

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ФИЗИКО-  
ТЕХНИЧЕСКИХ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ»  
(ФГУП «ВНИИФТРИ»)

На правах рукописи



Бобров Дмитрий Сергеевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ СОЗДАНИЯ  
НАВИГАЦИОННЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ КАРТ

05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов  
и изделий»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Менделеево-2020

Работа выполнена в научно-исследовательском отделении разработки и эксплуатации средств метрологического обеспечения координатно-временных и навигационных систем ФГУП «ВНИИФТРИ»

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, начальник НТЦ Фатеев Вячеслав Филиппович

Официальные оппоненты

Первый оппонент: профессор кафедры астрономо-геодезического обеспечения, навигации и прицеливания ракетных комплексов филиала Военной академии РВСН имени Петра Великого (г. Серпухов), доктор технических наук, профессор Шолохов Алексей Викторович

Второй оппонент: начальник отдела геодезии ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД», кандидат технических наук, доцент Попадьев Виктор Валерьевич.

Ведущая организация – Межрегиональное общеобразовательное учреждение «Институт инженерной физики», 142210, Россия, Московская обл., г. Серпухов, Б. Ударный пер., д. 1а

Защита состоится «30» ноября 2020 г. на заседании Совета Д308.005.01 во ФГУП «ВНИИФТРИ» по адресу: 141570, р.п. Менделеево, г.о. Солнечногорск, Московская область.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГУП «ВНИИФТРИ».

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук



М.В. Балаханов

## **Введение**

### **Актуальность темы исследований**

Основным элементом автономных помехозащищенных систем навигации в настоящее время и в ближайшем будущем являются бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС). Основная проблема, связанная с применением БИНС, состоит в значительных погрешностях местоопределения, которые накапливаются на протяженных трассах движения. Величина этих погрешностей достигает 1800 м за один час, что для большинства потребителей неприемлемо.

В этой связи необходима периодическая коррекция навигационных решений БИНС. Решение указанной задачи возможно за счет комплексирования БИНС с автономными помехозащищенными системами навигации, основанными на других принципах измерений.

Основными средствами коррекции БИНС в настоящее время являются:

- навигационная аппаратура потребителя глобальных навигационных спутниковых систем (НАП ГНСС). Это средство коррекции обеспечивает непрерывность навигации, глобальное покрытие и высокую потенциальную точность навигационных решений. Вместе с тем, в ряде ситуаций точность и устойчивость навигационных определений НАП ГНСС снижается. Это возможно в случаях, когда уровень принимаемых сигналов ГНСС оказывается либо ниже порогового (например, в туннелях, горных ущельях, закрытых помещениях), либо, когда прием сигналов вообще невозможен (под землей, под водой, на других планетах). Устойчивость работы НАП снижается в условиях значительных естественных и преднамеренных помех (многолучевость, индустриальные помехи и др.), в том числе при неконтролируемом изменении мощности сигналов космических аппаратов ГНСС над определенными территориями (вплоть до их полного отключения);

– корреляционно-экстремальные навигационные системы (КЭНС), работающие по рельефу земной поверхности, а также по радиолокационным, оптическим и радиотепловым изображениям участков местности, а также КЭНС, использующие магнитное поле Земли.

Однако, КЭНС по рельефу земной поверхности и оптическим и радиоизображениям участков местности неработоспособны над океаном и безориентирной местностью, а КЭНС по магнитному полю Земли подвержены влиянию помех, особенно во время вспышек на Солнце. Кроме того, по причине глобального изменения магнитного поля Земли данные системы требуют регулярного обновления карт.

Для повышения точности и помехозащищенности автономных систем навигации целесообразен переход к КЭНС, основанным на использовании измерений параметров гравитационного поля Земли (ГПЗ). В общем виде гравиметрические КЭНС, основанные на использовании ГПЗ, используют сравнение измеренных и опорных (картографических) параметров поля, обеспечивая поиск экстремума при выполнении такой операции. Гравитационное поле Земли характеризуется средними и аномальными значениями первых и вторых градиентов. Поскольку пространственные распределения характеристик ГПЗ для районов и маршрутов применения средств навигации уникальны и достаточно стабильны, то их значения можно использовать для глобальной навигации.

Достоинством комплекса автономной навигации, включающего БИНС и средство коррекции в виде гравиметрической КЭНС, является абсолютная помехозащищенность, поскольку постановка помех этим системам невозможна. Кроме того, эти системы работоспособны в сложных условиях применения (в туннелях, горных ущельях, закрытых помещениях, под землей, под водой и даже на других планетах).

Основной проблемой создания автономных навигационных систем на основе измерения параметров ГПЗ в настоящее время является отсутствие высокоточных навигационных карт параметров ГПЗ высокого пространственного разрешения (детальности) на заданный район или маршрут применения средств навигации.

В связи с изложенным, для обеспечения высокой точности автономных навигационных

систем на основе измерения параметров ГПЗ требуется создание глобальных высокоточных и высокодетальных навигационных гравитационных карт параметров гравитационного поля Земли.

**Целью** диссертационной работы является повышение точности и детальности создания навигационных гравитационных карт.

Для достижения поставленной в данной диссертационной работе цели необходимо решить следующие **задачи**:

**Главная задача исследований:** Исследование и разработка методов и средств создания высокоточных навигационных гравитационных карт параметров ГПЗ на заданный район или маршрут применения.

**Частные задачи исследований:**

1. Анализ состояния методов и средств создания (построения) гравитационных навигационных карт, выбор направления разработки новых методов.

2. Разработка метода повышения точности и детальности создания навигационных гравитационных карт значений ускорения свободного падения (УСП) для наземного полигона на основе дополнительного учета влияния рельефа и плотности пород литосферы с оценкой вариаций УСП.

3. Разработка методов создания навигационных гравитационных карт на труднодоступные территории на основе цифровых моделей рельефа и моделей плотности пород.

4. Разработка метода создания навигационных гравитационных карт внутри зданий и закрытых помещений и оценка ожидаемого СКО определения координат.

5. Обоснование требований, состава, структуры, разработка методики применения и специального программного обеспечения наземного комплекса создания навигационных гравитационных карт.

**Объектом исследований** являются навигационные гравитационные карты ускорения свободного падения и гравитационных градиентов.

**Предметом исследований** являются методы повышения точности и детальности навигационных гравитационных карт за счет дополнительного учета влияния рельефа и плотности пород литосферы.

**Научная новизна**

1. Усовершенствован метод повышения точности и детальности навигационно-гравиметрических карт на основе дополнительного учета влияния рельефа и плотности пород литосферы. Это позволило повысить точность в 4-5 раз. Экспериментально установлено, что использование существующих моделей ГПЗ для создания навигационных гравиметрических карт целесообразно только для первоначальной оценки информативности подготавливаемой территории.

2. Впервые установлено, что при реализации технологии навигации по картам УСП поправками за учет влияния изменения атмосферного давления, температуры окружающего воздуха, влагонасыщенности пород, а также изменения УСП во времени можно пренебречь из-за их незначительности.

3. Впервые предложен и исследован метод повышения точности и детальности при создании навигационной гравитационной карты УСП и гравитационных градиентов на труднодоступные территории на основе реальных данных о рельефе местности и плотности пород. При этом установлено, что достижимая погрешность карт УСП и гравитационных градиентов составляет 2 мГал и 10 Этивеш, соответственно.

4. Впервые разработан метод создания навигационных гравитационных карт для закрытых помещений и больших зданий простой конструкции путем моделирования параметров ГПЗ с разработкой карт пространственного распределения значений УСП и гравитационных градиентов. Оценка СКО определения координат составляет 1 м при существующих погрешностях измерений.

5. Для помещений со сложной структурой ГПЗ разработан метод подготовки

навигационно-гравиметрических карт на основе реальных измерений УСП и составляющих гравитационного градиента с оценкой погрешности выполненных измерений и пригодности для навигации.

6. Впервые предложено использование метода создания калибровочного объема по значениям гравитационных градиентов для юстировки и калибровки создаваемых гравитационных градиентометров. Метод исключает необходимость в изготовлении дорогостоящих испытательных стендов на основе калибровочных масс.

7. Впервые создана навигационная карта гравитационных градиентов для горного ущелья. Диапазон изменения гравитационных градиентов при передвижении в ущелье составляет 100-250 Этвеш, что существенно превышает погрешности существующих средств измерений. Оценка ожидаемого СКО определения плановых координат не превышает 90 м.

8. Разработан состав, структура, специальное программное обеспечение прототипа наземного комплекса создания навигационных гравитационных карт и методика создания многослойных навигационных гравитационных карт с его помощью.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Метод повышения точности и детальности создания навигационно-гравитационных карт УСП на основе дополнительного учета влияния рельефа и плотности пород литосферы. При детальности 1 км достигнутая погрешность карт составила 0,7 мГал для Московского гравиметрического полигона, что в 4-5 раз меньше, чем при использовании классического метода.

2. Метод создания глобальных навигационных гравитационных карт УСП и гравитационных градиентов на труднодоступные территории. При использовании метода создана карта с погрешностью не более 2 мГал и 10 Этвеш соответственно на основе совместного использования цифровых карт рельефа и модели плотности пород. Создана навигационная карта для горного ущелья с ожидаемым СКО определения плановых координат до 90 м.

3. Метод создания навигационных гравитационных карт для закрытых помещений и зданий, позволяющий на основе данных о конструкции здания путем моделирования параметров ГПЗ подготовить навигационные гравитационные карты с погрешностью не более 5 мкГал и 8 Этвеш соответственно, что на современном этапе обеспечивает СКО определения координат до 1 м.

4. Состав, структура, методика применения и специальное программное обеспечение наземного комплекса создания навигационных гравитационных карт, позволяющего создавать многослойные навигационные гравитационные карты для локальной навигации.

**Практическая значимость** диссертации заключается в возможности использования её результатов при выполнении следующих работ:

– при создании картографического обеспечения для перспективных КЭНС на основе гравиметров и градиентометров;

– при повышении точности и детальности существующих карт аномалий ускорения свободного падения;

– при выполнении гравиметрических и градиентометрических съемок за счет повышения точности учета влияния промежуточного слоя пород.

**Практическая направленность работы.** Результаты исследований использованы при выполнении пяти научно-технических работ.

Использование результатов исследований подтверждено актом реализации, полученным во ФГУП «ВНИИФТРИ».

**Личный вклад автора.** Автор лично разработал новый метод повышения точности и детальности создаваемых навигационных гравитационных карт, принимал активное участие в создании комплекса подготовки навигационных гравитационных карт и лично проводил все измерения для подтверждения разработанного метода. Автор лично проводил обработку результатов измерений, принимал активное участие в анализе, обобщении полученных результатов, создании специального программного обеспечения и формулировке выводов.

### **Апробация результатов диссертационной работы**

Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на IV и V Симпозиуме международной ассоциации по геодезии (IAG) «Наземная, морская и аэрогравиметрия: измерения на неподвижных и подвижных основаниях» (TG-SMM 2016, 2019, Санкт-Петербург), Международном симпозиуме «Метрология времени и пространства» (2018 г., Менделеево), на научно-технической конференции «Навигация по гравитационному полю Земли и ее метрологическое обеспечение» (2017 г., Менделеево), на II научно-технической конференции «Навигация по гравитационному и магнитному полям Земли. Новые технологии» (28-31 октября 2019 г., Менделеево), на научно-технической конференции «Пути повышения эффективности топогеодезического и навигационного обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации» (2018 г., Кубинка), на научно-технической конференции «Актуальные задачи военной метрологии» (2018 г., Кубинка), на круглом столе «Современное состояние и перспективы развития средств топогеодезического и навигационного обеспечения РВСН» научно-деловой программы Международного военно-технического форума «АРМИЯ-2018» (2018 г., Кубинка), на научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и специалистов «Метрология в XXI веке» (2016 г., 2017 г., 2018 г., 2019 г., Менделеево), на научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК (2016 г., Москва).

