

На правах рукописи

Мареев Артем Владимирович



Совершенствование методики и алгоритмов  
определения полной топографической редукции силы тяжести  
по геодезическим данным

25.00.32 – Геодезия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Новосибирск – 2018

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

Научный руководитель – доктор технических наук, старший научный сотрудник Каленицкий Анатолий Иванович.

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;

Щербаков Владимир Васильевич, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения», заведующий кафедрой инженерной геодезии.

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

Защита состоится 29 ноября 2018 г. в 15.00 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»: <http://sgugit.ru/scienceand-innovations/dissertation-councils/dissertations/mareev-artem-vladimirovich>

Автореферат разослан 5 октября 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Аврунев Евгений Ильич

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 25.09.2018. Формат 60 × 84 1/16.

Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 144.

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

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

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность темы исследования.* Одной из важнейших современных научно-технических задач для обеспечения развития экономики и обороноспособности страны является разработка единой системы координатно-временного и навигационного обеспечения, предназначенной для определения геометрических и физических характеристик различных объектов на Земле и в околоземном пространстве. Фундаментальной составляющей координатно-временного навигационного обеспечения является государственная координатная основа, включающая геодезические сети (ФАГС, ВГС, СГС-1), нивелирные сети (I–IV классов) и гравиметрические сети (фундаментальная и I класса). Связующим звеном между компонентами государственной координатной основы является гравитационное поле Земли, без знания характеристик которого невозможно осуществить высокоточное определение координат и навигацию в пространстве сложного физического объекта, которым является планета Земля. Характеристики гравитационного поля определяются по данным гравиметрических и геодезических измерений путем сложного и многоступенчатого моделирования.

Наличие высокоточной модели гравитационного поля Земли позволяет расширить сферу применения спутниковой навигации и повысить эффективность геодезического производства за счет замены в ряде работ дорогостоящего геометрического нивелирования спутниковым, а также способствует решению многих научно-практических задач.

На решение задачи получения высокоточной модели гравитационного поля Земли направлены значительные усилия ученых и различные дорогостоящие проекты (Grace, GOCE, Lageos-1, Lageos-2, Гео-ИК), реализуемые в рамках государственных программ разных стран, а также масштабные аэрогравиметрические исследования и гравиметрические измерения на поверхности Земли.

Важное место в составе процедур моделирования гравитационного поля Земли занимает полное топографическое редуцирование аномалий силы тяже-

сти. Топографические массы, находящиеся в непосредственной близости от граничной поверхности, вносят значительный вклад в характер изменения аномалий. Однако и сильно отдаленные массы рельефа оказывают гравитационное влияние, которым нельзя пренебрегать при современном уровне точности измерений силы тяжести. Поэтому при обработке гравиметрических измерений необходимо выполнять полное топографическое редуцирование.

В процессе моделирования гравитационного поля Земли выполняется обработка больших массивов разнородной исходной гравиметрической информации, в состав которой входят как результаты новых измерений, так и данные архивных гравиметрических съемок. Для повышения качества моделирования, наряду с обработкой новых данных, требуется выполнять повторную обработку архивных измерений на основе непрерывно обновляющихся моделей рельефа. Также расчет поправок к аномалиям силы тяжести за рельеф может выполняться неоднократно с целью выбора оптимальных параметров топографического редуцирования. Эти обстоятельства приводят к увеличению трудоемкости процедуры вычисления топографической редукции. Поэтому разработка и исследование эффективных методик и алгоритмов определения полной топографической редукции силы тяжести является актуальной научной задачей.

*Степень разработанности темы.* Значительный вклад в развитие методов обработки гравиметрических измерений внесли ученые: Юркина М. И., Бровар В. В., Грушинский Н. П., Шимберев Б. П., Бузук В. В., Канушин В. Ф., Алексашина Г. А., Шокин П. Ф., Юзефович А. П., Огородова Л. В., Остац О. М., Ермеев Е. Ф., Вовк И. Г., Колмогоров В. Г., Мазурова Е. М., Непоклонов В. Б., Heiskanen W., Hofmann-Wellenhof B., Morits H., Kaula W. M., Tscherning C. C., Forsberg R., Pavlis E.

