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

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

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор,

Заслуженный деятель науки РФ, начальник НТЦ

Фатеев Вячеслав Филиппович

Менделеево 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 6
1 Анализ состояния методов и средств создания (построения) навигационных гравитационных карт, выбор направления разработки новых методов 13
1.1 Требования к точности автономных навигационных систем по ГПЗ 13
1.1.1 Оценка навигационных возможностей гравиметрических КЭНС, основанных на измерении аномалии силы тяжести 15
1.1.2 Оценка навигационных возможностей КЭНС, основанных на измерении гравитационных градиентов 16
1.1.3 Обзор обеспеченности КЭНС цифровым картографическим материалом 19
1.1.4 Выводы по разделу 1.1 19
1.2 Обзор состояния изученности гравитационного поля Земли 20
1.2.1 Методы анализа изученности гравитационного поля Земли 20
1.2.2 Изученность аномального гравитационного поля Земли 28
1.2.3 Стабильность ускорения свободного падения ГПЗ во времени 31
1.2.4 Выводы по разделу 1.2 35
1.3 Особенности создания навигационных гравитационных карт 36
1.3.1 Методы гравиметрической съемки для создания навигационных гравитационных карт 36
1.3.2 Краткий обзор бортовых гравиметров и градиентометров 44
1.3.3 Космическая съемка параметров ГПЗ 50
1.3.4 Методы создания карт параметров ГПЗ по глобальным моделям 52
1.3.5 Выводы по разделу 1.3 56
1.4 Выводы по главе 1 и постановка задач исследований 57
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..... 60
2.1 Исследования по оценке достижимой точности вычислений параметров ГПЗ на примере гравиметрических полигонов с известными характеристиками 60
2.1.1 Методика выполнения измерений на полигонах ФГУП «ВНИФТРИ»61
2.1.2 Оценка характеристик модели EGM2008 для территории Московской области..... 64
2.1.3 Оценка характеристик модели EGM2008 для территории Иркутской области..... 70
2.1.4 Оценка характеристик модели EGM2008 на испытательном гравиметрическом полигоне «Kauring airborne gravity test site», Западная Австралия 72
2.2 Экспериментальная оценка стабильности УСП во времени 74
2.2.1 Оценка вариаций УСП за счет изменения атмосферного давления ... 74
2.2.2 Оценка вариаций УСП за счет изменения влагонасыщенности пород77
2.2.3 Оценка долговременной стабильности значений УСП..... 80
2.3 Разработка метода повышения точности и детальности создания навигационных гравитационных карт УСП на основе дополнительного учета влияния рельефа и плотности пород литосферы 82
2.3.1 Метод №1. Метод простой интерполяции..... 82
2.3.2 Метод №2. Метод вычисления и интерполяции аномальных составляющих УСП..... 84
2.4 Выводы по главе 2..... 97
3 Разработка методов создания навигационных гравитационных карт на труднодоступные территории на основе цифровых моделей рельефа и модели

плотности пород 99

3.1 Оценка применимости метода №2 для подготовки навигационных гравитационных карт УСП на удаленные территории. 99

3.2 Разработка метода подготовки навигационных гравитационных карт гравитационных градиентов 101

3.3 Экспериментальная проверка возможности создания навигационной гравитационной карты гравитационных градиентов 101

3.3.1 Метод №1. Метод простой интерполяции 101

3.3.2 Метод №2. Метод вычисления составляющих гравитационных градиентов 103

3.3.3 Оценка навигационной информативности карт W_{xy} и W_{Δ} 111

3.3.4 Оценка возможности калибровки спутниковых градиентометров по наземным измерениям 115

3.4 Выводы по главе 3 119

4 Разработка метода создания навигационных гравитационных карт внутри зданий и закрытых помещений и оценка ожидаемого СКО определения координат 120

4.1 Условия моделирования параметров ГПЗ внутри типового помещения 120

4.1.1 Результаты моделирования пространственного распределения значений УСП внутри помещения 121

4.1.2 Результаты моделирования пространственного распределения гравитационных градиентов W_{Δ} 123

4.1.3 Моделирование пространственного распределения гравитационных градиентов W_{xy} 125

4.2 Моделирование параметров ГП внутри здания 128

4.2.1 Условия и результаты моделирования 128

4.2.2 Оценка особенностей распределения параметров ГП внутри здания 132

4.2.3 Оценка навигационной информативности параметров ГПЗ внутри зданий и помещений 133

4.3 Теоретическая оценка погрешности моделирования 134

4.4 Карты пространственного распределения значений параметров ГП внутри помещения на основе реальных измерений 137

4.5 Метод калибровки гравитационных градиентометров 146

4.6 Выводы по главе 4 146

5 Обоснование требований, состава, структуры, разработка методики применения и специального программного обеспечения наземного комплекса создания навигационных гравитационных карт 149

5.1 Назначение и состав комплекса подготовки навигационных гравитационных карт 149

5.2 Предлагаемый состав средств измерений наземного КНГК 150

5.3 Экспериментальное опробование прототипа КНГК 152

5.3.1 Особенности методики полигонных измерений параметров ГПЗ с помощью КНГК, как основы для создания навигационной гравитационной карты 154

5.3.2 Методика создания навигационных карт по результатам измерений КНГК 159

5.3.3 Специальное программное обеспечение (СПО) 163

5.3.4 Алгоритм работы СПО 164

5.3.5 Блок градиентометра. 166

5.3.6 Выводы по результатам опробования прототипа КНГК 167

5.4 Вывод по главе 5 170

6 Заключение 171

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 173

Введение

Актуальность исследований

Ключевым 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 (далее - 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 опорных 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) навигационных гравитационных 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 модели 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 навигационных гравитационных 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 Этвеш, 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 навигационных гравитационных 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 ожидаемой 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 навигационных 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 ожидаемой 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 подготовки 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 и реализация 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 создания 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, принимал активное участие в анализе, обобщении полученных результатов 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).

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

1.1 Требования к точности автономных навигационных систем по ГПЗ

Использование информации о гравитационном поле Земли (ГПЗ) для создания автономных навигационных систем имеет ряд преимуществ перед другими естественными навигационными полями Земли и ее поверхности, а именно:

- многообразие гравиметрических данных, характеризующих гравитационное поле Земли;

- пространственная (трехмерная) модель гравитационного поля в отличие от поверхностных (двухмерных), характеризующих большинство геоинформационных навигационных полей;

- возможность получения различных гравиметрических данных с любой детальностью практически в любой точке суши и моря, а также околоземного пространства;

- высокая, практически абсолютная, помехозащищенность гравитационного поля Земли от естественных и искусственно организованных внешних возмущений.

Гравитационное поле Земли принято разделять на две части: нормальное и аномальное гравитационное поле [1]:

$$\vec{g} = \vec{g}_0 + \Delta\vec{g}_{(x,y,z)}, \qquad (1.1)$$

где: $\vec{g}_0$ - вектор нормального ускорения свободного падения, определяемого силами тяжести Земли в форме эллипсоида вращения; $\Delta\vec{g}_{(x,y,z)}$ - вектор аномального ускорения свободного падения (УСП), определяемого неоднородностями плотности земной коры, силами притяжения Солнца, Луны и т.д.