Материалы диссертации опубликованы в 21 статье, в том числе в 2 статьях в изданиях из Перечня ВАК российских рецензируемых изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации, и 8 докладах на научно-технических конференциях. Получено свидетельство о государственной регистрации базы данных №2018621129 «База измерительных данных».

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, обозначений и сокращений, списка цитируемой литературы из 116 наименований. Общий объем диссертации составляет 183 страницы. Диссертация содержит 76 рисунков и 23 таблицы.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во Введении** обоснована актуальность темы диссертации, указана цель и задачи исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, научная новизна, определена практическая значимость и личный вклад автора.

**Глава 1** посвящена обзору состояния методов и средств создания навигационных гравитационных карт. На основе публикаций Красовского А.А., Джанджгавы Г.И., Августова Л.И., Степанова О.А. и других отечественных и зарубежных авторов выполнена оценка достижимых навигационных возможностей корреляционно-экстремальных навигационных систем по ГПЗ, в основе которых лежат измерители УСП и гравитационных градиентов. Сформулированы требования к погрешности и дискретности навигационных гравитационных карт УСП и гравитационных градиентов. Показано, что для реализации КЭНС на основе бортовых гравиметров необходимо обладать навигационными картами УСП с погрешностью не более 2 мГал и детальностью 1 км. Для реализации корреляционно-экстремальных навигационных систем на основе бортовых градиентометров необходимо обладать навигационными картами гравитационных градиентов с погрешностью не более 10 Этвеш ( $1 \text{ Этвеш} = 1 \text{ мкГал}/10 \text{ м} = 10^{-9} \cdot \text{с}^{-2}$ ) и детальностью не более 1 км.

На основе публикаций Молоденского М.С., Юзефовича А.П., Огородовой Л.В. и других отечественных и зарубежных авторов приведен обзор состояния изученности гравитационного поля Земли, приведены оценки стабильности параметров ГПЗ во времени. Отмечено, что в открытом доступе находится большое количество разнородной гравиметрической информации. Базы данных гравитационных градиентов отсутствуют. Базы данных УСП не обладают единым форматом, масштабом и погрешностью значений УСП.

Выполнен анализ существующих методов создания навигационных гравитационных карт ГПЗ на примере наземной, воздушной, морской и космической съемки, а также по глобальным цифровым моделям ГПЗ. Указаны достоинства, применимость и недостатки каждого метода.

Приведен краткий обзор существующих бортовых гравиметров и градиентометров. Отмечено, что перспективными являются горизонтальные градиентометры. Уравнение сигнала  $M$  на выходе измерительной системы такого градиентометра имеет вид:

$$M = k_1 \cdot W_{\Delta} \sin 2\omega t + k_2 \cdot W_{xy} \cos 2\omega t, \quad (1)$$

где  $k_1, k_2$  – коэффициенты, определяемые добротностью и моментами инерции колебательной системы чувствительного элемента градиентометра;  $W_{\Delta}, W_{xy}$  – составляющие гравитационного градиента; причем  $W_{\Delta} = W_{yy} - W_{xx}$ ;  $\omega$  – угловая скорость вращения градиентометра.

Отмечено, что опубликованные сведения об унифицированных комплексах подготовки навигационных гравитационных карт УСП и гравитационных градиентов отсутствуют.

В целом, в процессе анализа установлено, что для обеспечения системы навигации по ГПЗ необходима дополнительная разработка:

- метода повышения точности и детальности создания навигационных гравитационных карт УСП;
- метода создания навигационных гравитационных карт на труднодоступные территории на основе цифровых моделей рельефа и моделей плотности пород;
- методов создания навигационных гравитационных карт внутри зданий и закрытых помещений;
- требований к составу и решаемым задачам, облику и методике применения комплекса подготовки навигационных гравитационных карт.

**Глава 2** посвящена оценке возможности создания навигационных гравитационных карт УСП и гравитационных градиентов по глобальным моделям ГПЗ, экспериментальной оценке стабильности УСП во времени и разработке методов повышения точности и детальности создания навигационных гравитационных карт УСП.

Оценка возможности применения глобальных моделей ГПЗ выполнялась на двух гравиметрических полигонах ФГУП «ВНИИФТРИ»: Московском (равнинная местность) и Иркутском (предгорная местность). Для этих территорий при непосредственном участии автора были выполнены измерения УСП при следующих условиях: расстояние между пунктами измерений от 2 до 5 км, погрешность измеренных значений УСП 0,035 мГал. Выполненные экспериментальные работы показали, что погрешность современных моделей ГПЗ EGM2008 и GGMPlus составляет более 5,5 мГал. Таким образом, создаваемые по моделям ГПЗ навигационные гравитационные карты УСП требованиям к погрешности карт не удовлетворяют.

Автором были выполнены экспериментальные исследования, направленные на оценку стабильности УСП во времени. Исследования вариаций УСП вследствие изменения атмосферного давления, температуры окружающего воздуха, влагонасыщенности пород и годичной стабильности УСП показали, что этими вариациями при подготовке карт УСП можно пренебречь ввиду их малости.

Методы повышения точности и детальности создания навигационных гравитационных карт УСП разрабатывались при условии обеспечения погрешности по УСП 2 мГал и детальности карты 1 км.

#### **Метод № 1. Интерполяция значений УСП**

Наиболее простым методом повышения детальности карты является линейная интерполяция значений  $g_N$  и  $g_{N+1}$  в требуемую точку интерполяции (рисунок 1) по формуле:

$$g_i^{инт} = g_N + \frac{g_{N+1} - g_N}{L} \Delta l, \quad (2)$$

где  $g_i^{инт}$  – интерполированное значение УСП,  $g_N$  и  $g_{N+1}$  – известные значения УСП в крайних точках профиля интерполяции,  $L$  – длина профиля интерполяции,  $\Delta l$  – интервал интерполяции.

Оценка погрешности созданных карт выполнялась на примере трех экспериментальных профилей Московского гравиметрического полигона. Для каждого профиля расстояние  $L$

между крайними точками  $g_N$  и  $g_{N+1}$  составило  $\approx 5$  км, количество промежуточных точек равно пяти, расстояние  $\Delta l$  между промежуточными точками 800 - 900 м. Итого для каждого измерительного профиля интерполяции получен набор из семи точек с измеренными координатами,

из которых соответствует значение  $g_i^{изм}$ . Измерения выполнялись при помощи гравиметра CG-5 Autograv, координатная привязка выполнялась с помощью геодезического приемника Javad Sigma. Погрешность измерений  $g_i^{изм}$  составила 0,005 мГал.

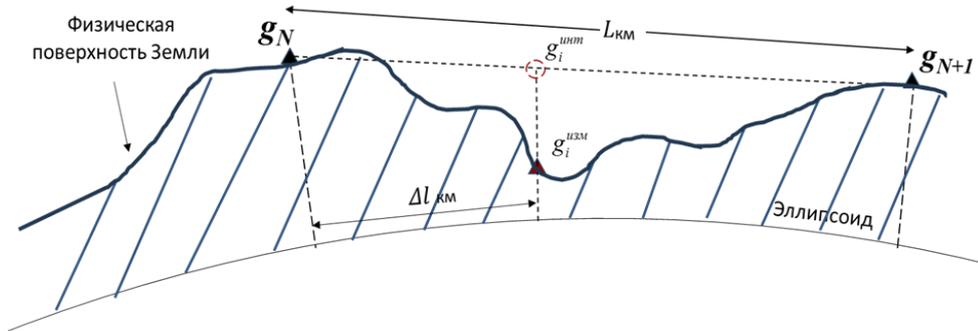


Рисунок 1 – Схема реализации метода №1

Оценка погрешности интерполяции по методу №1 выполнена по разности  $\sigma g^{(1)} = g_i^{инт} - g_i^{изм}$ . Результаты оценки этой разности, которая представляется как погрешность интерполяции, представлены в таблице 1 (столбцы 4 и 6). Отсюда видно, что разность  $\sigma g^{(1)}$  изменяется от -3 до +3 мГал.

Таблица 1. Оценка погрешности методов интерполяции для Московского гравиметрического полигона

№ п/п точки, $i$	$\Delta l$ , км	$g_i^{изм}$ , мГал	Метод № 1 $g_i^{инт}$ , мГал	Метод № 2 $g_i^{выч}$ , мГал	Метод № 1 Значение $\sigma g^{(1)} = g_i^{инт} - g_i^{изм}$ , мГал	Метод № 2 Значение $\sigma g^{(2)} = g_i^{выч} - g_i^{изм}$ , мГал	Отношение $ \sigma g^{(1)}  /  \sigma g^{(2)} $
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Профиль № 1</b>							
$g_N$	0	26.143					
1	0.88	33.272	29.970	33.106	-3.302	-0.166	20
2	1.91	35.773	34.448	35.320	-1.325	-0.453	3
3	2.99	39.039	39.145	39.110	0.105	0.071	1
4	3.32	40.207	40.579	40.556	0.372	0.349	1
5	3.96	43.403	43.362	43.413	-0.040	0.011	4
$g_{N+1}$	5.11	48.363					
<b>Профиль № 2</b>							
$g_N$	0	41.784					
1	1	40.550	41.885	41.014	1.334	0.464	3
2	2.22	39.113	42.007	38.880	2.895	-0.232	12
3	2.86	38.762	42.072	38.460	3.310	-0.302	11
4	3.96	40.797	42.182	41.028	1.385	0.231	6
5	4.81	40.391	42.268	41.127	1.876	0.735	3
$g_{N+1}$	5.85	42.372					

№ п/п точки, $i$	$\Delta l$ , км	$g_i^{изм}$ , мГал	Метод № 1 $g_i^{инт}$ , мГал	Метод № 2 $g_i^{выч}$ , мГал	Метод № 1 Значение $\sigma g^{(1)} = g_i^{инт} - g_i^{изм}$ , мГал	Метод № 2 Значение $\sigma g^{(2)} = g_i^{выч} - g_i^{изм}$ , мГал	Отношение $ \sigma g^{(1)}  /  \sigma g^{(2)} $
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Профиль № 3</b>							
$g_N$	0	-1.122					3
1	1.03	-1.623	0.008	-2.163	1.631	-0.541	2
2	2.03	1.353	1.106	1.471	-0.248	0.118	1
3	2.56	0.819	1.687	1.489	0.868	0.670	6
4	3.02	0.365	2.192	0.648	1.827	0.283	2
5	4.95	5.413	4.309	5.996	-1.103	0.584	3
$g_{N+1}$	5.66	5.088					
Средняя величина соотношения $ \sigma g^{(1)}  /  \sigma g^{(2)} $							<b>5</b>

**Метод № 2. Метод вычисления и интерполяции аномальных составляющих УСП**

Ускорение свободного падения  $g$  в точке на поверхности Земли представим в виде:

$$g = \gamma_0 + \delta g_h + \Delta g_H + \Delta g_{\Delta\rho}, \quad (3)$$

где  $\gamma_0$  - нормальное гравитационное поле Земли,  $\delta g_h$  - аномальная добавка за счет геодезической высоты точки,  $\Delta g_H$  - аномальная добавка за счет влияния промежуточного слоя пород, заключенных между поверхностью земного эллипсоида и физической поверхностью Земли,  $\Delta g_{\Delta\rho}$  - аномальная составляющая УСП, вызванная влиянием неоднородности плотности пород под поверхностью эллипсоида.