Задача учета влияния притяжения топографических масс при моделировании гравитационного поля Земли решалась различными исследователями, начиная со становления физической геодезии. В числе первых были крупные ученые, чьи имена носят до сих пор используемые и актуальные для практики ме-

тоды: Буге П., Гельмерт Ф. Р., Веннинг-Мейнес Ф. А. В условиях сильных ограничений в вычислительных ресурсах, имевших место до 80-х гг. прошлого века, учеными Березкиным В. М., Пришивалко А. И., Маловичко А. К., Мудрецовой Е. А. были разработаны способы определения топографических поправок в гравиметрии, ставшие впоследствии классическими. Значительный прогресс в данном направлении достигнут в последние десятилетия. Вопросами топографических редуций занимались советские и российские ученые Ремпель Г. Г., Долгаль А. С., Смирнов В. П., Дементьев Ю. В., Мазуров Б. Т., Пеллинен Л. П., Каленицкий А. И., а также зарубежные ученые Sideris M. G., Sjoberg L., Heck B., Seitz K., Li Y. C., Grombein T., Claessenens S., Grafarend E., Novak P., Peng M., Rummel R., Nagy D. и др. Однако в отечественной теории и практике вопросам определения топографической редуции для решения задач геодезии всегда уделялось недостаточно внимания. Такая ситуация исторически сложилась в связи с тем, что большая часть работ по сбору и обработке гравиметрической информации проводится в целях геологоразведки и геофизических исследований и направлена на повышение качества интерпретации аномалий силы тяжести при поиске полезных ископаемых, но не на повышение качества моделирования гравитационного поля Земли.

*Цель и задачи исследования.* Целью диссертационного исследования является разработка усовершенствованной методики и алгоритмов определения полной топографической редуции аномалий силы тяжести, позволяющих повысить эффективность обработки гравиметрических измерений для определения параметров гравитационного поля Земли.

Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие основные научно-технические задачи:

- выполнить анализ существующих методов редуцирования аномалий силы тяжести;
- усовершенствовать методику вычисления полной топографической редуции силы тяжести;

- разработать алгоритмы вычисления поправок к аномалиям силы тяжести за влияние притяжения топографических масс дальних и внешней областей;
- разработать глобальную модель интегральных параметров на всю поверхность Земли для вычисления топографических поправок к аномалиям силы тяжести за влияние масс дальних областей;
- разработать алгоритм расчета потенциала топографических масс, совместимый с алгоритмом вычисления поправок к силе тяжести за влияние масс дальних областей;
- исследовать влияние масс промежуточного слоя Земли на изменение нормальной силы тяжести;
- выполнить экспериментальные исследования разработанной методики и алгоритмов полного топографического редуцирования.

*Объект и предмет исследования.* Объектом исследования является топографическое редуцирование аномалий силы тяжести для моделирования гравитационного поля Земли.

*Предметом* исследования являются методика и алгоритмы вычисления полной топографической поправки к аномалиям силы тяжести.

*Научная новизна* диссертационного исследования заключается в следующем:

- усовершенствована методика полного топографического редуцирования силы тяжести с использованием способа интегральных параметров, отличающаяся от существующей тем, что поправки к аномалиям силы тяжести за рельеф внешней области вычисляются по локальной модели интегральных параметров, что позволяет значительно повысить производительность обработки данных и сократить трудоемкость расчета топографической редукиции;
- предложена глобальная модель интегральных параметров на всю поверхность Земли для расчета поправок к аномалиям силы тяжести за рельеф дальних областей, позволяющая реализовать технологию полного топографического редуцирования;

– разработан новый алгоритм расчета топографических поправок к потенциалу силы тяжести за влияние притяжения масс дальних областей, совместное использование которого с алгоритмом расчета топографических поправок к аномалиям силы тяжести за влияние притяжения масс дальних областей позволяет повысить точность моделирования гравитационного поля Земли.

*Теоретическая и практическая значимость работы.*

*Теоретическая* значимость исследований заключается в том, что разработаны теоретические основы алгоритмов вычисления топографических поправок к аномалиям силы тяжести за влияние притяжения масс дальних и внешней областей с помощью способа интегральных параметров, обеспечивающих повышение производительности обработки гравиметрических измерений; установлены интервалы линейного интерполирования топографических поправок способом интегральных параметров, позволяющие вычислять поправки с заданной точностью.

Разработан алгоритм вычисления топографических поправок к потенциалу силы притяжения, позволяющий использовать алгоритм расчета поправок к аномалиям силы тяжести в составе известной процедуры «удаление-восстановление», что обеспечивает повышение качества построения модели гравитационного поля Земли.

*Практическая* значимость работы состоит в сокращении затрат времени на расчеты топографических поправок к аномалиям силы тяжести с сохранением необходимой точности их определения за счет интерполирования поправок способом интегральных параметров, что особенно актуально для обработки больших массивов гравиметрической информации при моделировании гравитационного поля Земли. Разработанные алгоритмы реализованы в программном комплексе «Gravitsara» на языке Turbo Pascal.

Разработана глобальная модель интегральных параметров для вычисления топографических поправок к аномалиям силы тяжести за влияние притяжения масс дальних областей, использование которой позволяет оперативно выпол-

нять полное топографическое редуцирование силы тяжести и повысить качество интерполирования аномалий.

*Методология и методы исследования.* В качестве методологической основы использованы методы математического моделирования и методы решения задач физической геодезии, в том числе применен метод «удаление-восстановление». В качестве математической основы для решения поставленных задач применены методы линейной алгебры и вычислительной математики. Эмпирической основой исследований служили высокодетализированные модели рельефа.