Значения вектора Δg связаны с координатами точек в выбранной системе координат однозначно и нигде на поверхности Земли не повторяются. Поэтому по измерениям величины УСП можно определить свое местоположение.

Точно также гравитационный градиент в каждой точке пространства можно представить в виде суммы нормального и аномального значений [2]:

$$W = U_0 + \Delta T(x, y, z), \qquad (1.2)$$

где по измерениям составляющих аномального градиента $\Delta T(x, y, z)$ можно установить координаты местоположения измерителя, т.е. решить задачу навигации.

На район передвижения средства навигации заранее с помощью специальных гравиметрических или вычислительных средств создается карта параметров аномального ГПЗ: это может быть либо карта аномалий Δg, либо карта аномалий гравитационных градиентов (ГГ) $\Delta T(x, y, z)$.

На основе этой карты готовится задание, в котором вдоль маршрута передвижения для каждой точки, имеющей соответствующие временные и пространственные координаты, приписываются соответствующие этим точкам значения УСП или гравитационных градиентов. Сформированное задание на маршрут передвижения закладывается в бортовую память объекта навигации.

Во время перемещения по маршруту навигации бортовой гравиметр (или градиентометр) измеряет текущее значение аномалии Δg (или $\Delta T(x, y, z)$) и сопоставляет его со значением УСП (или градиента), которое заложено в полетном задании. В случае несоответствия измеренных и опорных значений измеряемого параметра ГПЗ (объект отклонился от маршрута) производится коррекция его движения.

Сопоставление фактического и заданного значения параметра ГПЗ выполняется обычно вычислением значения некоторого функционала типа корреляционной функции и поиском экстремума этого функционала. По этой причине системы автономной навигации по физическим полям Земли получили название корреляционно-экстремальных навигационных систем (КЭНС).

Теоретическим основам КЭНС посвящено достаточно много трудов отечественных и зарубежных авторов, например [3- 6].

Важнейшим показателем гравиметрической навигационной карты является ее информативность. Анализ современного состояния проблемы использования гравитационного поля Земли для автономной навигации показывает [7], что на сегодняшний день единые подходы к оценке навигационной информативности этого поля не выработаны. Чаще всего в качестве показателей информативности параметра α аномального ГПЗ используется дисперсия D_α и $\sigma_a = \sqrt{D_a}$, а также радиус корреляции ρ_α, которые характеризуют статистические свойства поля, соответственно, в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Информативными могут считаться те участки, на которых $D_\alpha \geq D_\alpha^*$ и $\rho_\alpha \leq \rho_\alpha^*$, где $D_\alpha^*, \rho_\alpha^*$ - заданные пороговые значения.

По ориентировочным данным [8], учитывающим достигнутые характеристики точности измерений параметров аномального ГПЗ, в качестве D_α^* могут использоваться следующие значения дисперсии:

- по аномалиям УСП – 16 мГал^2;

- по гравитационным градиентам – 100 Э^2.

Пороговые значения радиуса ρ_α корреляции при расчетах обычно принимаются в интервале ρ_α^* от 10 до 12 км.

1.1.1 Оценка навигационных возможностей гравиметрических КЭНС, основанных на измерении аномалии силы тяжести

Аномалии силы тяжести на поверхности Земли, как правило, составляют несколько десятков миллигал, достигая несколько сотен миллигал в горах и глубоководных впадинах, например:

- г. Мануа-Кеа (остров Гавайи): при высоте H=4214 м Δg = +669 мГал;

- впадина Пуэрто-Рико: при глубине H=-9218 м Δg = -380 мГал.

Оценки показывают [9-10], что КЭНС, в которых в качестве

навигационных измерителей используются ***бортовые гравиметры***, в настоящее время могут обеспечить среднеквадратическую погрешность определения УСП на подвижном объекте от 0,5 мГал до 1 мГал. При наличии цифровых карт аномалий УСП с погрешностью не больше 2 мГал при дискретности карт 1 км можно обеспечить точность оценки плановых координат в режиме КЭНС от 900 до 1800 м (СКО) [11, 12]. Основная трудность функционирования таких навигационных систем на подвижном основании заключается в компенсации вертикальных и кориолисовых ускорений объекта [13]. Наиболее предпочтительная область применения КЭНС такого типа – навигация наземных и морских объектов.

1.1.2 Оценка навигационных возможностей КЭНС, основанных на измерении гравитационных градиентов

Аномалии вторых производных потенциала силы тяжести обусловлены в основном местными, близкими к поверхности неоднородностями земной коры, включая границы "вода – суша" (береговая линия морей, океанов, рек, озер), и притяжением неоднородностей рельефа. Их значения обычно достигают несколько сотен Этвеш, а в горных районах – тысяч Этвеш ($1\ \text{E} = \frac{1\ \text{мГал}}{10\ \text{км}} = 10^{-9}\text{с}^{-2}$).

Пример карт аномалий гравитационных градиентов [14, 15] $T_{xx}, T_{yy}, T_{zz}, T_{xz}$, приведен на рисунке 1. На этих картах наблюдаются изменения градиентов на поверхности суши в диапазоне от минус 50 до плюс 50 Е.

В гравитационных КЭНС градиентометрического типа в качестве навигационных измерителей используются ***гравитационные градиентометры (гравиградиентометры)***, измеряющие вторые производные потенциала силы тяжести. Оценки показывают [16-20], что КЭНС, в которых в качестве навигационных измерителей используются ***бортовые гравиградиентометры***, в настоящее время могут обеспечить среднеквадратическую погрешность определения горизонтальных гравитационных градиентов на подвижном объекте от 1 до 10 Этвеш.

Использование измерителей градиентов аномального гравитационного поля Земли имеет несколько существенных особенностей:

- гравиградиентометры, как измерители градиентов аномального гравитационного поля Земли, принципиально нечувствительны к линейным ускорениям объекта навигации, что обеспечивает возможность их применения в составе интегрированных навигационных комплексов наземных, морских и воздушных объектов. Это объясняется тем, что при определении гравитационного градиента через разность гравитационных ускорений в двух пространственно разнесенных точках линейные ускорения, в том числе основная составляющая ускорения свободного падения, полностью компенсируются;