Величина  $\gamma_0$  определяется по известной формуле:

$$\gamma_0 = g_e \cdot (1 + \beta \sin^2 \varphi - \beta_1 \sin^2 2\varphi), \quad (4)$$

где  $g_e$  - значение УСП на экваторе,  $\beta = (g_p - g_e) / g_e$ ,  $g_p$  - значение УСП на полюсе,  $\varphi$  - широта пункта наблюдений,  $\beta_1 = \frac{\alpha\beta}{4} + \frac{\alpha^2}{8}$ ,  $\alpha$  - сжатие общеземного эллипсоида.

Величина  $\delta g_h$  вычисляется по формуле:

$$\delta g_h = 0,3086 \cdot h, \quad (5)$$

где  $h$  - геодезическая высота точки.

Аномальная добавка за счет влияния промежуточного слоя  $\Delta g_H$  определяется по формуле:

$$\Delta g_H = \sum_{200\text{км}} \frac{G \rho_i \cdot v_i}{r_i^2}, \quad (6)$$

где  $G$  - гравитационная постоянная,  $\rho_i$  - плотность элементарной ячейки пород промежуточного слоя,  $v_i$  - объем элементарной ячейки пород промежуточного слоя,  $r_i$  - расстояние до элементарной ячейки пород промежуточного слоя.

Аномальная добавка  $\Delta g_{\Delta\rho}$  неизвестна, однако в  $i$ -й точке с известным значениям  $g_i^{изм}$  (взятым из каталога, либо измеренным) эту величину можно вычислить на основе формулы (3):

$$\Delta g_{\Delta\rho-i} = g_i^{изм} - (\gamma_0 + \delta g_h + \Delta g_H)_i^{выч}, \quad (7)$$

где сумма  $(\gamma_0 + \delta g_h + \Delta g_H)_i^{выч}$  вычисляется по вышеперечисленным формулам (4), (5), (6).

Формулы (4), (5) и (6) имеют свои особенности применения. Составляющие  $\gamma_0$  и  $\delta g_h$  вычисляются по координатам точки  $g^{6blч}$ , слагаемое  $\Delta g_H$  вычисляется по формуле (6) в том случае, когда известна информация о высотах рельефа местности и значениях плотности пород вокруг точки  $g^{6blч}$ . Исследования показали, что в свободном доступе имеется цифровая модель рельефа, полученная по результатам работы космической миссии Shuttle radar topographic mission (SRTM).

Типовой формой представления цифровых карт рельефа являются файлы набора прямоугольных вертикальных призм по сетке 1"x1", наложенных на географические В, L, Н координаты (рисунок 2). Автором выполнена проверка заявленной погрешность миссии SRTM для территории Иркутского гравиметрического полигона. В ходе проверки погрешность миссии SRTM была подтверждена и составила 8 м.

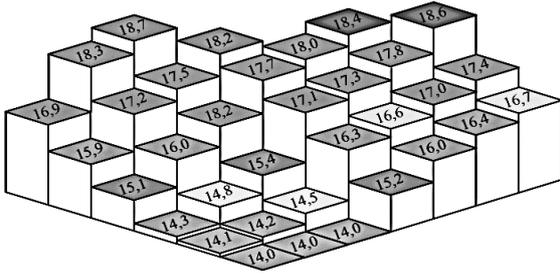


Рисунок 2 - Форма представления рельефа

В феврале 2020 г. была опубликована глобальная модель плотностного строения пород рельефа ТороDensТ. Модель предоставляется в виде значений плотности пород и погрешности их определения по регулярным сеткам размером 1°x1°, 5'x5' и 30"x30". Проверка погрешности модели ТороDensТ выполнена методом Неттлетона на примере Московского и Иркутского полигонов. Проверка подтвердила заявленную погрешность модели ТороDensТ в 0,23 г/см<sup>3</sup>.

Если информация о высотах рельефа представлена в виде набора прямоугольных призм, то составляющая  $\frac{G\rho_i \cdot v_i}{r_i^2}$  в формуле (6) вычисляется следующим образом:

$$\frac{G\rho_i \cdot v_i}{r_i^2} = -G\rho_i \int_{\xi_1}^{\xi_2} \int_{\eta_1}^{\eta_2} \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} \left[ (\xi - x) \ln(\eta + R) + \eta \ln[(\xi - x) + R] + \zeta \arctg\left(\frac{\eta}{\zeta}\right) - \zeta \arctg\left(\frac{(\xi - x)\eta}{\zeta R}\right) \right] dx dy dz, \quad (8)$$

где  $G$  – гравитационная постоянная,  $\rho_i$  – плотность пород,  $\xi_1$  и  $\xi_2$  – координаты углов по оси X,  $\eta_1$  и  $\eta_2$  – координаты углов по оси Y,  $\zeta_1$  и  $\zeta_2$  – координаты углов по оси Z.  $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ , где  $x$ ,  $y$  и  $z$  – координаты точки вычислений.

Для двух соседних точек  $g_N$  и  $g_{N+1}$  по формулам (4), (5), (8) и (7) определяются значения  $\Delta g_{\Delta\rho N}$  и  $\Delta g_{\Delta\rho N+1}$ , на основе которых проводится интерполирование в промежуточную  $i$ -ю точку (рисунок 3) по формуле:

$$\Delta g_{\Delta\rho_i}^{umm} = \Delta g_{\Delta\rho N} + \frac{\Delta g_{\Delta\rho N+1} - \Delta g_{\Delta\rho N}}{L} \Delta l, \quad (9)$$

где  $\Delta g_{\Delta\rho_i}^{umm}$  – интерполированное значение аномальной составляющей УСП,  $\Delta g_{\Delta\rho N}$  и  $\Delta g_{\Delta\rho N+1}$  – вычисленные по формуле (7) аномальные составляющие УСП в крайних точках профиля интерполяции,  $L$  – длина профиля интерполяции,  $\Delta l$  – интервал интерполяции.

В результате, значение УСП в  $i$ -й точке  $g_i^{6blч}$  можно определить по формуле:

$$g_i^{6blч} = (\gamma_0 + \delta g_h + \Delta g_H)_i^{6blч} + \Delta g_{\Delta\rho_i}^{umm}. \quad (10)$$

Проверка погрешности интерполяции метода № 2 выполнялась на примере трех экспериментальных измерительных профилей Московского гравиметрического полигона, характеристики которых представлены ранее. Вычисление  $\Delta g_{\Delta\rho_N}^{6blч}$  и  $\Delta g_{\Delta\rho_{N+1}}^{6blч}$  для крайних точек профилей были выполнены по формулам (8), (4), (5), (7), по цифровой карте рельефа на Московскую область и модели ТороDensТ. Погрешность вычисления значений  $\Delta g_{\Delta\rho_N}^{6blч}$  и  $\Delta g_{\Delta\rho_{N+1}}^{6blч}$  составила 0,05 мГал. Далее по формуле (9) была выполнена интерполяция значений

$\Delta g_{\Delta\rho-i}^{инт}$  в промежуточные точки  $g_i^{выч}$  экспериментальных профилей. Значения  $g_i^{выч}$  в промежуточных точках профилей вычислялись по формулам (4), (5), (8), (10), по цифровой карте рельефа на Московскую область и модели TopoDensT. В вычислениях использовались результаты реальных измерений координат точек профилей. Далее вычисляется разность  $\sigma g^{(2)} = g_i^{выч} - g_i^{изм}$ . Результаты оценки разности  $\sigma g^{(2)}$  приведены в таблице 1 (столбцы 5 и 7). Отсюда видно, что разности  $\sigma g^{(2)}$  существенно меньше, а отношение  $|\sigma g^{(1)}| / |\sigma g^{(2)}|$  меняется от 1 до 20.

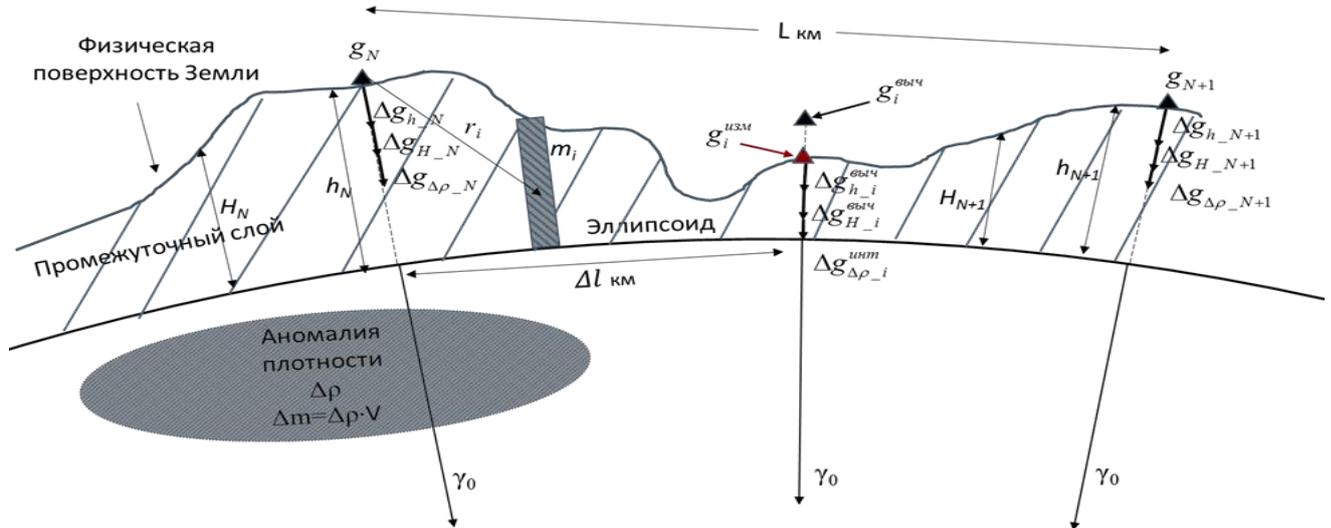


Рисунок 3 – Схема реализации метода № 2

Как видно из таблицы, для Московского гравиметрического полигона погрешность интерполяции методом №1 составила от 0,1 до 3,3 мГал, что не удовлетворяет требованию к погрешности навигационных гравитационных карт УСП. Погрешность интерполяции УСП методом № 2 составила от 0,1 до 0,7 мГал, что существенно меньше (в 4-5 раз), чем при использовании метода № 1.

Преимуществами метода № 2 является малая величина погрешности и высокая детальность созданных карт УСП (1 км). Метод применим для доступных территорий, для которых существует возможность измерить координаты точек  $g_i^{выч}$ . Для труднодоступных территорий необходимы дополнительные исследования применимости метода.

Разработанный метод удовлетворяет требованиям по точности и детальности создания навигационных гравитационных карт УСП для полигона на основе дополнительного учета влияния рельефа и плотности пород литосферы.

В Главе 3 приводятся результаты разработки метода создания навигационных гравитационных карт на труднодоступные территории на основе цифровых моделей рельефа и моделей плотности пород.