*Положения, выносимые на защиту:*

– методика и алгоритмы полного топографического редуцирования силы тяжести на основе интерполирования топографических поправок к аномалиям силы тяжести способом интегральных параметров;

– глобальная модель интегральных параметров на всю поверхность Земли для вычисления топографических поправок к аномалиям силы тяжести за влияние масс дальних областей.

*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.* Результаты выполненных исследований представлены:

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

– международных научных конференциях молодых ученых «Молодежь в науке-2014» (18–21 ноября 2014 г., Минск, Беларусь) и «Молодежь в науке-2015» (1–4 декабря 2015 г., Минск, Беларусь);

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

Исследования выполнены в рамках гранта, поддержанного Российским научным фондом, 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 Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН 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.* Основные результаты исследований представлены в девяти научных работах, четыре 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 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

*Структура диссертации.* Общий объем диссертации составляет 146 страниц машинописного текста. Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы, включающего 97 наименований, содержит 9 таблиц, 16 рисунков и 4 приложения.

## 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 существующих методов топографического редуцирования аномалий силы тяжести, приведены основные методы вычисления топографических поправок, описаны их достоинства и недостатки, представлен краткий обзор глобальных моделей рельефа. По результатам аналитического обзора выявлено, что методика оптимизации вычислений топографической редукции посредством интерполирования интегральных параметров является наиболее перспективной для повышения производительности обработки гравиметрической информации. Также установлено, что алгоритмов вычисления поправок к аномалиям силы тяжести (АСТ) за рельеф на основе способа интегральных параметров не разработано.

*Во втором разделе* приведено теоретическое и методологическое обоснование методики и алгоритмов расчета поправок за рельеф к АСТ, а также алгоритма вычисления топографических поправок к потенциалу силы притяжения, совместимого с алгоритмом вычисления топографических поправок к АСТ за влияние масс дальних областей.

Для разработки методики вычисления поправок к АСТ за рельеф дальних областей с использованием способа интегральных параметров проведено исследование интервалов интерполирования топографических поправок, в пределах которых обеспечивается заданная точность определения поправок.

В результате анализа существующих алгоритмов вычисления топографической редукции установлено, что для разработки усовершенствованной методики расчета поправок к аномалиям силы тяжести за влияние рельефа дальних

областей предпочтительно в качестве исходного использовать алгоритм (1)–(7), так как он обеспечивает высокую скорость и точность вычислений ( $< 1$  мкГал):

$$\delta g(x_P, y_P) = -G\sigma \sum_{i=0}^{I-1} \frac{V_i}{S_i^2} \cos(\mathbf{S}_i, \mathbf{R}_P), \quad (1)$$

где

$$\cos(\mathbf{S}_i, \mathbf{R}_P) = \frac{\mathbf{S}_i \mathbf{R}_P}{S_i R_P}, \quad (2)$$

$$V_i = M_i \Delta B N_i \cos B_C \Delta L H_C, \quad (3)$$

$$\Delta B = B_2 - B_1, \quad \Delta L = L_2 - L_1, \quad (4)$$

$$\mathbf{R}_P = \begin{bmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N_P + H_P) \cos B_P \cos L_P \\ (N_P + H_P) \cos B_P \sin L_P \\ [(1 - e^2) N_P + H_P] \sin B_P \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbf{R}_C = \begin{bmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N_i + H_C/2) \cos B_C \cos L_C \\ (N_i + H_C/2) \cos B_C \sin L_C \\ [(1 - e^2) N_i + H_C/2] \sin B_C \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\mathbf{S}_i = (\mathbf{R}_C - \mathbf{R}_P); \quad S_i = |\mathbf{S}_i|; \quad R_P = |\mathbf{R}_P|. \quad (7)$$

В формулах (1)–(7) обозначено:

$G$  – гравитационная постоянная;

$\sigma$  – средняя плотность топографических масс;

$V_i$  – объем текущего тессероида – сфероидической трапециевидной призмы, ограниченной меридианами с долготами  $L_1$ ,  $L_2$  и параллелями с широтами  $B_1$  и  $B_2$  (рисунок 1);

$I$  – количество тессероидов в области учета влияния рельефа;

$\mathbf{S}_i \mathbf{R}_p$  – скалярное произведение векторов  $\mathbf{S}_i$  и  $\mathbf{R}_p$ ;

$M_i, N_i$  – средние радиусы кривизны меридиана и первого вертикала нижней грани текущего тессероида;

$B_p, L_p, H_p, N_p$  – геодезическая широта, долгота, высота и радиус кривизны первого вертикала результирующей точки, для которой выполняется расчет топографической поправки;

$H_C$  – геодезическая высота верхней грани тессероида;

$e^2$  – квадрат первого эксцентриситета земного эллипсоида.

