( $d_n$ ) достигает 1 для ультровысокостепенных моделей при учете гармоник от 1 702 до 2 170, для остальных моделей относительная ошибка составляет менее 1 на всем диапазоне гармоник, за исключением модели GOCO05c.

Из всех исследованных моделей геопотенциала наилучшей разрешающей способностью обладает ультравысокостепенная модель EIGEN-6C4, имеющая пространственное разрешение ( $\Delta$ ), равное 9 км, при степени разложения 2 170.

Результаты анализа позволяют сделать следующий вывод: из всех исследованных моделей по спектральным характеристикам наилучший результат показала модель EIGEN-6C4. Эта модель была принята в качестве базовой для дальнейших исследований в диссертации.

*В третьем разделе* выполнено теоретическое обоснование методики комплексного определения характеристик гравитационного поля Земли по набору гармонических коэффициентов глобальных моделей геопотенциала. Разработаны математические модели и алгоритмы для вычисления потенциала силы тяжести, а также его производных до второго порядка включительно.

В качестве математических моделей потенциала силы тяжести и его производных использованы ограниченные ряды Фурье по системе сферических и шаровых функций. На их основе разработаны алгоритмы для вычисления потенциала силы тяжести  $W$ , ускорения силы тяжести  $g$  в точках земной поверхности с координатами  $\varphi$ ,  $\lambda$ ,  $r$ , а также характеристик аномального гравитационного поля Земли – высот квазигеоида  $\zeta$ , «смешанных» и «чистых» аномалий силы тяжести  $\Delta g$  и составляющих уклонения отвесной линии  $\eta$ ,  $\xi$  в сферической системе координат. Эти же математические модели позволяют определять производные первого и второго порядка от потенциала силы притяжения.

Для описания геометрии локального поля силы тяжести на ограниченных участках земной поверхности получены выражения для частных производных от потенциала силы тяжести вплоть до второго порядка по соответствующим

координатам в прямоугольной топоцентрической системе координат, которая связана с определенной точкой  $P$  в поле силы тяжести  $\vec{g}$ : вертикальной составляющей силы тяжести  $W_z$ , горизонтальных компонент вектора силы тяжести  $W_x$ ,  $W_y$  и компонент тензора силы тяжести:  $W_{zz}$  – вертикального градиента силы тяжести,  $W_{xx}$  и  $W_{yy}$  – градиентов компонент вектора силы тяжести и  $W_{xy}$ ,  $W_{xz}$ ,  $W_{yx}$ ,  $W_{yz}$ ,  $W_{zx}$ ,  $W_{zy}$  – горизонтальных градиентов силы тяжести, которые устанавливают связь поля силы тяжести и геометрии пространства.

Частные производные первого порядка от потенциала силы тяжести по соответствующим координатам в топоцентрической прямоугольной системе координат определены на основе первых производных потенциала силы тяжести в сферических координатах.

Частные производных второго порядка от потенциала силы тяжести по соответствующим координатам в топоцентрической прямоугольной системе координат определены на основе первых и вторых производных потенциала силы тяжести в сферических координатах.

На основе полученных частных производных первого и второго порядка от потенциала силы тяжести по соответствующим координатам в топоцентрической прямоугольной системе координат разработаны алгоритмы математического моделирования радиусов средней и гауссовой кривизны уровенной поверхности и силовой линии ГПЗ по известным соотношениям аналитической дифференциальной геометрии.

По полученным математическим моделям определения характеристик ГПЗ разработаны алгоритмы, реализованные в программном комплексе (свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2018665784, № 2018666260).

Выполненное исследование точности определения уклонов отвесной линии показало, что классические формулы нулевого приближения обеспечивают достаточную для решения практических задач геодезии точность только

для пунктов, расположенных на равнинной местности или на поверхности океана. Однако в холмистых и горных районах эти формулы дают более грубый результат. Например, отклонения отвеса по формулам нулевого приближения в равнинных районах определяются со средней квадратической погрешностью  $0,7''$ , тогда как в горах – с погрешностью  $1,5''$ .