#### Создание карт УСП

Отличительной особенностью труднодоступных территорий является отсутствие возможности выполнить измерения координат пунктов, а также значений УСП или гравитационных градиентов для этих пунктов. В работе показан пример применения метода № 2 для создания навигационных гравитационных карт УСП на труднодоступную территорию.

Для этого на Московском полигоне выполнена последовательность действий по приведенному выше методу № 2 для определения значений  $g_i^{выч}$  в промежуточные точки измерительных профилей. Это выполнялось при условии, что высоты промежуточных точек определялись по цифровой модели рельефа. Результаты оценки погрешности интерполяции  $\sigma g^{(2)} = g_i^{выч} - g_i^{изм}$  представлены в таблице 2.

Таблица 2. Разность  $g_i^{6bl4}$  и  $g_i^{изм}$  значений УСП для варианта труднодоступной территории

№ профиля Московского полигона	Средняя величина $\sigma g^{(2)} = g_i^{6bl4} - g_i^{изм}$ по профилю, мГал
1	1.9
2	1.7
3	1.8

Из данной таблицы следует, что погрешности созданных карт УСП удовлетворяют требованиям к навигационным гравитационным картам.

Далее на основе характеристик погрешности цифровой модели рельефа и модели ToroDensT сформулированы требования к допустимой погрешности составляющих в уравнении (10), необходимые для создания карт УСП с погрешностью не более 2 мГал:

- $\sigma(\gamma_0 + \delta g_h + \Delta g_H)_i^{6bl4}$  не более **1,6 мГал**;
- $\sigma(\Delta g_{\Delta\rho\_i}^{инт})$  не более **1,2 мГал**.

Эти требования вычислялись через погрешности параметров, входящих в формулы (4), (5), (7) и (8) путем вычисления дифференциалов.

В качестве примера отработки метода № 2 для труднодоступных территорий представлена созданная навигационная гравитационная карта УСП на гравиметрический полигон «Kauring airborne gravity test site» (Австралия) (рисунок 4). На основе приведенного выше метода № 2 получено, что погрешность карты составляет 1,9 мГал при дискретности 1 км. Это полностью удовлетворяет предъявляемым требованиям к навигационным гравитационным картам УСП.

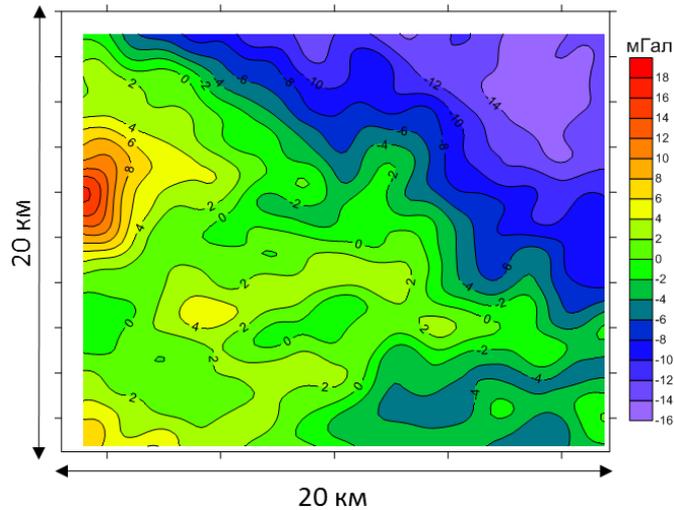


Рисунок 4 – Созданная навигационная гравитационная карта УСП на гравиметрический полигон «Kauring airborne gravity test site»

#### Создание навигационных гравитационных карт гравитационных градиентов

В Главе 1 показано, что для наиболее перспективных градиентометров измеряемыми гравитационными градиентами являются составляющие  $W_{\Delta}$  и  $w_{xy}$ , где  $W_{\Delta} = W_{yy} - W_{xx}$ .

Как и для карт УСП, создание навигационных гравитационных карт гравитационных градиентов  $W_{\Delta}$  и  $w_{xy}$  возможно двумя методами.

#### Метод № 1. Интерполяция значений гравитационных градиентов

По аналогии с методом №1, рассмотренным в главе 2, уравнение интерполяции гравитационных градиентов  $W_{\alpha\beta}$  определяется формулой:

$$W_{\alpha\beta\_i}^{инт} = W_{\alpha\beta\_N} + \frac{W_{\alpha\beta\_N+1} - W_{\alpha\beta\_N}}{L} \Delta l, \quad (11)$$

где  $W_{\alpha\beta-i}^{инт}$  - интерполированное значение гравитационного градиента,  $W_{\alpha\beta-N}$  и  $W_{\alpha\beta-N+1}$  - известные значения гравитационных градиентов в крайних точках профиля интерполяции,  $L$  - длина профиля интерполяции,  $\Delta l$  - интервал интерполяции.

Проверка применимости метода выполнена на примере ограниченно опубликованных результатов воздушных геофизических исследований для известной территории. Для указанной ограниченной территории доступны по публикациям координаты и высоты измерительных профилей, измеренные значения  $W_{\Delta-i}^{изм}$  и  $W_{xy-i}^{изм}$  с погрешностью менее 3 Этвеш.

Оценка погрешности интерполяции выполнена по разности  $\sigma W_{\Delta}^{(1)} = W_{\Delta-i}^{инт} - W_{\Delta-i}^{изм}$  и  $\sigma W_{xy}^{(1)} = W_{xy-i}^{инт} - W_{xy-i}^{изм}$ . Результаты оценки погрешности интерполяции составили 19 и 13 Этвеш для  $\sigma W_{\Delta}^{(1)}$  и  $\sigma W_{xy}^{(1)}$  соответственно.

Таким образом, данный метод неприменим для создания навигационных гравитационных карт гравитационных градиентов с погрешностью менее 10 Этвеш.

### **Метод № 2. Метод вычисления составляющих гравитационных градиентов**

В связи с ограниченным количеством регионов с известными значениями гравитационных градиентов необходима разработка метода создания навигационных гравитационных карт гравитационных градиентов без привлечения результатов реальных измерений.

Гравитационный градиент  $W_{\alpha\beta}$  в любой точке поверхности Земли можно представить в виде суммы:

$$W_{\alpha\beta} = U_{\alpha\beta\gamma} + \Delta T_{\alpha\beta_H} + \Delta T_{\alpha\beta_{\Delta\rho}}, \quad (12)$$

где  $\alpha, \beta$  принимают значения  $x, y, z$ ;  $U_{\alpha\beta\gamma}$  - составляющие гравитационных градиентов нормального гравитационного поля, создаваемого земным эллипсоидом,  $\Delta T_{\alpha\beta_H}$  - аномальные составляющие гравитационных градиентов, вызванные влиянием пород промежуточного слоя, заключенного между поверхностью земного эллипсоида и физической поверхностью Земли,  $\Delta T_{\alpha\beta_{\Delta\rho}}$  - аномальные составляющие гравитационных градиентов, вызванные влиянием плотностных неоднородностей под поверхностью эллипсоида.

Применительно к составляющим  $W_{\Delta}$  и  $W_{xy}$  уравнение (12) представим в виде:

$$\begin{aligned} W_{\Delta} &= W_{yy} - W_{xx} = (U_{yy\gamma} + \Delta T_{yy_H} + \Delta T_{yy_{\Delta\rho}}) - (U_{xx\gamma} + \Delta T_{xx_H} + \Delta T_{xx_{\Delta\rho}}), \\ W_{xy} &= U_{xy\gamma} + \Delta T_{xy_H} + \Delta T_{xy_{\Delta\rho}} \end{aligned} \quad (13)$$

Составляющие гравитационных градиентов нормального гравитационного поля Земли находятся по известным формулам:

$$U_{xx\gamma} = -\frac{\gamma_0}{M}; \quad U_{yy\gamma} = -\frac{\gamma_0}{N}; \quad U_{xy\gamma} = 0, \quad (14)$$

где  $\gamma_0$  - нормальное гравитационное поле Земли, вычисляемое по формуле (4);  $M$  и  $N$  - радиус кривизны меридиана и первого вертикала соответственно.

Эти составляющие вычисляются по координатам наземной точки с погрешностью тысячные доли Этвеш.

Вторые члены в скобках (13) (слагаемые  $\Delta T_{xx_H}$ ,  $\Delta T_{yy_H}$ ,  $\Delta T_{xy_H}$ ) в общем виде вычисляются по формуле:

$$\Delta T_{\alpha\beta_H} = \sum_{20км} \frac{G\rho_i \cdot v_i}{r_i^3}, \quad (15)$$

где  $G$  - гравитационная постоянная,  $\rho_i$  - плотность элементарной ячейки пород промежуточного слоя,  $v_i$  - объем элементарной ячейки пород промежуточного слоя,  $r_i$  - расстояние до элементарной ячейки пород промежуточного слоя.

Вычисление этих составляющих имеет особенности. Формула (15) применима лишь в том случае, когда известна информация о высотах рельефа местности и значениях плотности пород вокруг точки вычислений.

Если информация о высотах рельефа представлена в виде набора прямоугольных вертикальных призм, то составляющая  $\frac{G\rho_i \cdot v_i}{r_i^3}$  в формуле (15) вычисляется в виде определенного интеграла при известных размерах призм:

$$\Delta T_{xx_H} = G\rho \int_{\xi_1}^{\xi_2} \int_{\eta_1}^{\eta_2} \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} \operatorname{arctg} \frac{(y-\eta)(z-\zeta)}{(x-\xi)R} dx dy dz, \quad (16)$$

$$\Delta T_{yy_H} = G\rho \int_{\xi_1}^{\xi_2} \int_{\eta_1}^{\eta_2} \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} \operatorname{arctg} \frac{(x-\xi)(z-\zeta)}{(y-\eta)R} dx dy dz, \quad (17)$$

$$\Delta T_{xy_H} = -G\rho \int_{\xi_1}^{\xi_2} \int_{\eta_1}^{\eta_2} \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} \ln((z-\zeta)+R) dx dy dz, \quad (18)$$

$$T_{\Delta} = \Delta T_{yy_H} - \Delta T_{xx_H}, \quad (19)$$

где  $G$  – гравитационная постоянная,  $\rho$  – плотность пород,  $\xi_1$  и  $\xi_2$  – координаты углов по оси X,  $\eta_1$  и  $\eta_2$  – координаты углов по оси Y,  $\zeta_1$  и  $\zeta_2$  – координаты углов по оси Z.  $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ , где  $x$ ,  $y$  и  $z$  координаты точки вычислений.

Оценка величины  $\Delta T_{\alpha\beta_{\Delta\rho}}$

Опубликованных сведений о величине аномальных составляющих  $\Delta T_{\alpha\beta_{\Delta\rho}}$  нет. Поэтому оценка величины аномальной составляющей  $\Delta T_{\alpha\beta_{\Delta\rho}}$  была выполнена путем вычислений. Для этого выполнено моделирование наиболее экстремальной ситуации в виде вертикального протяженного геологического тела, контрастного по плотности по отношению к вмещающим породам, выходящего на поверхность.

Условия моделирования:

- протяженность разлома 20 км поперек направления движения объекта навигации;
- ширина разлома 10 м;
- глубина залегания от 0 до 1 км;
- контраст плотности 1 г/см<sup>3</sup>.

Задача моделирования – оценить зону влияния этого разлома на результат измерений бортового градиентометра объекта навигации, приближающегося перпендикулярно к геометрическому центру разлома (рисунок 5). Для расчетов использовались формулы (16) – (19).