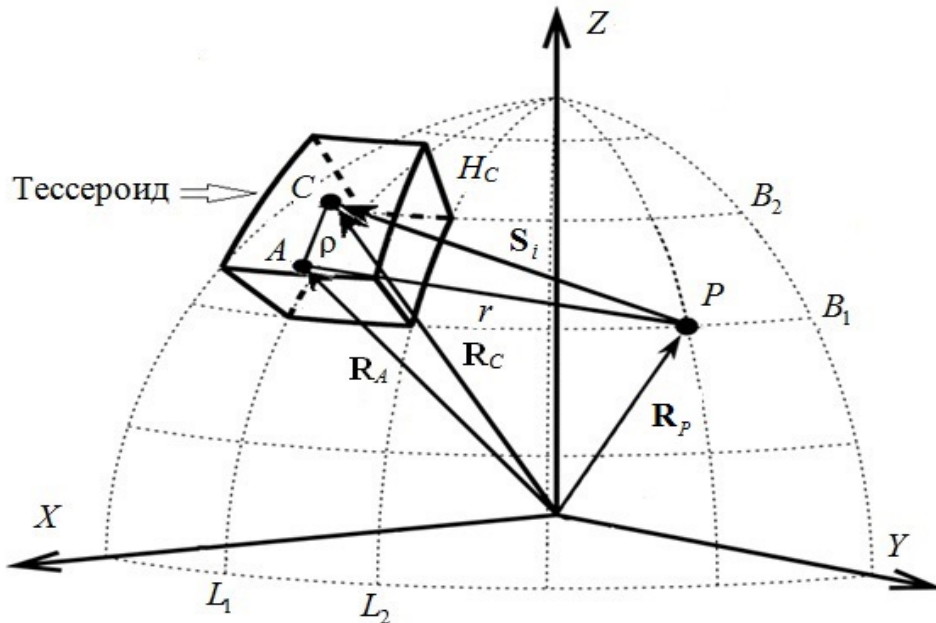


Рисунок 1 – Геометрия расположения тессероида и результирующей точки

На рисунке 1 обозначены:

$C$  – точка на верхней грани тессероида, определяемая координатами:

$$B_C = \frac{B_1 + B_2}{2}, \quad L_C = \frac{L_1 + L_2}{2};$$

$r$  – расстояние от результирующей точки  $P$  до текущей точки  $A$  интегрирования в теле тессероида;

$\rho$  – расстояние от точки  $C$  до текущей точки интегрирования в теле тессероида;

$S_i$  – вектор, соединяющий результирующую точку и точку  $C$ ;

$R_p$  – геоцентрический радиус-вектор результирующей точки;

$R_A$  – геоцентрический радиус-вектор текущей точки интегрирования в теле тессероида;

$R_C$  – геоцентрический радиус-вектор точки  $C$ .

В существующем способе интегральных параметров поправка к АСТ, вычисленная на поверхности эллипсоида, определяет первый интегральный параметр. Вторым параметром является вертикальная составляющая градиента поля притяжения топографических масс дальних областей, которую предлагается рассчитывать по формуле

$$\delta G_z = \frac{\delta g_t - \delta g_0}{H_t}, \quad (8)$$

где  $H_t$  – геодезическая высота результирующей точки;

$\delta g_t$  – поправка к АСТ, рассчитанная на топографической поверхности;

$\delta g_0$  – поправка к АСТ, рассчитанная на отсчетном эллипсоиде.

Топографическая поправка к АСТ в произвольной точке в способе интегральных параметров вычисляется по формуле

$$\delta g_p = \delta g_0^{\text{int}} + H_p \delta G_z^{\text{int}}, \quad (9)$$

где  $\delta g_0^{\text{int}}$  и  $\delta G_z^{\text{int}}$  – поправки к силе тяжести и вертикальной компоненте градиента силы тяжести в результирующей точке соответственно, полученные путем интерполирования интегральных параметров.

Для повышения точности вычисления интегральных параметров предложено в формуле (8) вместо поправки  $\delta g_0$ , которая определяется на поверхности эллипсоида, использовать рассчитанную на средней элевационной поверхности поправку  $\delta g_m$ . При этом средняя элевационная поверхность определяется по

высотам узловых точек регулярной сети цифровой модели рельефа. Данная усовершенствованная методика позволяет существенно повысить точность вычисления топографической поправки к аномалии силы тяжести по формуле (9) в областях со сложным рельефом.

При исследовании интервалов линейного интерполирования топографических поправок к АСТ за влияние притяжения масс дальних областей использовалась глобальная цифровая модель рельефа (ЦМР) ЕТОРО 1, из которой в пределах области со значительным перепадом высот выбран исходный профиль.