Для повышения точности определения составляющих отклонения отвесной линии в горной местности разработана методика учета гравитационного влияния топографических масс. В основе данной методики лежит построение в окрестности результирующей точки трехмерной модели топографических масс. Эти массы аппроксимируются набором элементарных параллелепипедов, аппликаты которых задаются цифровой моделью местности. Для каждого параллелепипеда задается плотность, соответствующая геологическим данным, и вы-

числяются первые производные потенциала притяжения  $\frac{\partial V_{ij}}{\partial x}$  и  $\frac{\partial V_{ij}}{\partial y}$ , суммирование которых определяет гравитационное влияние топографических масс на составляющие отклонения отвесной линии в плоскости первого вертикала и в плоскости меридиана. Поправка за топографические массы вычисляется в результирующей точке  $P$  по следующим формулам:

$$\eta_P'' = \frac{\rho''}{\gamma_T} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^L \left( \frac{\partial V_{ij}}{\partial x} \right); \quad (1)$$

$$\xi_P'' = \frac{\rho''}{\gamma_T} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^L \left( \frac{\partial V_{ij}}{\partial y} \right), \quad (2)$$

где  $\eta_P''$  и  $\xi_P''$  – влияние топографических масс на отклонение отвесной линии в результирующей точке в плоскости первого вертикала и меридиана соответственно;  $\gamma_T$  – нормальное значение силы тяжести в результирующей точке;  $V_{ij}$  – потенциал притяжения от  $i, j$ -го элемента модели;  $K$  и  $L$  – количество учи-

тываемых зон вдоль меридиана и первого вертикала соответственно. Алгоритм построен таким образом, чтобы предел значений  $K$  и  $L$ , характеризующих радиус учитываемой области, определялся автоматически.

В результате применения методики учета гравитационного влияния топографических масс стандартные отклонения между составляющими уклонами отвесной линии в горных районах Западной Сибири, полученными с помощью моделирования рядом Фурье по системе сферических функций с учетом гармоник модели геопотенциала EIGEN-6C4 до степени 2190, и астрономо-геодезическими уклонами отвесной линии, полученными из измерений на пунктах Лапласа, уменьшились в 2 раза.

На основе формул (1), (2) разработаны алгоритмы, для реализации которых созданы компьютерные программы.

*В четвертом разделе* приведено описание программного комплекса и особенностей программной реализации разработанных алгоритмов определения всех характеристик гравитационного поля.

С помощью разработанного программного комплекса выполнены вычисления характеристик ГПЗ на территории Западной Сибири и в ряде других регионов земного шара, построены цифровые модели и картосхемы характеристик ГПЗ.

Особенностью созданного программного комплекса является оригинальная реализация алгоритмов суммирования рядов и вычисления производных первого и второго порядка от нормированных присоединенных полиномов Лежандра, которая позволила добиться высокой скорости вычислений в реальном времени без ограничения количества учитываемых гармоник.

При получении характеристик гравитационного поля использован весь набор (до 2190-й степени) гармонических коэффициентов глобальной модели геопотенциала EIGEN-6C4.

С помощью разработанного программного комплекса на территории Новосибирской области выполнены вычисления аномалий силы тяжести в 26 точках,

в которых известны аномалии силы тяжести в свободном воздухе из наземных гравиметрических измерений, и высот квазигеоида в 190 точках ГНСС-нивелирования. Средние квадратические погрешности, вычисленные по разностям между независимыми наземными и модельными значениями аномалий силы тяжести и высот квазигеоида, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Точность определения аномалий силы тяжести и высот квазигеоида

Характеристика ГПЗ		Средняя квадратическая погрешность
Аномалии силы тяжести в свободном воздухе	$\delta\Delta g$ , мГал	3,4
Высоты квазигеоида	$\delta\zeta$ , см	7,7

Аномалии силы тяжести в свободном воздухе, полученные с погрешностью 3,4 мГал, могут быть использованы в качестве основы для составления карт аномалий силы тяжести масштабов 1 : 1 000 000–1 : 500 000 с целью регионального геологического картографирования.