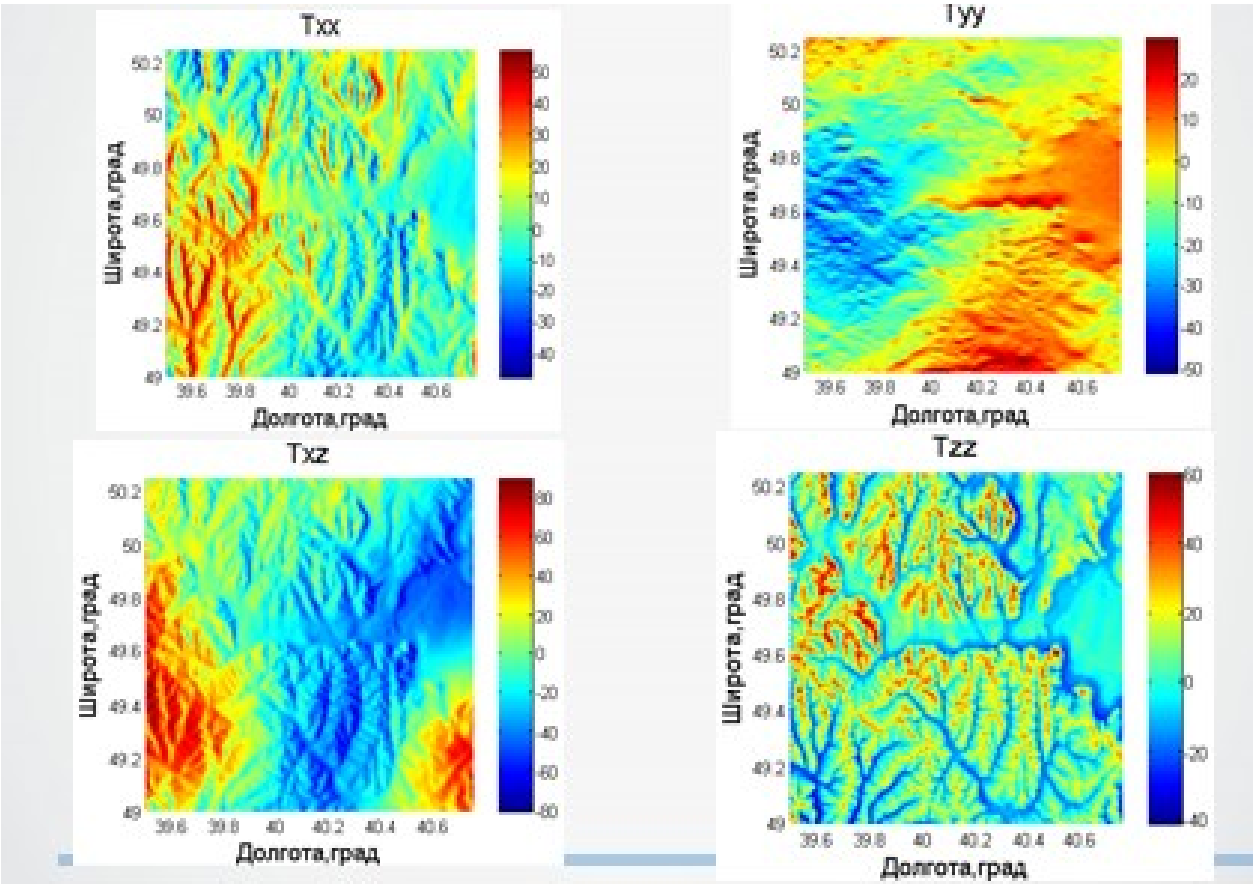


Рисунок 1 – Примеры навигационных карт гравитационных градиентов

- вертикальный градиент ускорения силы тяжести малоинформативен, поскольку слабо зависит от высоты. Вертикальный градиент ускорения силы тяжести изменяется всего от 0,8 до 1,0 Е при изменении высоты на 1 км;

- наиболее информативными характеристиками аномального

гравитационного поля являются его горизонтальные градиенты. Как уже отмечалось, с точки зрения навигационной информативности их принято характеризовать дисперсией градиентов поля (E^2) и радиусом корреляции в километрах характеристик аномалий ГПЗ. При этом информативность прямо пропорциональна дисперсии и обратно пропорциональна радиусу корреляции.

Дисперсия и радиус корреляции гравитационного градиента несколько изменяются с высотой [21]. На рисунке 2 для примера представлены графики изменения дисперсии и радиуса корреляции горизонтальных составляющих градиента ускорения силы тяжести от высоты.

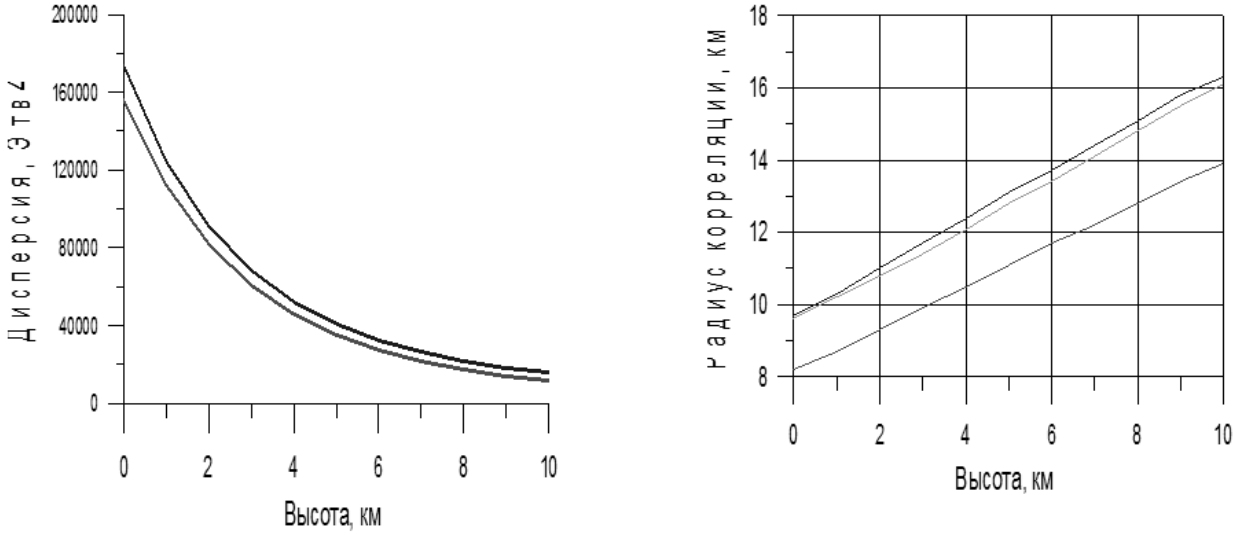


Рисунок 2 – Зависимости дисперсии и интервала корреляции гор. градиентов ускорения силы тяжести от высоты в районах Камчатки и озера Байкал.

Учитывая, что дисперсия и интервал корреляции горизонтальных градиентов ускорения являются основными показателями информативности данных параметров, можно сделать вывод о возможности использования градиентометрических систем навигации для наземных и воздушных объектов. Современные исследования показывают, что при наличии цифровых карт гравитационных градиентов с погрешностью не больше 10 Этвеш при детальности карт 1 км можно обеспечить точность оценки плановых координат в режиме КЭНС до 1600 м (СКО) [22].