Из исходного одноминутного профиля путем разрежения получены профили с дискретностью, равной 2, 4, 6, 8, 10 и 12 угловым минутам дуги меридиана. После расчета интегральных параметров по формулам (1)–(8) путем интерполирования вычислены значения топографических поправок к АСТ в точках, расположенных в середине между узлами профилей. В тех же точках произведен расчет топографических поправок методом численного интегрирования. В таблице 1 приведены средние квадратические ошибки (СКО) разностей топографических поправок, полученных численным интегрированием и интерполированием по интегральным параметрам. Также в таблице 1 показаны СКО разностей поправок к АСТ, полученных численным интегрированием и простым линейным интерполированием.

Таблица 1 – Средние квадратические ошибки интерполирования топографических поправок к АСТ за влияние притяжения масс дальних областей

Интервал линейного интерполирования	СКО разностей поправок, полученных численным интегрированием и интерполированием по интегральным параметрам, мкГал	СКО разностей поправок, полученных численным интегрированием и простым линейным интерполированием, мкГал
2'	0,560	43,540
4'	0,713	94,699
6'	0,834	104,251
8'	0,992	122,658
10'	1,353	135,504
12'	2,004	131,477

Из таблицы 1 видно, что интерполирование поправок к АСТ по интегральным параметрам, выполняемое согласно предложенной методике, имеет значительное преимущество в отношении точности перед простым линейным интерполированием.

По результатам эксперимента установлен оптимальный интервал линейного интерполирования поправок к АСТ за притяжение масс дальних областей, составляющий 10 угловых минут дуги меридиана. Модель интегральных параметров, построенная с 10-минутной дискретностью, позволит повысить оперативность получения поправок к АСТ за рельеф, обеспечивая при этом точность вычислений на уровне точности современных гравиметрических измерений (2–3 мкГал).

Десятиминутная глобальная модель интегральных параметров для вычисления топографических поправок к АСТ за влияние притяжения масс дальних областей разработана на основе глобальной ЦМР ЕТОРО 1 и модели геопотенциала EGM-2008. Модель интегральных параметров позволяет учитывать гравитационное влияние масс промежуточного слоя между эллипсоидом GRS-80 и топографической поверхностью ЦМР ЕТОРО 1.

Для обоснования методики вычисления поправок к АСТ за влияние притяжения топографических масс внешней области с использованием способа интегральных параметров выполнена оценка интервалов линейного интерполирования поправок к АСТ. В расчетах использовалась более строгая методика учета рельефа по объемам тессероидов и модель рельефа с дискретностью, равной трем секундам дуги, построенная на основе съемки SRTM. Исходные профили выбраны в области со значительным перепадом высот ( $L_1 = 93^\circ$ ,  $L_2 = 94^\circ$ ;  $B_1 = 24^\circ$ ,  $B_2 = 25^\circ$ ). Дискретность модели рельефа в разреженных профилях составляла 15", 30", 1' и 2' дуги параллели. Радиус центральной зоны принят равным 10 и 15 км. Средние значения и средние квадратические ошибки разностей поправок, полученных численным интегрированием и вычисленных с помощью модифицированного способа интегральных параметров, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Точность интерполирования топографических поправок к АСТ за влияние притяжения масс внешней области

Интервал интерполирования	15"	30"	1'	2'
Центральная зона 10 км				
Среднее значение разностей поправок, мкГал	0,005	–0,101	–0,251	–0,871
СКО разностей поправок, мкГал	0,174	1,208	2,175	14,053
Центральная зона 15 км				
Среднее значение разностей поправок, мкГал	0,003	–0,014	0,018	0,032
СКО разностей поправок, мкГал	0,067	0,428	1,654	3,377

Нормативно установленная величина допустимой ошибки определения аномалий силы тяжести в редукции Буге для самого крупного масштаба гравиметрической съемки (1 : 5 000) составляет 0,02 мГал. Результаты производственных работ показывают, что ошибка вычисления поправок к АСТ за рельеф в центральной зоне, в зависимости от качества ЦМР, характеризуется величиной 0,010–0,015 мГал. Следовательно, разность указанных ошибок, равная 13–17 мкГал, может служить допуском на ошибку определения поправок к АСТ за влияние масс внешней области. Согласно результатам исследования интервалов линейного интерполирования поправок к АСТ за рельеф внешней области (см. таблицу 2), наибольшая СКО, полученная при величине интервала 2' и радиусе центральной зоны 10 км, не превышает допустимую, что подтверждает возможность применения модифицированного способа интегральных параметров к вычислению топографических поправок.

На ошибку определения топографических поправок к АСТ для моделирования гравитационного поля Земли отсутствуют нормативные требования, поэтому информация о соотношениях размера центральной зоны, интервала и погрешности интерполирования, представленная в таблице 2, позволит оператору обработки гравиметрических измерений назначать интервал интерполирования в соответствии с требуемой точностью вычисления поправок за рельеф.