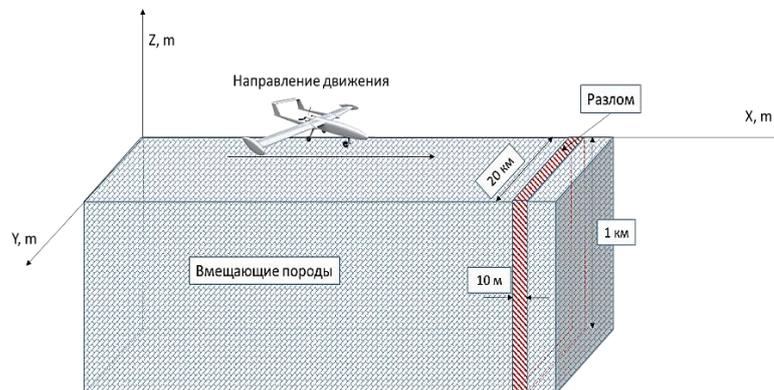


Рисунок 5 – Общая схема эксперимента

На рисунке 6 представлены результаты моделирования. Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод, что при высоте полета 100 метров над геологическим телом, влияние аномальной составляющей гравитационных градиентов, вызванной наличием плотностных неоднородностей, составляет менее 10 Этвеш, при высоте полета 250 м и выше – менее 6 Этвеш.

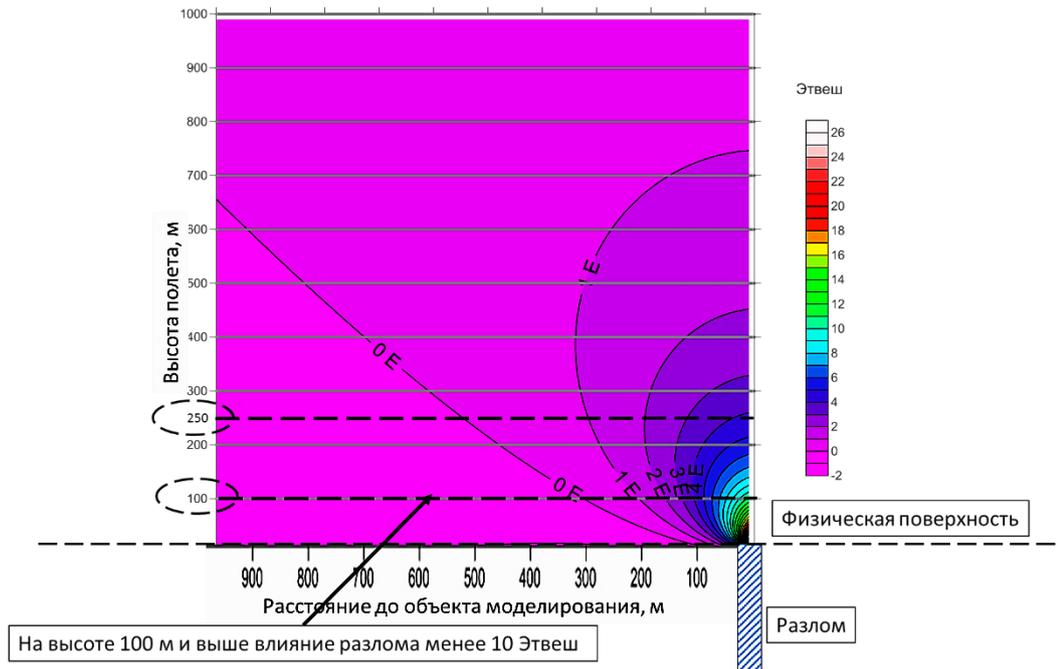


Рисунок 6 – Оценка влияния разлома на измерения  $T_{\Delta}$

Если предположить, что сведения о плотностных свойствах пород рельефа, заключенных между физической поверхностью Земли и поверхностью эллипсоида, известны, тогда можно переформулировать сделанный вывод - при высоте полета 250 м и выше над эллипсоидом (геодезическая высота) влиянием плотностных неоднородностей под поверхностью эллипсоида (т.е. членом  $\frac{\Delta T_{\alpha\beta\Delta\rho}}$ ) можно пренебречь.

Таким образом, для подготовки НГК составляющих  $W_{\Delta}$  и  $W_{xy}$  необходимо использовать формулы (14), (15) и (17) – (20) при соблюдении следующих условий:

1. геодезическая высота в районе подготовки карты больше 250 м;
2. наличие цифровой карты рельефа и модели TopoDensT.

Экспериментальная проверка сформулированных предположений была выполнена для известной территории. Вычисление  $W_{\Delta\_выч}$  и  $W_{xy\_выч}$  для пунктов измерительных профилей выполнено без учета аномальных составляющих  $\Delta T_{\alpha\beta\Delta\rho}$ . Использовалась ЦКР на эту территорию и значение плотности пород  $2,32 \text{ г/см}^3$  модели TopoDensT. На рисунке 7 представлен результат вычислений для отдельного измерительного профиля. Коричневая кривая – высоты рельефа, голубая – измеренные значения  $W_{\Delta\_изм}$ , оранжевая – вычисленные значения  $W_{\Delta\_выч}$ . СКО разности  $\delta W_{\Delta} = W_{\Delta\_изм} - W_{\Delta\_выч}$  составило менее 8 Этвеш.

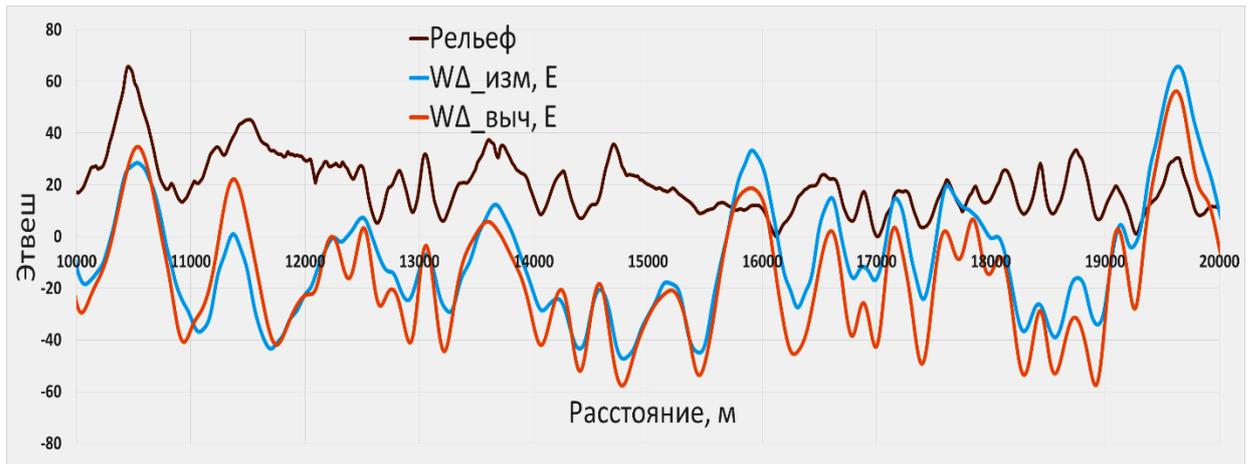


Рисунок 7 – Результаты вычислений  $W_{\Delta\_выч}$  на отдельном профиле

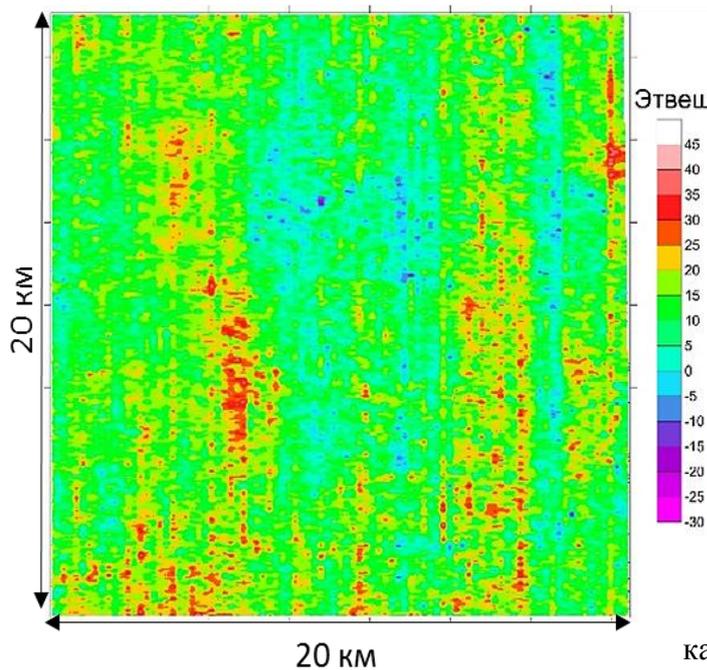


Рисунок 8 – Карта значений  $\delta W_{\Delta}$  с погрешностью не более 10 Этвеш и детальностью 1 км.

При соблюдении вышеуказанных условий формула (13) упрощается:

$$W_{\Delta} = W_{yy} - W_{xx} = (U_{yy_{\gamma}} + \Delta T_{yy_H}) - (U_{xx_{\gamma}} + \Delta T_{xx_H}), \quad (20)$$

$$W_{xy} = U_{xy_{\gamma}} + \Delta T_{xy_H}.$$

Дополнительно выполнены исследования ожидаемой навигационной информативности карт  $W_{\Delta}$  и  $W_{xy}$  для объекта, передвигающегося вдоль русла горного ущелья на различных высотах. Показано, что при погрешности бортового градиентометра 1 Этвеш ожидаемая СКО навигации не превышает до 90 м.

Таким образом, разработанный метод создания навигационных гравитационных карт УСП и гравитационных градиентов на труднодоступные территории на основе цифровых моделей рельефа и моделей плотности пород удовлетворяет предъявляемым требованиям по точности и детальности.

*Оценка возможности калибровки спутниковых градиентометров по наземным измерениям*

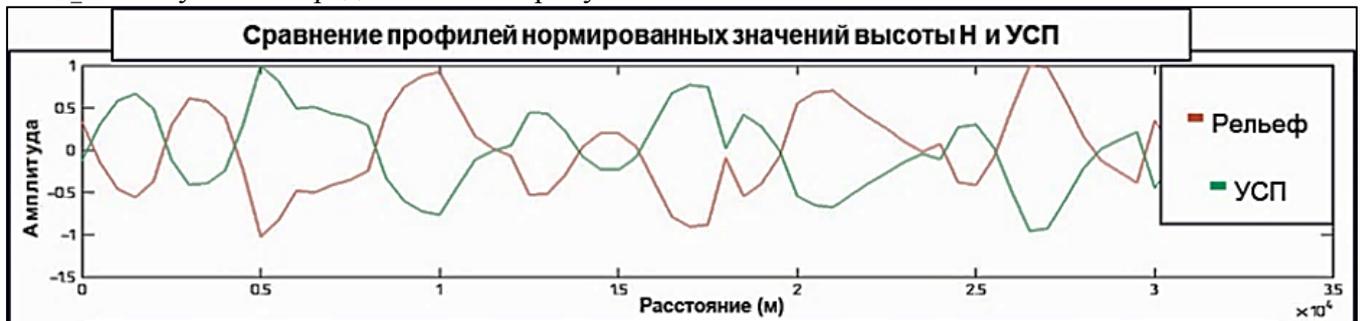
В настоящее время создание перспективной космической геодезической системы заключается не только в создании спутниковых измерителей параметров ГПЗ (УСП

На рисунке 8 представлена карта значений  $\delta W_{\Delta}$  для всей площади исследований. Среднее значение  $\delta W_{\Delta}$  составляет +12 Этвеш, при этом СКО  $\delta W_{\Delta}$  - 6 Этвеш. Зависимости между концентрацией зон повышенных значений  $\delta W_{\Delta}$  и характерными формами рельефа не наблюдается. Для составляющей  $\delta W_{xy}$  СКО разности также составило 6 Этвеш.