Основная проблема создания градиентометрических КЭНС на сегодняшний день заключается в создании бортовых гравитационных

градиентометров требуемой точности и навигационных гравитационных карт гравитационных градиентов. Наиболее предпочтительная область применения КЭНС такого типа – навигация воздушных объектов.

1.1.3 Обзор обеспеченности КЭНС цифровым картографическим материалом

Обязательным требованием при создании автономных систем навигации по ГПЗ является наличие цифровых карт параметров аномального гравитационного поля Земли.

На текущий момент времени около 80 % поверхности континентальных районов, в том числе и площади Мирового океана, обеспечены разнородными гравиметрическими картами различного класса точности и срока давности. Точность определения параметров аномалий ГПЗ в основном составляет от первых единиц до первых десятков миллигал по аномалиям УСП. Карты аномального гравитационного градиента для подавляющего большинства территории континентов и Мирового океана, за исключением некоторых районов побережья США, Австралии, а также на отдельные районы Канады не созданы. Однако, доступ к этим картам ограничен в виду правовых аспектов данных [23, 24].

Повышение картографического обеспечения возможно путем проведения и обработки дополнительных измерений соответствующих параметров ГПЗ в отдельных точках земной поверхности и поверхности мирового океана. При этом следует иметь в виду, что такой метод возможно реализовать только на территории РФ, в зоне внутренних морей и континентального шельфа.

1.1.4 Выводы по разделу 1.1

Проведенный анализ возможностей перспективных КЭНС на базе бортовых гравиметров и градиентометров показывает следующее:

1) Достижимая погрешность определения координат таких КЭНС находится на уровне 900- 1800 метров. При этом для реализации КЭНС на основе измерителей параметров ГПЗ необходимо обладать навигационными

гравитационными картами параметров ГПЗ с погрешностью не хуже 2 мГал, 10 Этвеш и детальностью 1 км.

2) Ключевым моментом, сдерживающим создание автономных навигационных систем по ГПЗ, является их низкая обеспеченность цифровыми навигационными гравиметрическими картами.

1.2 Обзор состояния изученности гравитационного поля Земли

1.2.1 Методы анализа изученности гравитационного поля Земли

1.2.1.1 Базы данных ГПЗ

В настоящее время развитие средств измерений (различного базирования и принципов работы) и вычислительной техники позволяет создавать цифровые планетарные модели ГПЗ, например – EGM2008 до 2160-й степени и порядка разложения [25]. Такие модели обладают размером ячеек около 20 - 60 км соответственно и позволяют выполнять предварительную оценку информативности ГПЗ на маршруте навигации.

Наиболее полные сведения о геофизической изученности территорий Земли хранятся в государственных и частных базах данных. Например, базы данных Канады GDCINFO, США NOAA, Великобритании GETECH, Франции BGI, Австралии AUSGIN, России ФГБУ «Росгеолфонд» и т.д. В большинстве случаев данные по результатам измерений абсолютных значений УСП, служащих для привязки площадных и профильных съемок предоставляются на безвозмездной основе с полным описанием характеристик пунктов-хранителей.

Ниже представлены сведения о наиболее полных базах данных параметров ГПЗ.

1.2.1.2 Данные Арктического проекта

Результаты работы Международного арктического проекта (ArcGP) представлены только в виде регулярной сетки аномалий УСП в свободном воздухе с шагом 5' x 5'. Использовано нормальное поле Земного эллипсоида WGS 84. Сетка построена по наземным, в том числе морским, измерениям с

заполнением белых пятен альтиметрическими определениями (рисунок 3). Регулярная сетка покрывает северную полярную шапку Земли до 64° северной широты.

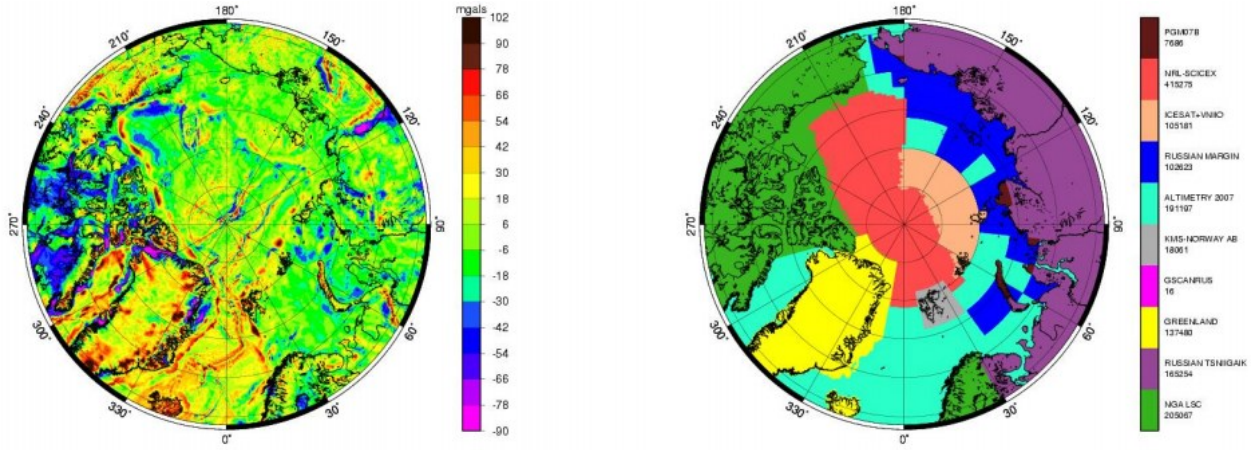


Рисунок 3 – Карта аномалий УСП (слева) и схема источников данных (справа) международного Арктического проекта

Данные находятся в открытом доступе и могут быть загружены обычными средствами по адресу:

http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/agp/agp_08/ArcGP_GRV.scn

Файл аномалий в свободном воздухе представлен в формате GRAVSOFT. В шапке *«64.0416666667 89.9583333333 .0416666667 359.9583333333 .0833333333 .0833333333»* указаны границы сетки и её шаг в градусах: широта южной границы, широта северной границы, долгота западной границы, долгота восточной границы, шаг по широте, шаг по долготе. Первое значение в файле приурочено к северо–западному углу, а последнее – к юго–восточному.

1.2.1.3 Гравиметрические данные Международного Гравиметрического Бюро

Международное Гравиметрическое Бюро (МГБ) является подразделением Международной Ассоциации Геодезии и занимается сбором и архивированием глобальных наземных и морских гравиметрических данных из различных источников. Информация может быть открытой, которая свободно предоставляется любому заявителю, а может быть ограниченна, когда получение её возможно только с согласия предоставившей данные стороны.

Основным же ограничением на свободное получение наземных гравиметрических данных МГБ является их объем.

Открытые данные аномалий УСП свободно можно получить на любой участок земной поверхностью размером не более 20ºx 20º, при этом количество предоставляемых данных ограничено 10 000 точками. Сделать это можно заполнив соответствующий запрос по адресу:

http://bgi.omp.obs-mip.fr/data-products/Gravity-Databases/Land-Gravity-data

После выбора интересующего региона, появится возможность посмотреть карту данных, информацию об источнике и сделать запрос (Request). В запросе необходимо указать основную информацию о заявителе, организации и целях, для которых данные загружаются. После этого запрос рассматривается в МГБ и данные высылаются по электронной почте.