Сравнительная оценка вычисленных (с помощью разработанного программного комплекса) составляющих уклонений отвесной линии с известными астрономо-геодезическими уклонениями отвесной линии выполнена в 320 точках, расположенных на территории Западной Сибири, Урала и Алтая. Для уточнения значений составляющих уклонений отвесной линии в горных районах (с высотами точек более 500 м) применена разработанная и реализованная в программном комплексе методика учета гравитационного эффекта топографических масс в окрестности точки. Эта методика позволила повысить точность вычисления составляющих уклонения отвесной линии в горной местности в два раза.

В таблице 3 приведены средние квадратические погрешности, вычисленные по разностям между независимыми наземными и вычисленными (с помощью разработанного программного комплекса) значениями составляющих уклонений отвесной линии.

Таблица 3 – Результаты сравнения вычисленных уклонений отвесной линии с наземными данными

Высоты точек местности, м	Составляющие уклонения отвесной линии	Средняя квадратическая погрешность	
0–500	$\Delta\eta$	0,76"	
	$\Delta\xi$	0,83"	
Более 500		Без учета гравитационного влияния топографических масс	С учетом гравитационного влияния топографических масс
	$\Delta\eta$	1,51"	0,49"
	$\Delta\xi$	1,86"	0,74"

Точность полученных по разработанной методике уклонений отвесных линий достаточна для решения широкого круга геодезических и навигационных задач.

В 10 точках на поверхности Земли выполнено сравнение вычисленных вертикальных градиентов силы тяжести по данным модели EIGEN-6C4 и измеренных. В этих же точках получены отличия измеренных вертикальных градиентов силы тяжести от нормального. В таблице 4 приведены результаты этого сравнения.

Таблица 4 – Точность определения вертикального градиента силы тяжести

Метод определения вертикальных градиентов силы тяжести	Средняя квадратическая погрешность определения вертикальных градиентов силы тяжести, Э
С использованием модели геопотенциала EIGEN 6-C4	260,2
С использованием нормального градиента 3 086 Э	360

Результаты сравнения показали, что применение вертикального градиента, вычисленного с помощью разработанного программного комплекса, повышает точность редуцирования силы тяжести в 2–3 раза.

Для создания цифровых моделей гравитационного поля на территории Западной Сибири выполнены вычисления его характеристик в 168 113 точках (узлах) регулярной сетки с шагом 5", что составляет на местности около 9 км.

В результате на территорию Западной Сибири впервые получены цифровые модели ГПЗ и построены картосхемы следующих характеристик гравитационного поля:

- гравитационного потенциала силы тяжести;
- гравитационного потенциала тяготения;
- вертикальной и горизонтальной составляющих компонент вектора силы тяжести;
- вертикальной и горизонтальной составляющих компонент вектора тяготения;
- вертикального и горизонтального градиентов силы тяжести, а также градиентов в плоскостях меридиана, первого вертикала и горизонтальной плоскости в точке вычисления;
- вертикального и горизонтального градиентов тяготения, а также градиентов в плоскостях меридиана, первого вертикала и горизонтальной плоскости в точке вычисления;
- радиусов средней кривизны уровенной поверхности в точке вычисления;
- радиусов гауссовой кривизны уровенной поверхности в точке вычисления;
- радиусов кривизны силовой линии гравитационного поля в плоскости меридиана в точке вычисления;
- радиусов кривизны силовой линии гравитационного поля в плоскости первого вертикала в точке вычисления;
- высот квазигеоида;
- аномалий силы тяжести в свободном воздухе;
- уклонений отвесной линии в плоскости меридиана;
- уклонений отвесной линии в плоскости первого вертикала.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги диссертационного исследования заключаются в следующем:

– выполнен анализ существующих методов моделирования геопотенциала, в результате которого выявлено, что при описании низкочастотных (планетарных) и среднечастотных (региональных) особенностей ГПЗ наилучший результат дает традиционное представление гравитационного потенциала разложением в ряд шаровых функций в сферических геоцентрических координатах (широта, долгота, геоцентрический радиус-вектор);

– разработан алгоритм оценки разрешающей способности и точности современных глобальных моделей геопотенциала на основе спектрального анализа, с помощью которого выполнена оценка погрешности аппроксимации для 15 моделей геопотенциала, показавшая, что наилучший результат обеспечивает модель геопотенциала EIGEN-6C4;