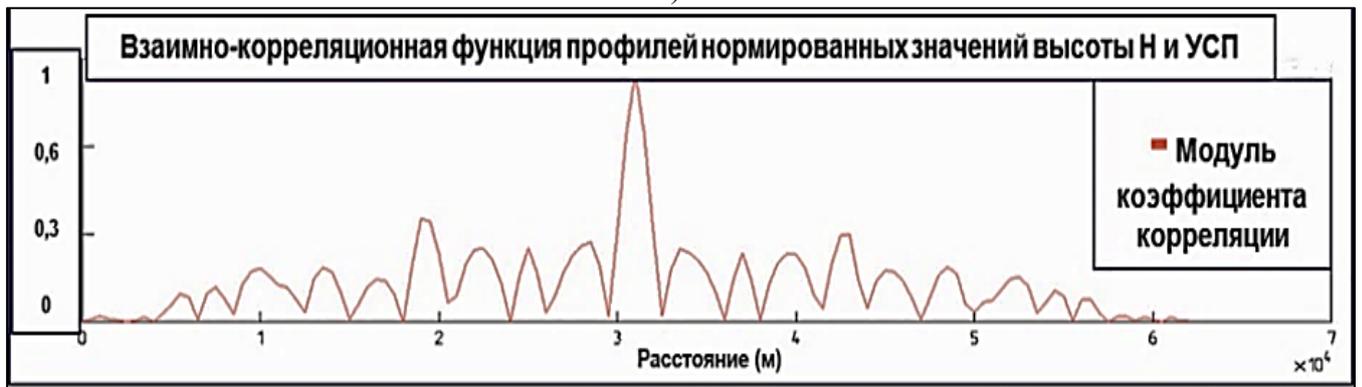
Малая величина СКО разности подтверждает сформулированные предположения о предельной высоте влияния плотностных неоднородностей, а также подтверждает возможность создания навигационных гравитационных карт  $W_{\Delta}$  и  $W_{xy}$  по цифровой карте рельефа и модели плотности TopoDensT с погрешностью не более 10 Этвеш и детальностью 1 км.

и гравитационных градиентов), но и в разработке методов их калибровки на наземных полигонах. Предполагается, что наземные полигоны калибровки будут располагаться на доступной территории и обладать набором измерительных данных значений ускорения свободного падения и гравитационных градиентов. Однако такой метод калибровки является локальным и не позволит выполнить оценку качества измерительной информации над недоступными территориями.

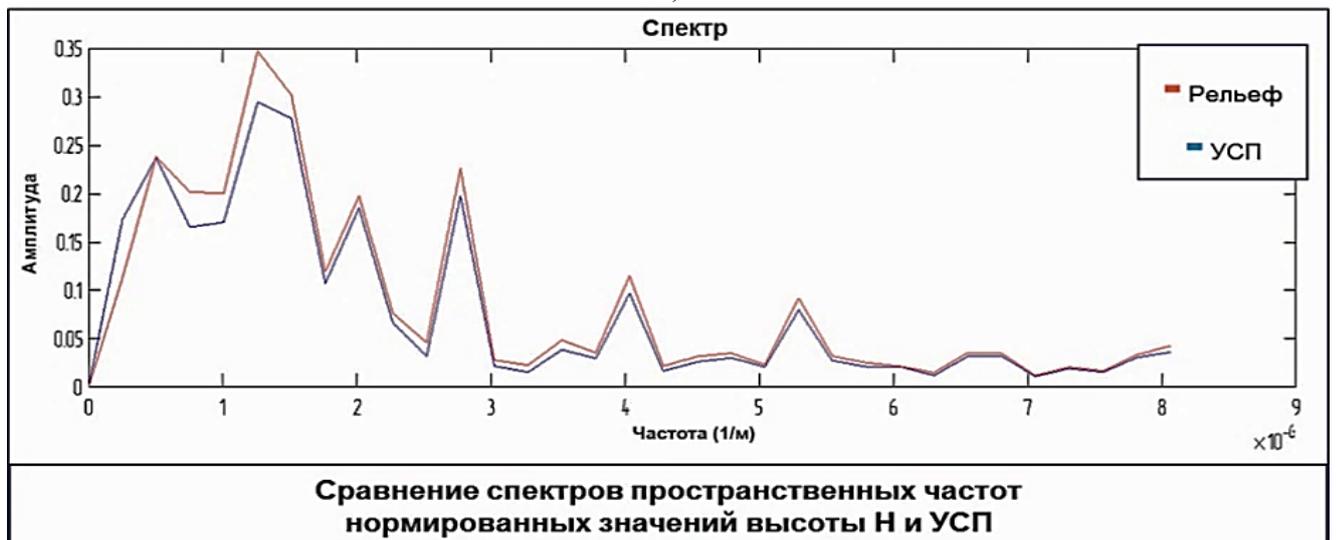
Один из возможных методов оценки корректной работы спутниковых измерителей параметров ГПЗ основан на использовании цифровых карт рельефа. Для подтверждения возможности использования цифровых карт рельефа необходимо выполнить оценку корреляционных зависимостей между изменениями рельефа местности и параметрами ГПЗ. На примере известных территорий показаны графики взаимно-корреляционной функции нормированных значений высот рельефа, ускорения свободного падения и составляющих  $W_{\Delta\_изм}$  и  $W_{\Delta\_выч}$ . Результаты представлены на рисунках 9 и 10.



а)



б)



в)

Рисунок 9 - Корреляционные и спектральные характеристики профиля высот рельефа и ускорения свободного падения

На рисунке 9а приведены профили изменения рельефа и УСП. На графике рисунка 9б чётко прослеживается корреляционная связь профиля УСП и профиля высот рельефа. При этом спектральные составляющие пространственных частот УСП и высот рельефа практически полностью совпадают (рисунок 9в).

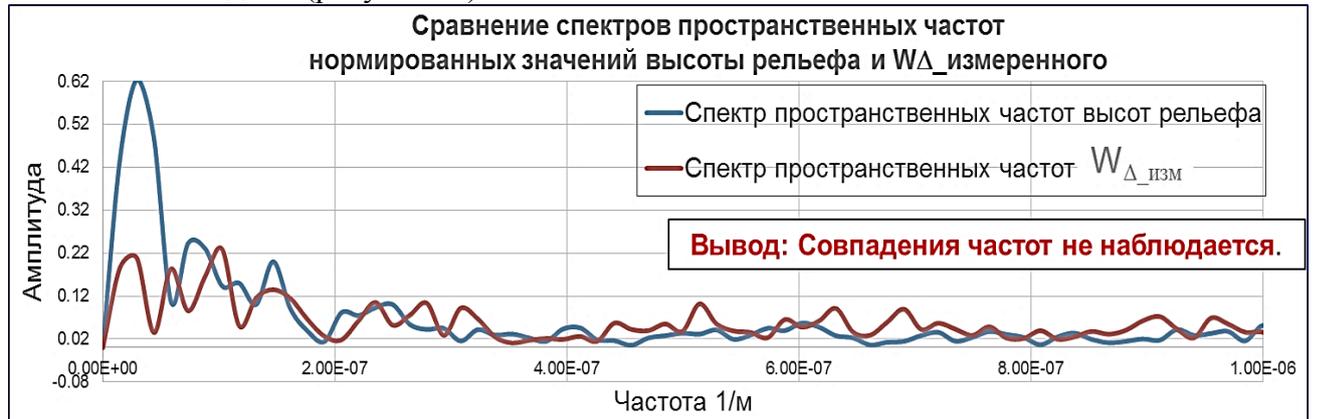


Рисунок 10 - Корреляционные и спектральные характеристики профиля высот рельефа и гравитационных градиентов

Спектральные составляющие пространственных частот  $W_{\Delta}$  изм и высот рельефа не совпадают (рисунок 10а), однако спектральные составляющие пространственных частот  $W_{\Delta}$  изм и  $W_{\Delta}$  выч совпадают практически полностью. Наблюдается практически полная корреляция между измеренными значениями  $W_{\Delta}$  изм и  $W_{\Delta}$  выч (рисунок 10б,в).

Таким образом, можно утверждать, что спектральные составляющие параметров ГПЗ, измеренные перспективной космической геодезической системой, должны практически полностью совпадать с пространственными частотами рельефа в части УСП и пространственными частотами гравитационных градиентов. Сделанные выводы подтверждают возможность использования информации о рельефе местности для первичной верификации

результатов спутниковых измерений параметров ГПЗ.

**В Главе 4** рассмотрены два основных способа создания навигационных гравитационных карт параметров ГПЗ внутри закрытых помещений:

- на основе моделирования составляющих УСП и гравитационных градиентов с помощью аналитических зависимостей;
- на основе реальных измерений, выполненных с помощью специальных высокоточных гравиметров и градиентометров.

В работе показана возможность использования информации о геометрических размерах помещений простой конструкции для моделирования пространственного распределения значений УСП,  $W_{\Delta}$  и  $W_{xy}$  по формулам (8), (16 – 19). Рассчитана теоретическая погрешность метода моделирования параметров ГПЗ путем вычисления дифференциалов по частным производным в формулах (8), (16 – 19). Из результатов вычислений следует, что достижимая погрешность моделирования значений УСП,  $W_{\Delta}$  и  $W_{xy}$  составляет 1 мкГал и 2,5 Этвеш на удалении 1 м от стен помещения.

В работе приведены результаты моделирования параметров ГПЗ для здания простой конструкции. На рисунке 11 представлен результат моделирования составляющей  $W_{\Delta}$  для трехэтажного здания. Аналогичные карты созданы для значений УСП и  $W_{xy}$ . По результатам анализа характера распределения параметров ГПЗ внутри здания отмечено, что значения УСП изменяются в пределах первых десятков мкГал в плане, при этом средний уровень значений УСП для каждого этажа здания уникален. Значения  $W_{\Delta}$  и  $W_{xy}$  практически не меняются в зависимости от этажа здания, однако в плане изменения достигают 200 Этвеш. Анализ полученных особенностей распределения параметров ГПЗ позволил выполнить приближенную оценку их навигационной информативности для датчиков различного класса точности.