Если запрос выполняется на территорию большего размера, чем 20x20 или на территорию целого государства, то такие данные будут доступны только в том случае, если запрашивающая сторона внесла какой-либо вклад в банк данных МГБ. Надо отметить, что полная база данных на весь земной шар не предоставляется.

Данные распространяются в трёх текстовых файлах. В файлах с расширением *.eol и *.txt представлены собственно данные в табличном виде.

Описание формата EOL дано в документации по ссылке: http://bgi.omp.obs-mip.fr/content/download/720/4949/file/BGI_EOL_EOS_Data_format.pdf

Это наиболее полный формат данных и именно он должен по возможности использоваться в приложениях.

В *.txt файле столбцы даны в следующем порядке: код источника, широта, долгота, высота в метрах, УСП в милигалах, аномалия в свободном воздухе, аномалия Буге. Наконец, в третьем файле с суффиксом _info.txt находится информация об источнике получения данных.

На большую часть территорий, особенно на которые есть государственные ограничения на распространение гравиметрических данных

(Российская Федерация, Китай и многие другие), объем предоставляемых данных крайне мал.

Большая часть гравиметрической информации МГБ является набором нерегулярных точечных данных, по этой причине, а также из–за сложности получения данных из Международного гравиметрического Бюро, использование этих данных возможно только в крайних случаях.

1.2.1.4 Гравиметрические данные NOAA

Национальный центр информации об окружающей среде США NOAA является держателем наземных точечных гравиметрических данных аномалий УСП, регулярных сеток и моделей геоида на ряд зарубежных территорий и на территорию всей Земли. Кроме того, NOAA является держателем данных морской гравиметрии. Список всех доступных данных NOAA и ссылки на их получение находятся на сайте:

https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/gravity/

Для загрузки региональных точечных данных следует воспользоваться утилитой командной строки wget и выполнить следующее: $ wget -r -p --no-parent \

https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/gravity/1999/data/regional/

Для загрузки региональных сеточных данных следует выполнить команду: $ wget -r -p --no-parent \

https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/gravity/1999/data/grid/

Остальные данные могут быть скачаны аналогичным образом при необходимости. После загрузки региональных данных и регулярных сеток в каждой из субдиректорий будет находиться следующий набор файлов с расширениями:

ast..... данные в текстовом формате

bin.....данные в бинарном формате

fmt.....описание полей текстового и бинарного файлов

gif..... карта с точечными данными

hdr..... подробный файл заголовка для текстового и бинарных файлов

ind..... бинарный файл индекса

txt ..... краткое описание данных

doctxt..... подробное описание источников получения данных

Ввиду хорошей структурированности данных и исчерпывающего их описания, следует хранить информацию в исходном полученном виде без каких–либо изменений.

1.2.1.5 Данные морской гравиметрической съемки

Данные Международной базы морских геофизических данных GEODAS находятся в распоряжении NOAA. База содержит набор гравиметрических (аномалии УСП), магнитометрических, сейсмических и других данных. Гравиметрические данные представлены в виде галсов – участков траекторий движения судна. Данные находятся по адресу: http://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/geophysics/

Необходимо произвести выбор интересующего участка (рисунок 4), который, в отличие от данных МГБ, ничем не ограничен. После выбора участка или отдельного трека будет доступна возможность просмотра информации о данных и выполнить запрос (с указанием электронного адреса).

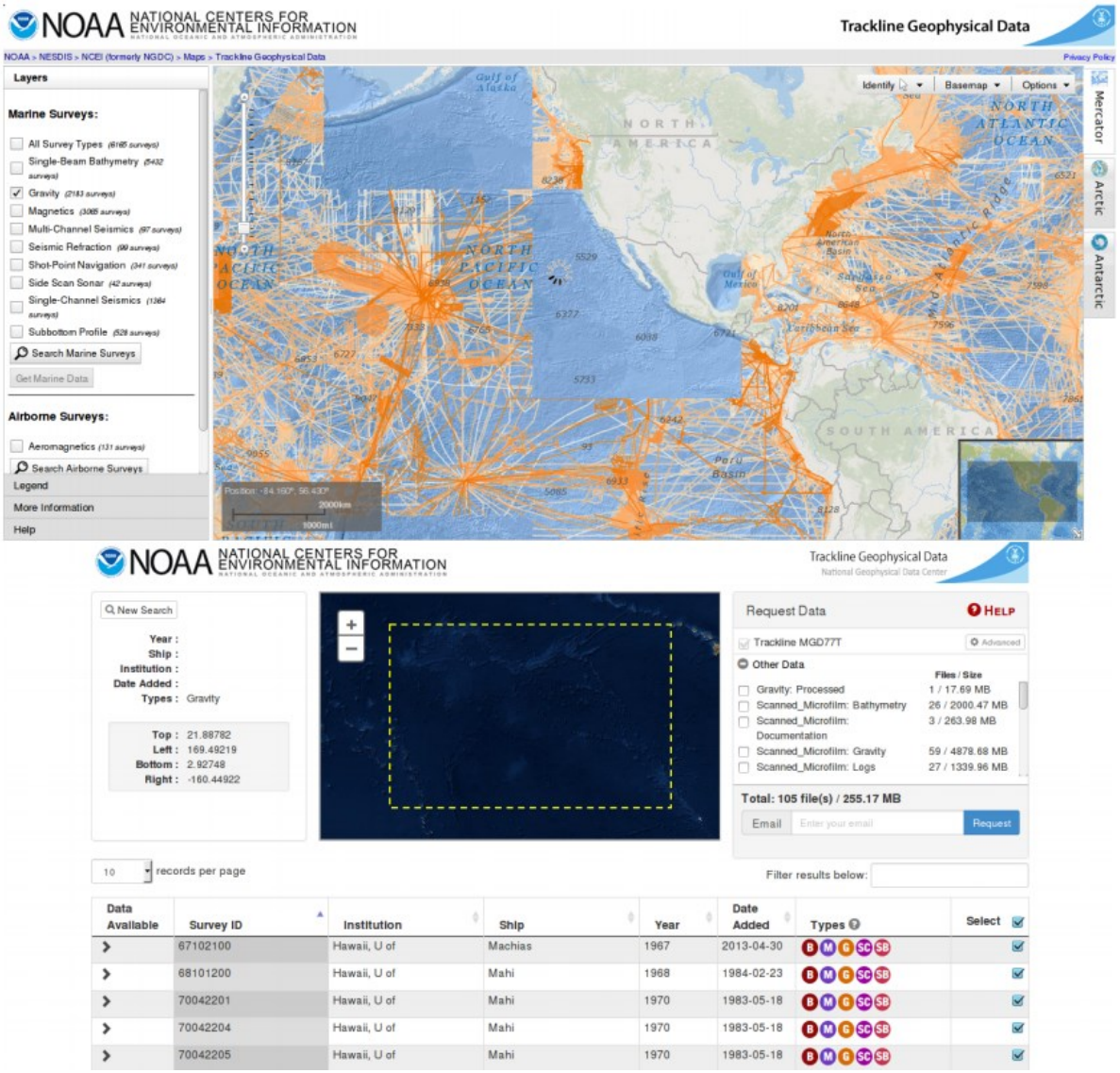
Формат файлов стандартизован – MGD77, подробное описание его можно найти по ссылке: http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/dat/geodas/ docs/mgd77.pdf