На основании выполненных исследований усовершенствована методика вычисления полной топографической поправки к АСТ, включающая следующие технологические процедуры:

– расчет топографических поправок к АСТ за влияние притяжения масс дальних областей (от 200 км) путем линейного интерполирования интегральных параметров по 10-минутной глобальной модели;

– вычисление топографических поправок к АСТ за влияние притяжения масс внешней области (от 10–15 км до 200 км) путем линейного интерполирования интегральных параметров, которые рассчитываются численным методом в узлах регулярной сетки, покрывающей область гравиметрических измерений с дискретностью, выбираемой из таблицы 2 в соответствии с требуемой точностью вычисления поправок;

– расчет топографической поправки к АСТ в центральной зоне (от 0 до 10 км либо от 0 до 15 км) методом численного интегрирования.

Для реализации усовершенствованной методики вычисления полной топографической редукции АСТ разработаны алгоритмы расчета топографических поправок к АСТ за влияние масс дальних и внешней областей.

Согласно алгоритму вычисления поправок к АСТ за рельеф дальних областей первоначально по разработанной 10-минутной глобальной модели интегральных параметров выполняется поиск трапеции, внутри которой находится результативная точка. Расчет топографической поправки к АСТ в результативной точке выполняется путем линейного интерполирования интегральных параметров, заданных в узлах сетки трапеции, выбранной из глобальной модели. Данный алгоритм позволяет повысить эффективность расчетов за счет исключения необходимости производить суммирование топографических поправок, полученных на основе пятиминутной глобальной модели рельефа.

Алгоритм расчета топографических поправок к АСТ за влияние масс внешней области включает следующие операции:

1) по имеющейся выборке результатов гравиметрических измерений определяются узлы регулярной сетки с шагом, задаваемым в соответствии с таблицей 2;

2) в узлах сетки вычисляются интегральные параметры методом численного интегрирования;

3) производится анализ полученных интегральных параметров. При наличии ячеек регулярной сетки, в пределах которых изменение интегральных параметров превышает допустимое значение, автоматически вводятся дополнительные интегральные параметры для уменьшения размера таких ячеек и операции 2) и 3) повторяются;

4) с использованием окончательно полученных интегральных параметров выполняется расчет поправок к АСТ в результирующей точке путем линейного интерполирования.

Достоинством разработанного алгоритма расчета поправок к АСТ за рельеф внешней области является сокращение объемов вычислений за счет исключения необходимости интегрирования топографической поправки к АСТ для каждой результирующей точки в отдельности. Следовательно, чем выше плотность гравиметрических измерений, тем выше быстродействие данного алгоритма по сравнению с существующими.

Для разработки алгоритма вычисления поправки к потенциалу силы притяжения топографических масс, совместимого с алгоритмом расчета поправок к силе тяжести дальних областей (1)–(7), получена формула поправки к потенциалу с учетом следующих условий:

– использованы только линейные члены биномиального разложения функции  $(\rho^2 - 2\rho S_i \cos(\rho, \mathbf{S}_i) + S_i^2)^{-1/2}$ ;

– величины радиусов кривизны верхней и нижней граней тессероида в пределах сфероидической трапеции постоянны;

– исключено малое по величине слагаемое, пропорциональное  $\frac{\rho^2}{S_i^2}$ , влиянием которого можно пренебречь.

В результате формула поправки к потенциалу силы притяжения за влияние масс дальних областей имеет вид:

$$\delta V = -G\sigma \sum_{i=0}^{l-1} \frac{N_i M_i \Delta B \Delta L H_C}{S_i^2} \left( \begin{array}{l} \cos B_C (S_i + \mathbf{R}_C \mathbf{S}_i) + \frac{1}{S_i} [(N_i + \frac{H_C}{2}) \times \\ \times (X_i \cos L_C + Y_i \sin L_C) (\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2B_C) + \\ + Z_i ((1 - e^2) N_i + \frac{H_C}{2}) \frac{\sin 2B_C}{2} ] \end{array} \right), \quad (10)$$

где  $X_i, Y_i, Z_i$  – компоненты вектора  $\mathbf{S}_i$ .

Формула (10) позволяет использовать формулы (1)–(7) не только для интерполирования АСТ, но и в процедуре «удаление-восстановление» при моделировании гравитационного поля Земли.

Для исключения возникновения суперпозиционного эффекта от концентрации топографических масс под поверхностью эллипсоида предложена методика разделения значений нормальной силы тяжести (НСТ) на притяжение топографических масс и масс уровенного эллипсоида на этапе вычисления АСТ, что позволит уменьшить величины аномалий:

$$\Delta g_{\text{ПТР}} = \Delta g_{\text{изм}} - \gamma + \delta \gamma_t + \delta g_{\text{топ}}, \quad (11)$$

где  $\Delta g_{\text{изм}}$  – измеренное приращение силы тяжести;

$\gamma$  – значение нормальной силы тяжести уровенного эллипсоида;

$\delta \gamma_t$  – поправка к значению НСТ за влияние промежуточного слоя;

$\delta g_{\text{топ}}$  – полная топографическая поправка к АСТ.