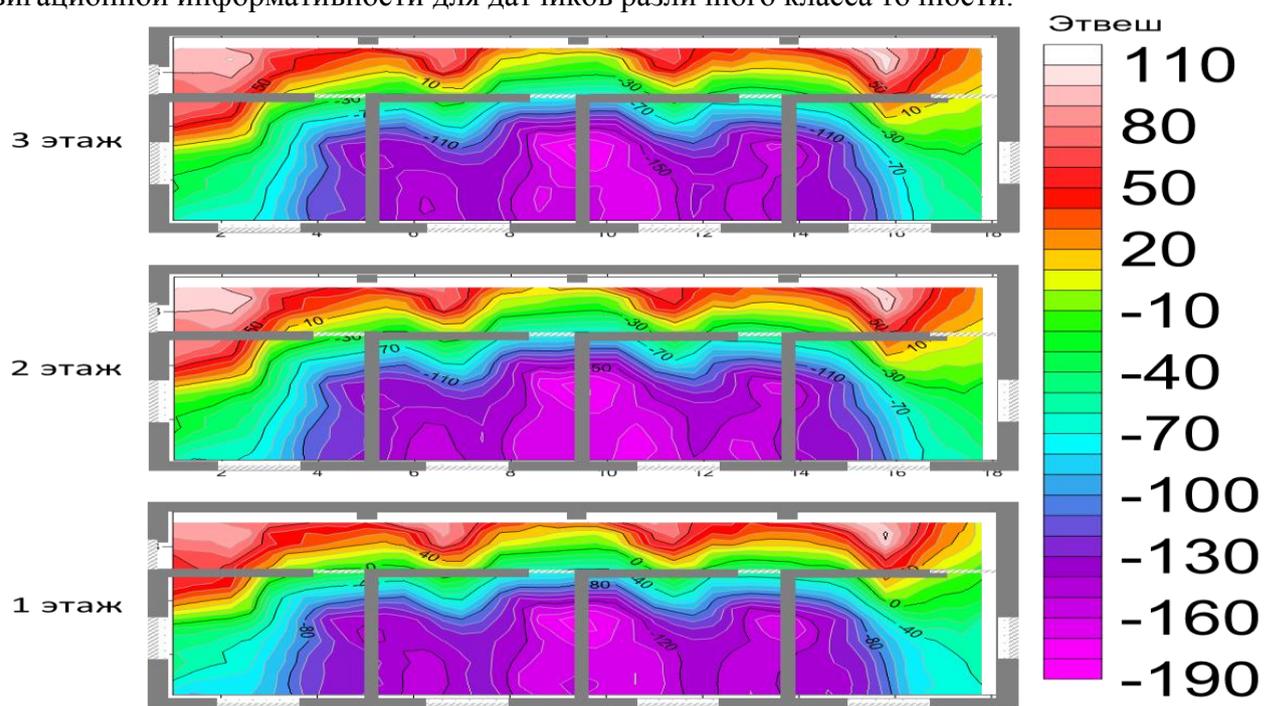


Рисунок 11 – Поэтажная карта распределения  $W_{\Delta}$  внутри здания

В таблице 3 представлены предварительные результаты вычислений.

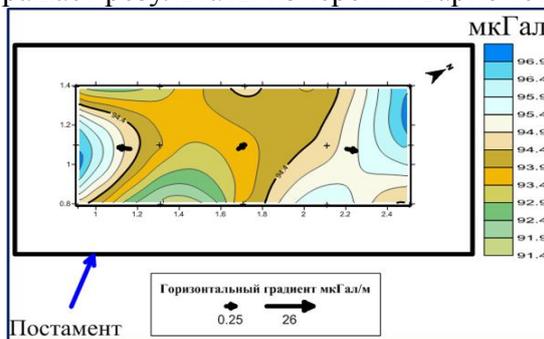
Из представленных вычислений сделан вывод, что наилучшей комбинацией измерителей в составе навигационной системы для обеспечения навигации внутри здания будет мобильный гравиметр с погрешностью не хуже 200 мкГал для высотной привязки потребителя между этажами и мобильный градиентометр с погрешностью не хуже 20 Этвеш для плановой привязки потребителя на этаже. Дополнительно необходимо наличие магнитометра для определения ориентации потребителя в направлении Север-Юг для корректного учета знака измеряемых градиентов  $W_{\Delta}$  и  $W_{xy}$ .

Таблица 3. Приближенная оценка навигационной информативности параметров ГПЗ внутри зданий

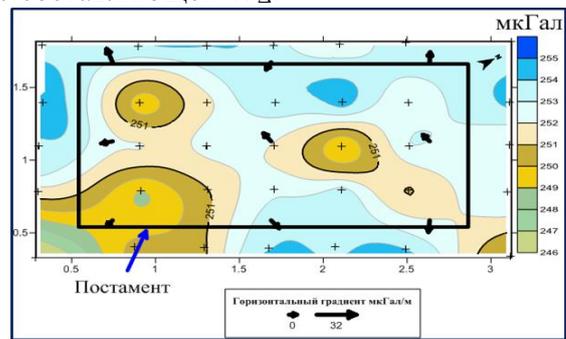
Погрешность Гравиметра, мкГал	Градиент поля в плане, мкГал/м	Ожидаемое СКО определения плановых координат, м	Градиент поля по высоте, мкГал/м	Ожидаемое СКО определения высоты, м
10	0,1	100	300	<b>0.03</b>
50		500		<b>0.2</b>
100		1000		<b>0.4</b>
200		2000		<b>0.7</b>
Погрешность Градиентометра, Этвеш	Градиент поля в плане, Этвеш/м	Ожидаемое СКО определения плановых координат, м	Градиент поля по высоте, Этвеш/м	Ожидаемое СКО определения высоты, м
1	10	<b>0.1</b>	0.1	10
5		<b>0.5</b>		50
10		<b>1</b>		100
20		<b>2</b>		200

В работе отмечено, что метод моделирования для создания НГК ГПЗ применим только в случае знания детальной информации об объекте моделирования: геометрических размеров элементов помещений, значений плотности материалов конструктивных элементов и т.д. В случае отсутствия указанной информации, единственной возможностью создания навигационных гравитационных карт ГПЗ является метод на основе реальных измерений при помощи гравиметров и градиентометров.

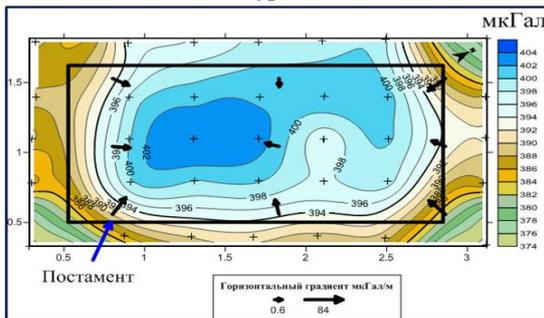
Приведены результаты реальных измерений УСП,  $W_{\Delta}$  и  $W_{xy}$ , полученные при помощи высокоточных относительных гравиметров типа CG-5 Autograv и гравитационного вариометра E-60. Достигнутая погрешность измерений составила 1 мкГал и 4 Этвеш соответственно. На рисунке 12 представлены результаты реального распределения УСП на примере помещения № 013, в котором установлен стенд гравиметрический из состава Государственного вторичного эталона единицы ускорения свободного падения в диапазоне от 9,77 до 9,85 м/с<sup>2</sup>. Рисунок 13 отражает результаты измерений вариометра E-60 составляющей  $W_{\Delta}$ .



Изменения УСП на уровне 1,4 м над стендом



Изменения УСП на уровне 0,9 м над стендом



Изменения УСП на уровне 0,4 м над стендом

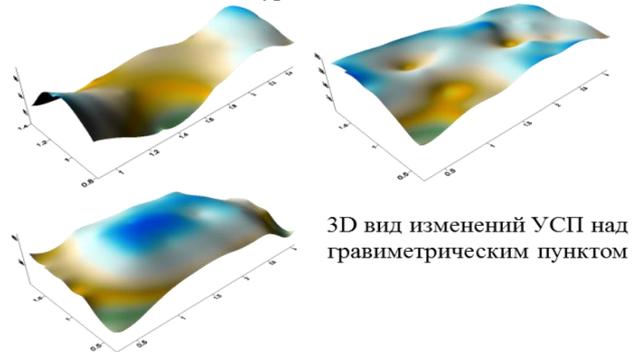


Рисунок 12 – Навигационные гравитационные карты УСП над стендом в помещении №013

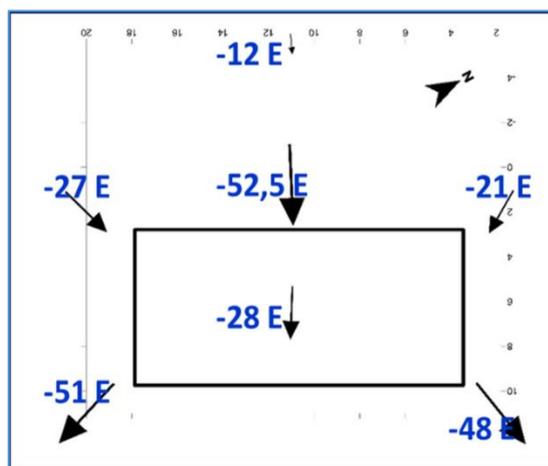


Рисунок 13 - Схема постаментов. Величина составляющей градиента  $W_{\Delta}$  над постаментом

На основе результатов измерений выполнена оценка погрешности моделирования. Показано, что погрешность моделирования значений УСП над стендом гравиметрическим составила 1,5 мкГал, гравитационных градиентов – 8 Этвеш.

Кроме того, в работе предложено использование метода моделирования параметров ГПЗ в помещениях простой конструкции для калибровки разрабатываемых гравитационных градиентомеров в целях исключения необходимости в изготовлении дорогостоящих стендов с калибровочными массами, как это традиционно делается в настоящее время.

Таким образом, разработаны:

- метод создания навигационных гравитационных карт ГПЗ внутри помещений простой конструкции на основе моделирования составляющих гравитационного поля. Достижимая погрешность метода составила 1,5 мкГал для значений УСП и 8 Этвеш для составляющих  $W_{\Delta}$  и  $W_{xy}$ ;

- метод создания навигационных гравитационных карт для зданий сложной конструкции основе реальных измерений, выполненных с помощью специальных высокоточных гравиметров и градиентомеров;

- выполнена приближенная оценка навигационной информативности параметров ГПЗ: ожидаемая погрешность навигации внутри зданий составила 2 м в плане и менее 1 м по высоте.

**В Главе 5** представлено обоснование облика комплекса подготовки навигационных гравитационных карт: сформирован перечень основных задач, обоснованы требования к составу измерительного оборудования, разработана методика применения, представлены результаты опробования и реально полученные карты.

Основными задачами комплекса являются:

- измерение параметров ГПЗ вдоль выбранного маршрута;
- геодезическая привязка точек измерения параметров ГПЗ;
- формирование базы данных измерений и первичная обработка результатов измерений на бортовом автоматизированном рабочем месте;

- подготовка навигационных гравитационных карт с помощью стационарного автоматизированного рабочего места;

- оценка степени покрытия и характеристик точности гравитационных параметров для заданного района по имеющейся в открытом доступе информации;

- выбор средств измерений;

- проведение измерений в выбранных точках;

- обработка измерительной информации;

- формирование цифровой карты с соответствующим измерительным параметром ГПЗ (слоем) и, на ее основе, навигационной гравитационной карты;

- оценка качества полученной навигационной гравитационной карты.

На рисунке 14 представлен предлагаемый состав основных измерительных средств комплекса подготовки навигационных гравитационных карт.

В работе приведены результаты экспериментального опробования созданного в инициативном порядке и при непосредственном участии автора прототипа комплекса подготовки навигационных гравитационных карт на локальном гравиметрическом полигоне Московской области. Приведены методики применения комплекса по выполнению последовательности действий, необходимых для создания навигационных гравитационных карт (слоев) параметров ГПЗ на локальном гравиметрическом полигоне. Показаны созданные слои аномалий УСП, составляющих уклонения отвесной линии и гравитационных градиентов. Создана шестислойная навигационная гравитационная карта (УСП,  $W_{zx}$ ,  $W_{zy}$ ,  $W_{zz}$ ,  $УОЛ_{\xi}$ ,  $УОЛ_{\eta}$ ). Пример одного из 6 слоев карты - карты УСП представлен на рисунке 15.