1.2.1.6 Гравиметрические данные NIMA

Данные Национального Картографического Агентства (NIMA) являются глобальным каталогом аномалий УСП на территорию суши и построены только на участки земной поверхности, где присутствовали хоть какие–то исходные данные. Таким образом, никакие способы «восстановления» данных не применялись. Данные представлены сеткой средних значений аномалий УСП по трапециям 30 x 30 с оценкой погрешности. Параметры нормального поля, которые отличались от WGS 84, даны в документации к данным. Эти данные были использованы для вывода модели EGM96. Данные каталога NIMA можно получить по адресу: http://cddis.nasa.gov/926/egm96/sgravdes.html

Подробное описание данных приведено в документации в формате PostScript по адресу:

ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/egm96/gravity_data/docum_gravity_data.ps



выбор участка или отдельного галса (сверху) и просмотр информации о выбранных данных и запрос по ним (снизу)

Рисунок 4 – Получение данных морской гравиметрии из базы GEODAS

1.2.1.7 Гравиметрические данные на территорию Российской Федерации

На территорию Российской Федерации создана база данных гравимагнитных съемок «Гравимаг», за основу которой были взяты государственные гравиметрические и магнитометрические карты масштаба 1:200 000. Держателем базы данных является Российский Федеральный Геологический Фонд (Росгеолфонд) Федерального Агентства по Недропользованию (Роснедра) Министерства Природных Ресурсов России

(Минприроды России).

К началу 2000 г. гравиметрической съемкой масштаба 1:200 000 покрыто 92,4 % территории России [26, 27].

Получение гравиметрических данных производится в соответствии с [28]. Установлен следующий порядок их получения:

а) организация обращается в Министерство Обороны РФ с ходатайством о получении разрешения на передачу от Роснедр геологической информации, содержащей сведения, составляющие государственную тайну (результаты гравиметрических работ каталоги координат);

б) при получении разрешения от Министерства обороны организация направляет в Роснедра заявку на предоставление в пользование геологической информации (оформленную в соответствии с приказом Минприроды России от 05.05.2012 №122), к которой прикладываются:

– перечень запрашиваемой геологической информации;

– копия разрешения Министерства обороны;

– копия лицензии на проведение работ с использованием сведений, составляющих государственную тайну.

в) Роснедра (в установленный срок) принимает решение о предоставлении геологической информации и информирует об этом заявителя или направляет мотивированный отказ в предоставлении геологической информации.

Данные представляются в табличном виде со следующими данными: широта, долгота, высота, аномалия Фая, аномалия Буге с плотностью 2.67 г/см^3 и плотностью 2.3 г/см^3, значение поправки за рельеф. В некоторых случаях возможно наличие информации только об одной из аномалий.

1.2.1.8 Гравиметрические данные Центра геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных (ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД»)

ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД» создал и поддерживает в актуальном состоянии Банк гравиметрических данных.

Состав гравиметрических данных, включенных в Банк, следующий:

– гравиметрические точечные и сеточные данные на зарубежные территории (все описанные выше источники данных) и на территорию России;

– данные о высотах земной поверхности на территорию всей Земли в виде моделей рельефа международных проектов и созданных по топографическим картам;

– данные спутниковой альтиметрии по геодезическим миссиям Topex/Poseidon, Jason–1, Jason–2, ERS–1;

– данные спутниковой градиентометрии GOCE (полный набор данных за все время наблюдений);

– данные наблюдений спутник–спутник GRACE и GOCE;

Данные GRACE и альтиметрических миссий оперативно пополняются по мере поступления данных на официальные серверы.

Доступ к открытым данным осуществляется по официальному запросу от организации и может быть предоставлен по протоколу SFTP или на физическом носителе (предоставляется заявителем). К открытым данным относится альтиметрия, гравиметрия на зарубежные территории и модели рельефа международных проектов.

Доступ к закрытым данным или к данным, распространение которых ограничено лицензионными соглашениями через Банк гравиметрических данных третьим лицам не предоставляется.

1.2.1.9 Каталог средних значений нормальных высот (модель рельефа) RDTM2014

Модель рельефа на Российскую Федерацию и на сопредельные территории была создана в 2014 году по материалам топографических карт масштаба 1:100 000. Точность модели - не хуже 3 м, шаг – 1". Система координат –WGS 84.

Модель рельефа RDTM2014 хранится в Федеральном Картографо – Геодезическом Фонде в ФГБУ «Центр геодезии, картографи и ИПД» Федеральной Службы Государственной Регистрации, Кадастра и Картографии

(Росреестр).

Получение этих данных производится по официальному запросу от организации. По одному запросу выдается информация по площади размером не более 1ºx1º.

Данные предоставляются либо в формате NetCDF, либо в текстовом табличном формате.

1.2.2 Изученность аномального гравитационного поля Земли

Региональные и локальные аномалии ГПЗ на суше определяются по данным наземной и воздушной съемки. На большей части земной суши созданы карты аномалий ГПЗ различных масштабов начиная от 1:25 000 вплоть до 1:1 000 000 с точностью картографирования аномалий ГПЗ от 0,06 мГал и до 10 мГал. Точность плановой привязки составляет первые десятки сантиметров.

На акваториях мирового океана основной вклад в изучение региональных и локальных аномалий ГПЗ вносят данные спутниковой альтиметрии. При этом незначительная часть акваторий покрыта сетью морских гравиметрических съемок - к настоящему моменту около 99 % акваторий мирового океана покрыто данными спутниковой альтиметрии.

В качестве примера можно привести схему гравиметрической изученности Франции, отображенной на сайте базы данных BGI [29] (рисунок 5).

Для выбора нужного масштаба съемки, необходимой для составления геофизической навигационной карты требуемой точности, целесообразно руководствоваться следующими типовыми характеристиками съемок различных масштабов[30], изложенными в таблице 1.

Отдельно стоит отметить, что измерения градиентов гравитационного поля Земли получили распространение только с начала 2000-х годов, что обусловлено появлением измерительных систем типа Air-FTG и Falcon AGG [31]. К настоящему времени баз данных по градиентометрическим измерениям не сформировано.