– разработаны методика и алгоритмы определения характеристик ГПЗ на физической поверхности Земли (потенциала силы тяжести, ускорения силы тяжести и ее аномалий, высот квазигеоида, составляющих уклонения отвесной линии, радиусов средней и гауссовой кривизны уровенной поверхности и силовой линии гравитационного поля, горизонтальных и вертикальных градиентов силы тяжести) с использованием глобальных моделей геопотенциала на основе математических моделей первых производных потенциала силы тяжести и всех компонент тензора силы тяжести в трехмерном пространстве, полученных путем дифференцирования потенциала силы тяжести в сферических координатах, представленного разложением в ряд Фурье по системе сферических и шаровых функций;

– разработаны методика и алгоритм учета гравитационного влияния топографических масс на уклонение отвесной линии в ближней зоне в горных районах, в которых радиус учитываемой области автоматически определяется по заданной плотности горных пород на основании геологических данных. В ре-

зультате применения разработанной методики в горных районах Западной Сибири стандартные отклонения между составляющими уклонения отвеса, полученными с помощью моделирования рядом Фурье по системе сферических функций с учетом гармоник модели геопотенциала EIGEN-6C4 до степени 2190, и астрономо-геодезическими уклонениями отвеса, полученными из измерений на пунктах Лапласа, уменьшились в 2 раза;

– разработан комплекс программ, реализующий весь процесс определения характеристик ГПЗ по данным современных глобальных моделей геопотенциала; впервые получены цифровые модели и построены картосхемы характеристик ГПЗ на территорию Западной Сибири;

– выполнено исследование методики комплексного определения характеристик ГПЗ и оценка точности полученных цифровых моделей характеристик ГПЗ (потенциала силы тяжести, ускорения силы тяжести и ее аномалий, высот квазигеоида, составляющих уклонения отвесной линии, радиусов средней и гауссовой кривизны уровенной поверхности и силовой линии гравитационного поля, горизонтальных и вертикальных градиентов силы тяжести) путем сравнения с независимыми наземными данными. Анализ результатов оценки точности показал возможность применения полученных цифровых моделей характеристик ГПЗ для решения широкого круга задач геодезии, геологии и навигации.

Таким образом, поставленная цель диссертационного исследования, направленная на разработку методики комплексного определения характеристик гравитационного поля по данным современных глобальных моделей геопотенциала, достигнута.

Методику комплексного определения характеристик ГПЗ рекомендуется использовать для решения задач, связанных с коррекцией инерциальных навигационных систем, развитием корреляционно-экстремальных систем навигации и наведения, развитием направления «Спутниковая гравиметрия», при проведении геолого-геофизических исследований.

Перспективы дальнейших исследований состоят в повышении точности определения характеристик ГПЗ на локальных участках земной поверхности и разработке динамических моделей характеристик ГПЗ для геофизического мониторинга территорий.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 К вопросу о необходимости учета неприливных изменений силы тяжести при деформационном мониторинге гидротехнических сооружений [Текст] / В. Ф. Канушин, И. Г. Ганагина, Н. С. Косарев, Д. Н. Голдобин // Изв. вузов. Строительство. – 2017. – № 11–12 (707–708). – С. 72–80.

2 Современные глобальные модели квазигеоида: точностные характеристики и разрешающая способность [Текст] / В. Ф. Канушин, И. Г. Ганагина, Д. Н. Голдобин, Е. М. Мазурова, Н. С. Косарев, А. М. Косарева // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 1. – С. 30–49.

3 Определение составляющих уклонения отвесной линии на территории Западной Сибири методом численного дифференцирования [Текст] / А. П. Карпик, В. Ф. Канушин, И. Г. Ганагина, Д. Н. Голдобин, Н. С. Косарев, А. М. Косарева // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 3. – С. 15–29.

4 Голдобин, Д. Н. Определение геометрической структуры гравитационного поля на территории Западной Сибири по данным современных глобальных моделей геопотенциала [Текст] / Д. Н. Голдобин // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 2. – С. 19–34.