Для определения величины поправок к значению нормальной силы тяжести выполнена оценка масс промежуточного и атмосферного слоев с использованием ЦМР ЕТОРО 1.

Результаты оценки приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты оценки масс промежуточного и атмосферного слоев

Размер трапеций (отсчетная поверхность)	Объем топографических масс, м <sup>3</sup>	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Масса, кг	Поправка к $GM$ , $10^{-9} \text{ м}^3/\text{с}^2$	$\delta\gamma_t (B = 0^\circ)$ , мГал	$\delta\gamma_t (B = 90^\circ)$ , мГал
Промежуточный слой						
1'×1' (геоид)	$1,180663 \cdot 10^{17}$	2,67	$3,15237 \cdot 10^{20}$	21,04	51,89	51,72
5'×5' (геоид)	$1,180559 \cdot 10^{17}$	2,67	$3,15209 \cdot 10^{20}$	21,03	51,87	51,70
		2,57	$3,03404 \cdot 10^{20}$	20,25	49,95	49,78
		2,03	$2,39653 \cdot 10^{20}$	15,99	39,44	39,31
5'×5' (эллипсоид)	$1,178671 \cdot 10^{17}$	2,67	$3,14705 \cdot 10^{20}$	21,00	51,80	51,62
		2,57	$3,02918 \cdot 10^{20}$	20,21	49,85	49,68
		2,03	$2,39270 \cdot 10^{20}$	15,97	39,39	39,26
Атмосферный слой						
5'×5' (эллипсоид)	$2,559204 \cdot 10^{19}$	–	$5,08519 \cdot 10^{18}$	0,34	0,84	0,84

Величины поправок к значению нормальной силы тяжести  $\delta\gamma_t$  за промежуточный слой, вычисленные по стандартным формулам, составляют более 50 мГал (при плотности 2,67 г/см<sup>3</sup>) и изменяются в среднем на 0,17 мГал в области от нулевой до девяностой параллели. Поправка к НСТ за атмосферный слой равна 0,84 мГал и изменяется с широтой незначительно. Величины полученных поправок к НСТ за промежуточный слой указывают на необходимость проведения отдельных специальных исследований для оценки целесообразности выделения промежуточного слоя из нормального поля при моделировании гравитационного поля Земли.

В третьем разделе приведено описание программного комплекса «Gravitsara», в состав которого включены все программы, основанные на разработанных алгоритмах; представлены результаты экспериментальных исследований разработанных алгоритмов расчета полной топографической редукции.

Исследование работоспособности программного комплекса выполнено с использованием трехсекундной ЦМР SRTM в области ( $L_1 = 91^\circ$ ,  $L_2 = 96^\circ$ ;  $B_1 = 22^\circ$ ,  $B_2 = 27^\circ$ ). На основе исходной модели рельефа построены сети результативных точек с дискретностью 6", 9", 15", 30", включающие по 300 точек

в каждой. Поправки к АСТ за рельеф вычислены с помощью программного комплекса полного топографического редуцирования «Gravitsara» и программы численного интегрирования. Результаты оценки производительности и точности определения поправок за рельеф, выполненной по разностям поправок, полученных модифицированным способом интегральных параметров и численным интегрированием, приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты исследования производительности и точности расчета топографических поправок к АСТ комплексом программ «Gravitsara»

Дискретность сети результативных точек	Повышение производительности вычислений относительно численного интегрирования (количество раз)	СКО вычисления поправок к АСТ, мкГал
Дискретность вычисления интегральных параметров 1' (радиус центральной зоны 10 км)		
6" × 6"	48	3,84
9" × 9"	25	3,82
15" × 15"	9	3,76
30" × 30"	3	3,81
Дискретность вычисления интегральных параметров 2' (радиус центральной зоны 15 км)		
6" × 6"	81	2,16
9" × 9"	40	2,15
15" × 15"	18	2,13
30" × 30"	4	2,21

Проведенные исследования свидетельствуют о значительном повышении производительности вычисления поправок к АСТ за рельеф программным комплексом «Gravitsara» и показывают, что при увеличении плотности гравиметрических измерений на единицу площади эффективность работы программного комплекса возрастает без снижения точности вычислений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги диссертационного исследования заключаются в следующем:

– выполнен анализ существующих методов редуцирования аномалий силы тяжести и расчета топографической редукции, в результате которого выяв-

лено, что, в связи с непрерывным увеличением объема измерительной информации о гравитационном поле Земли и детальности моделей рельефа, поиск решений оптимизации процесса вычислений топографической редукции является актуальным до настоящего времени;