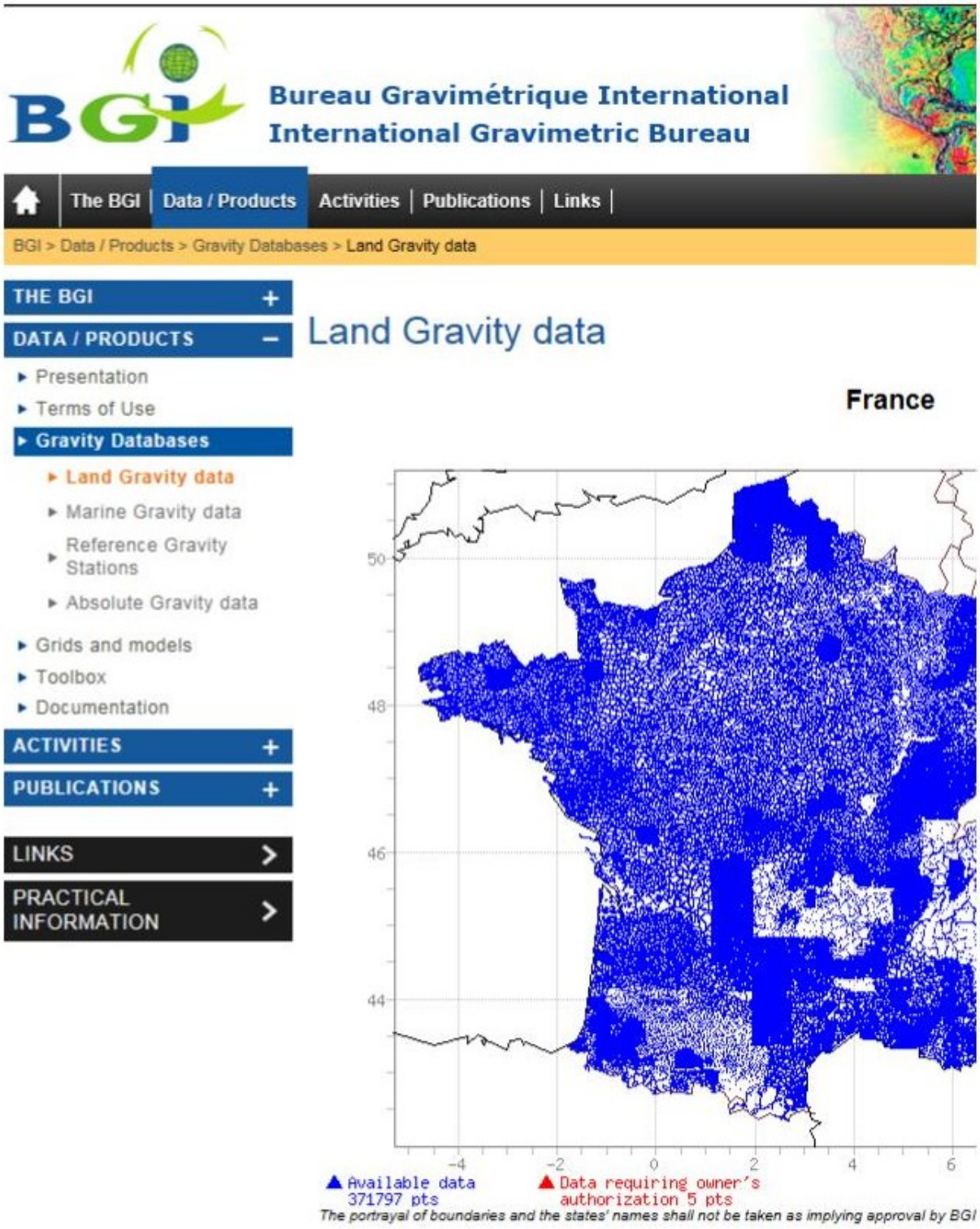


Рисунок 5 - Схема гравиметрической изученности территории Франции

Таблица 1 - Типовые характеристики гравиметрических съемок для равнинных и горных районов.

Масштаб отчетных карт и графиков	Сечение изоаномал мГал	Среднеквадратическая погрешность определения аномалий сил тяжести в редукции Буге, мГал	Среднеквадратическая погрешность определения наблюденных значений силы тяжести, мГал	Полная погрешность интерполяции, мГал	Среднеквадратическая погрешность определения высот, м	Среднеквадратическая погрешность определения координат пунктов относительно Государственной геодезической сети, м	Густота сети	
							Число пунктов на 1 кв. км	Расстояние между пунктами при наблюдениях по профилям, м
а) ДЛЯ РАВНИННЫХ РАЙОНОВ:								
1:500 000	5	±1,5	+0,5	±2,0	±5,0	±200	0,04-0,1	2500-5000
1:200 000	2	+0,8	±0,4	±1,0	±2,5	±100	0,1-0,25	1000-2000
1:100 000	1	±0,4	±0,3	±0,5	±1,2	±80	0,25-1,0	500-1000
1:50 000	0,5	±0,2	±0,15	±0,35	±0,7	±40	2-30	100-500
	0,25	±0,1	±0,07	±0,2	±0,35	±40	4-50	50-250
1:25 000	0,25	±0,1	±0,06	±0,2	±0,35	±20	12-60	50-250
	0,2	±0,08	±0,06	±0,15	±0,25	±20	16-80	20-100
1:10 000	0,2	±0,08	±0,06	±0,15	±0,2	±4	20-100	20-100
	0,1	±0,04	±0,03	±0,07	±0,1	±4	25-200	10-50
1:5 000	0,1	±0,04	±0,03	±0,07	±0,1	±2	50-250	10-50
	0,05	±0,02	±0,015	±0,03	±0,05	±2	100-500	5-25
б) ДЛЯ ГОРНЫХ РАЙОНОВ:								
1:500 000	5	±2,0	±0,5	±3,0	±3,0	±120	0,04-0,1	2500-5000
1:200 000	2	±1,0	±0,4	±1,5	±3,0	±100	0,1-0,25	1000-2000
1:100 000	1	±0,5	±0,25	±0,7	±1,8	±100	0,25-1,0	500-1000
1:50 000	1	±0,5	±0,25	±0,7	±1,6	±50	1,0-10,0	100-500
	0,5	±0,25	±0,12	±0,35	±0,9	±50	2-30	50-250
1:25 000	0,5	±0,25	±0,12	±0,35	±0,9	±25	4-50	50-250
	0,25	±0,12	±0,06	±0,2	±0,45	±25	12-60	20-100
1:10 000	0,2	±0,1	±0,06	±0,15	±0,25	±5	20-100	20-100
1:5 000	0,1	±0,05	±0,03	±0,07	±0,12	±2	50-250	10-50

Из данных таблицы следует, что для удовлетворения требований к навигационным картам УСП (СКО не более 2 мГал, детальность 1 км) для равнинных и горных районов следует использовать съемки масштабов 1:500 000 и крупнее. Данные виды съемок получили широкое распространение в последние два десятилетия в районах, перспективных на поиски залежей углеводородов. Применительно для территории России такими районами являются Прикаспийская низменность, Поволжье, Северная часть Средней и Западной Сибири. При этом крупномасштабные съемки являются локальными (площадью от нескольких десятков км^2 до нескольких тысяч км^2), зачастую не связанными с соседними съемками.