5 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018666260 Geo\_ABSGRAV в реестре программ для ЭВМ [Текст] / Д. Н. Голдобин ; правообладатель Сиб. гос. ун-т геосистем и технологий (RU) ; дата поступления 26.11.2018; дата регистрации 13.12.2018.

6 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018665784 Geo\_PlaneGraviGrad в реестре программ для ЭВМ [Текст] / Д. Н. Голдобин ; правообладатель Сиб. гос. ун-т геосистем и технологий (RU) ; дата поступления 26.11.2018 ; дата регистрации 11.12.2018.

7 Analyzing spectral characteristics of the global earth gravity field models obtained from the CHAMP, GRACE and GOCE space missions [Text] / A. P. Karpik, V. F. Kanushin, I. G. Ganagina, D. N. Goldobin, E. M. Mazurova // Gyroscopy and Navigation. – 2015. – Vol. 6, № 2. – PP. 101–108.

8 The influence of regularization methods on the accuracy of modern global geopotential models [Text] / V. F. Kanushin, I. G. Ganagina, D. N. Goldobin, N. S. Kosarev, A. M. Kosareva // Gyroscopy and Navigation. – 2016. – Vol. 7, № 4. – PP. 337–342.

9 Development of the global geoid model based on the algorithm of one dimensional spherical Fourier transform [Text] / E. M. Mazurova, V. F. Kanushin, I. G. Ganagina, D. N. Goldobin, V. V. Bochkareva, N. S. Kosarev, A. M. Kosareva // Gyroscopy and Navigation. – 2016. – Vol. 7, № 3. – PP. 269–276.

10 Evaluation of recent earths global gravity field models with terrestrial gravity data [Text] / A. P. Karpik, V. F. Kanushin, I. G. Ganagina, D. N. Goldobin, N. S. Kosarev, A. M. Kosareva // Contributions to Geophysics and Geodesy. – 2016. – Vol. 46, № 1. – PP. 1–11.

11 Determining deflections of the vertical in the Western Siberia region: The results of comparison [Text] / N. S. Kosarev, V. F. Kanushin, V. I. Kaftan, I. G. Ganagina, D. N. Goldobin, G. N. Efimov // Gyroscopy and Navigation. – 2018. – Vol. 9, № 2. – PP. 124–130.

12 Исследования спектральных характеристик глобальных моделей гравитационного поля Земли, полученных по космическим миссиям CHAMP, GRACE и GOCE [Текст] / А. П. Карпик, В. Ф. Канушин, И. Г. Ганагина, Д. Н. Голдобин, Е. М. Мазурова // Гироскопия и навигация. – 2014. – № 4 (87). – С. 34–44.

13 Одномерное сферическое преобразование Фурье и его реализация для расчета глобальной модели квазигеоида в нулевом приближении теории Молоденского [Текст] / Д. Н. Голдобин, Е. М. Мазурова, В. Ф. Канушин, И. Г. Ганагина, Н. С. Косарев, А. М. Косарева // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 3 (31). – С. 45–52.

14 К вопросу влияния методов регуляризации на точность современных глобальных моделей геопотенциала [Текст] / В. Ф. Канушин, И. Г. Ганагина, Д. Н. Голдобин, Н. С. Косарев, А. М. Косарева // Гироскопия и навигация. – 2016. – Т. 24, № 2 (93). – С. 77–86.

15 О результатах сравнения определения уклонений отвесной линии на территории Западной Сибири [Текст] / Н. С. Косарев, В. Ф. Канушин, В. И. Кафтан, И. Г. Ганагина, Д. Н. Голдобин, Г. Н. Ефимов // Гироскопия и навигация. – 2017. – Т. 25, № 4 (99). – С. 72–83.

16 Шаповалова, А. И. Проблема редуцирования наблюдаемого значения ускорения силы тяжести [Текст] / А. И. Шаповалова, В. Ф. Канушин, Д. Н. Голдобин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Магистерская научная сессия «Первые шаги в науке» : сб. материалов (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – С. 270–276.

17 Определение допустимой погрешности планового положения пунктов гравиметрической съемки [Текст] / Д. Н. Голдобин, В. Ф. Канушин, И. Г. Ганагина, Н. С. Косарев, Н. Н. Федотова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – С. 146–153.