Приведено описание основных функций специального программного обеспечения, созданного автором в программной среде C++, показан алгоритм его работы и формат выходной гравиметрической информации. Специальное программное обеспечение позволяет выполнять загрузку файлов цифровых карт рельефа, модели  $ToroDensT$ , параметров зданий. Выходной информацией работы специального программного обеспечения являются файлы формата X, Y, H,  $\Delta g_{\Delta H_i}$ ,  $W_{\Delta}$ ,  $W_{xy}$ .



Рисунок 14 – Структура КНГК.

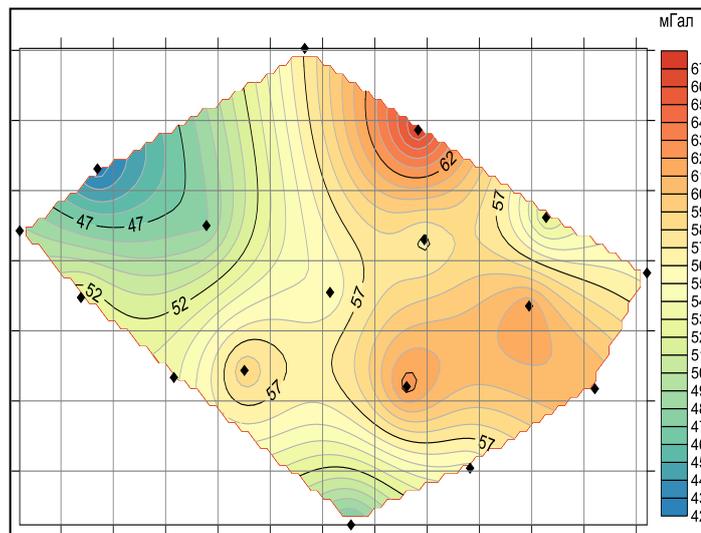


Рисунок 15 – Созданная карта УСП в условном уровне

Дополнительно функциональные возможности специального программного обеспечения расширены за счет включения блока, отвечающего за моделирование работы бортового

градиентометра гантельного типа. В основу легли известные уравнения колебательной системы гантельного типа, входящей информацией для которых является величина опорного напряжения и его погрешность, добротность колебательных систем и погрешность их определения, а также навигационная гравитационная карта гравитационных градиентов. Выходной файл содержит результаты измерений макета градиентометра для оценки его погрешности при выбранных технических параметрах датчика. На рисунке 16 представлена структура специального программного обеспечения и алгоритм его работы.

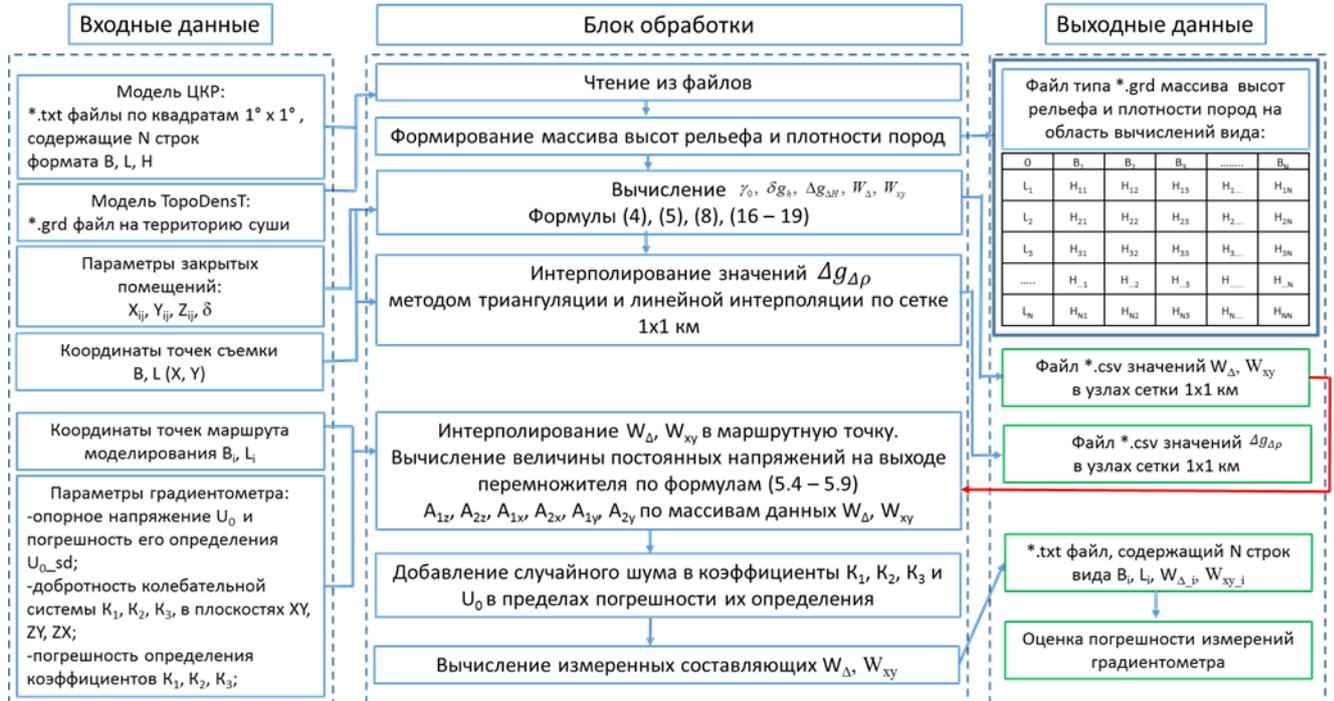


Рисунок 16 – Структура специального программного обеспечения и алгоритм вычислений

По результатам экспериментального опробования комплекса подготовки навигационных гравитационных карт сформирован перечень требований по его доработке в целях повышения эффективности использования.

**В заключении** приводятся основные научные результаты диссертации:

1. Впервые применен метод совместного использования цифровых карт рельефа и модели плотности пород для повышения точности и детальности создаваемых навигационных гравитационных карт УСП.

2. Разработан метод создания навигационных гравитационных карт на труднодоступные территории на основе цифровых моделей рельефа и моделей плотности пород. Экспериментально доказана достижимая погрешность созданных карт параметров ГПЗ.

3. Разработан метод создания навигационных гравитационных карт внутри зданий и закрытых помещений. Экспериментально доказана достижимая погрешность созданных карт параметров ГПЗ.

4. Обоснованы требования, сформирован облик и методика применения комплекса создания навигационных гравитационных карт. Разработано специальное программное обеспечение для создания навигационных гравитационных карт и моделирования измерений при помощи градиентометров гантельного типа.

Таким образом, в диссертационной работе решена задача по разработке методов и средств повышения точности и детальности создания навигационных гравитационных карт на основе дополнительного учета рельефа местности и модели плотности пород рельефа, удовлетворяющих требованиям по погрешности УСП - лучше 2 мГал, по гравитационным градиентам лучше 10 ЭТВеш, с детальностью 1 км.

Цель диссертационной работы достигнута.

### СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Бобров Д.С., Фатеев В.Ф. Исследование возможности вычисления производных геопотенциала по цифровым картам рельефа // Альманах современной метрологии. № 2. 2020 С.18-28.

2. Бобров Д.С. Методы подготовки опорных навигационных гравиметрических карт на основе данных о рельефе местности // Альманах современной метрологии. № 4. 2020 – в печати

3. Бобров Д.С., Фатеев В.Ф., Гостев Ю.В., Рыбаков Е.А., Карапетян М.Н., Давлатов Р.А., Долгодуш А.О., Москвитин Ю.В. Макет системы навигации по геофизическим полям Земли // Альманах современной метрологии. № 4. 2020 – в печати

4. Бобров Д.С., Лопатин В.П. Результаты экспериментальных исследований по оценке неприливных вариаций ускорения свободного падения // Альманах современной метрологии. № 3. 2020 – в печати

5. Bobrov D.S., Denisenko O.V., Silvestrov I.S., Fateev V.F., [Kopaev A.V.] High-precision gravity observations on testing grounds of FSUE 'VNIIFTRI' sites // В сборнике: Proceedings of the 4<sup>th</sup> IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM 2016) С. 143-148.

6. Bobrov D.S., Fateev V.F. Investigation of the possibility of calculating geopotential derivatives from digital terrain maps // издательство Springer 2020 – в печати.

7. Бобров Д.С., Фатеев В.Ф., Гостев Ю.В., Мурзабеков М.М., Давлатов Р.А., Кузьмин Н.И., Долгодуш А.О. Результаты подготовки навигационно-гравиметрической и навигационно-магнитометрической карт в интересах реализации ассистирующей технологии ГЛОНАСС // в книге: «Метрология времени и пространства. Материалы IX Международного симпозиума». 2018. С. 200-201.

8. Бобров Д.С., Фатеев В.Ф., Сильвестров И.С., Давлатов Р.А., Лопатин В.П., Кузьмин Н.И. Создание комплексной измерительной площадки на территории ФГУП "ВНИИФТРИ" для метрологического обеспечения измерений параметров гравитационного поля земли. В сборнике: Навигация по гравитационному полю Земли и ее метрологическое обеспечение Доклады научно-технической конференции. 2017. С. 258-267.

9. Бобров Д.С., Денисенко О.В., Сильвестров И.С., Фатеев В.Ф., Давлатов Р.А., Мурзабеков М.М., Рыбаков Е.А. Система гравиметрических измерений, выполненных ФГУП «ВНИИФТРИ» в интересах повышения точности модели ГПЗ и создания новых измерительных приборов // в книге: «Навигация по гравитационному полю Земли и ее метрологическое обеспечение». 2017. С. 277-282.

10. Бобров Д.С., Фатеев В.Ф., Долгодуш А.О., Давлатов Р.А. Результаты измерения горизонтального гравитационного градиента на гравиметрическом пункте ФГУП "ВНИИФТРИ" с помощью вариометра Е-60. В сборнике: Навигация по гравитационному полю Земли и ее метрологическое обеспечение Доклады научно-технической конференции. 2017. С. 272-276.

11. Бобров Д.С., Кузнецов И.Е., Кузнецов Д.А., Боруздина М.Д. Использование методов гравиразведки для исследования распределения плотности серы на серных картах // Вести газовой науки. 2015-№1. с.67-77

#### Аттестованные методики измерений

1. Бобров Д.С., Фатеев В.Ф. «Методика измерений ускорения свободного падения с использованием гравиметра CG-5 Autograv», свидетельство об аттестации МИ № 284-RA.RU.311243-2016 от 24.11.2016 г.

#### Свидетельство о государственной регистрации базы данных

1. Бобров Д.С., Денисенко О.В., Сильвестров И.С., Фатеев В.Ф., Давлатов Р.А. Свидетельство о регистрации базы данных RU 2018621380, 28.08.2018. Заявка № 2018621129 от 08.08.2018.

ФГУП «ВНИИФТРИ». Подписано в печать 18.09.2020.

Объем 1 п. л. Тираж 100 экз. Заказ №125

---

Полиграф. участок ФГУП «ВНИИФТРИ». 141570, п/о Менделеево,  
г.о. Солнечногорск, Московской обл.