– усовершенствована методика вычисления полной топографической поправки к аномалиям силы тяжести на основе способа интегральных параметров, отличающаяся от существующей тем, что топографические поправки к АСТ за влияние масс внешней области определяются по интегральным параметрам, вычисленным в узлах локальной регулярной сетки, построенной по совокупности гравиметрических измерений, а не по глобальной модели интегральных параметров. Это обеспечивает возможность оперативной повторной обработки архивных гравиметрических измерений при использовании новых цифровых моделей рельефа и большую гибкость в выборе параметров топографического редуцирования;

– разработаны алгоритмы расчета топографических поправок к аномалиям силы тяжести за влияние масс дальних и внешней областей на основе способа интегральных параметров и экспериментально установленных интервалов интерполирования интегральных параметров, которые позволяют в десятки раз повысить производительность обработки гравиметрических измерений;

– разработана глобальная модель интегральных параметров на основе современных данных о рельефе земной поверхности для вычисления топографических поправок к аномалиям силы тяжести, использование которой позволяет повысить качество обработки гравиметрических данных;

– разработан алгоритм расчета потенциала топографических масс дальних областей, совместное использование которого с глобальной моделью интегральных параметров в процедуре «удаление-восстановление» позволяет определять полную топографическую редукцию аномалий силы тяжести за счет ранее не учитываемых топографических масс дальних областей и повысить качество моделирования гравитационного поля Земли;

– выполнено исследование влияния масс промежуточного слоя на изменение силы тяжести отсчетного эллипсоида, которое показало значимость величин поправок к нормальной силе тяжести и необходимость проведения специальных исследований для оценки целесообразности разделения нормального поля силы тяжести при моделировании гравитационного поля Земли;

– проведены экспериментальные исследования разработанных программ, реализующих вычисление полной топографической поправки к аномалиям силы тяжести в соответствии с разработанной методикой и алгоритмами, которые показали значительное повышение производительности вычислений топографических поправок без потери точности.

Таким образом, поставленная цель диссертационного исследования, направленная на разработку методики и алгоритмов определения полной топографической редукции аномалий силы тяжести, позволяющих повысить эффективность обработки гравиметрических данных, достигнута.

Перспективы дальнейших исследований состоят в совершенствовании методов высокоточного моделирования гравитационного поля Земли для решения научных и прикладных задач геодезии, в том числе для координатно-временного и навигационного обеспечения страны, с использованием разработанной в диссертационном исследовании методики и алгоритмов вычисления полной топографической редукции силы тяжести по геодезическим данным.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Дементьев, Ю. В. Цифровые планетарные модели рельефа для вычисления топографической редукции [Текст] / Ю. В. Дементьев, А. В. Мареев // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 5/С. – С. 26–29.

2 Дементьев, Ю. В. Влияние стационарной атмосферы Земли на значение силы тяжести [Текст] / Ю. В. Дементьев, А. И. Каленицкий, А. В. Мареев // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 5/С. – С. 9–14.

3 Мареев, А. В. О возможности расширения интервала линейной интерполяции поправок полной топографической редукции для обработки больших массивов гравиметрической информации [Текст] / А. В. Мареев // Физика Земли. – 2016. – № 6. – С. 100–104.

4 Дементьев, Ю. В. Влияние атмосферного давления и температуры воздуха на значение силы тяжести [Текст] / Ю. В. Дементьев, А. И. Каленицкий, А. В. Мареев // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 62–69.

5 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ Gravitsara № 2018615004 Российская Федерация [Текст] / А. П. Карпик, А. В. Мареев ; заявитель и правообладатель Сиб. гос. ун-т геосистем и технологий (RU) ; дата поступления 26 фев. 2018 г. ; дата регистрации 23 апр. 2018 г.

6 Дементьев, Ю. В. Влияние движения полюса Земли на значение нормального ускорения силы тяжести [Текст] / Ю. В. Дементьев, А. И. Каленицкий, А. В. Мареев // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014 : X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография и маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. Новосибирск, 18–22 апр. 2014 г. – Новосибирск : СГГА, 2014. – Т. 1. – С. 213–217.

7 Елагин, А. В. Исследование взаимосвязи смешанных и чистых аномалий силы тяжести [Текст] / А. В. Елагин, И. Е. Дорогова, А. В. Мареев // Вестник СГГА. – 2014. – Вып. 3 (27). – С. 70–83.

8 Дементьев, Ю. В. Влияние водных масс промежуточного слоя Земли на значение силы тяжести [Текст] / Ю. В. Дементьев, А. И. Каленицкий, А. В. Мареев // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 3 (31). – С. 40–44.

9 Мареев, А. В. Линейная интерполяция топографических поправок к аномалиям силы тяжести за влияние масс внешней области [Текст] / А. В. Мареев // Интерэкспо ГЕО-Сибирь : XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография и маркшейдерия» : сб. материалов Новосибирск, 25–27 апр. 2018 г. – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – С. 41–46.