В большинстве случаев использование существующих карт аномалий УСП с допустимой величиной СКО требует проведение дополнительных работ по объединению, дополнению и подготовке таких карт для формирования навигационных гравиметрических карт постоянной дискретности. В практике геофизики это достигается за счет интерполирования данных из нерегулярной сети в узлы сетки с постоянным расстоянием между ячейками.

1.2.3 Стабильность ускорения свободного падения ГПЗ во времени

Одной из ключевой особенностью гравитационного поля Земли, в части значения УСП, является его стабильность во времени. Основные гравиметрические помехи изучены и моделируются до точностей в десятки микрогал. К основным возмущающим источникам гравитационного поля Земли следует отнести:

1.2.3.1 Неравномерность вращения Земли

В гравитационном плане неравномерность вращения Земли оказывает влияние на центробежную составляющую силы тяжести. Современные исследования выделяют двухнедельные, полугодовые, годовые и 435-дневные

(чандлеровские) периоды, которые суммарно приводят к изменению

ускорения свободного падения до 0,1 мкГал. В настоящее время эти вопросы изучаются Международной службой вращения Земли [32].

1.2.3.2 Лунно-солнечные приливные вариации ускорения свободного падения

Наиболее сильное гравитационное возмущение УСП вызвано совместным влиянием Луны и Солнца. Амплитуда приливного изменения ускорения свободного падения может достигать значений около 200 мкГал. В общем виде поправка за совместное влияние Луны и Солнца на вариации ускорения свободного падения представлена формулой Лонгмана [33]:

$$g_m = \frac{\mu M r}{d^3}(3\cos^2\theta - 1) + \frac{3}{2}\frac{\mu M r^2}{d^4}(5\cos^3\theta - 3\cos\theta),$$

где μ - гравитационная постоянная; M - масса Луны; r - расстояние от центра масс Земли до точки на ее поверхности; d - расстояние между центрами масс Земли и Луны; θ - зенитный угол Луны.

Формула Лонгмана, была рассчитана исходя из модели твердой недеформируемой Земли, она позволяет определять поправку за Лунно-Солнечное влияние с погрешностью до 1 мкГал. В силу того, что Земля не является абсолютно упругим телом, она испытывает деформации под действием Луны и Солнца [34], при этом амплитуда колебаний физической поверхности может достигать 0,4-0,5 м на суше и до 10 м на море. Отношение δ амплитуд, наблюдаемых гравиметрических приливных волн к теоретическим амплитудам абсолютно твердой Земли связано отношением:

$$\delta = 1 + h - \frac{3}{2}k,$$

Отношение наблюдаемых наклонов уровенной поверхности к теоретическим γ имеет вид:

$$\gamma = 1 + k - h,$$

где h и k - числа Лява, безразмерные параметры, которые характеризуют особенности внутреннего строения Земли. Их определение основано на вычислении амплитуд δ и γ на основе месячных и годовых записей

гравиметрических и наклономерных приливов. В общем случае для Земли δ составит от 1.12 до 1.2 [35]. Значение δ, определенное с погрешностью 0,01, ведет к образованию систематической погрешности до 3 мкГал.

1.2.3.3 Вариации массы и центра масс атмосферы

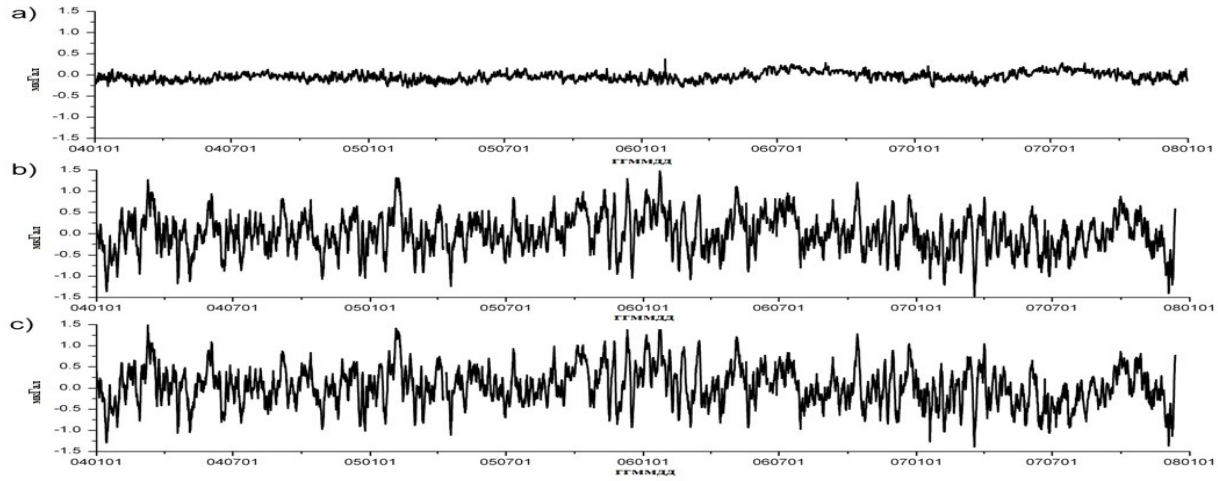
Одним из первых влияние атмосферных масс на гравитационное поле Земли вычислил Двулит П.Д. [36], основываясь на данных ежедневных карт погоды мира, на которых на каждую дату было дано атмосферное давление, приведенное к уровню моря. Вычисленная поправка за изменение атмосферного давления может достигать 20 мкГал и более. Современное состояние приборной базы и разветвленная сеть регистрации метеорологических явлений позволяют «Европейскому центру прогнозов среднего диапазона» (ECMWF) разделять атмосферу Земли на 91 слой на высоту до 80 км, где сосредоточено более 99% всей воздушной массы. Каждый слой представляется как смесь сухого воздуха с водяным паром, плотность рассчитывается по формуле для идеального газа.

Исследования последних лет, проведенные в 2004, 2013 гг. [37, 38] показывают, что при постоянном приповерхностном давлении распределение плотности воздуха по высоте может быть различным, что влечет за собой смещение центра масс атмосферных слоев. В 2010 году была предпринята попытка сравнить различные подходы при расчетах гравиметрических поправок. За основы 2D и 3D моделей были взяты данные ECMWF по сети $0.5° \cdot 0.5°$ для 91 слоя, для модели 1D взяты данные записи барометра. Сравнения результатов проводились на четырехлетнем периоде с 2004 по 2007 год (рисунок 6).

Отмеченная авторами разность в расчетах поправок за изменение массы атмосферных слоев достигает 3-3.5 мкГал. Общепринятого подхода к учету влияния изменения атмосферного давления на стабильность УСП нет, поэтому требуется проверка существующих методов контроля для оценки необходимости вычисления таких поправок.

1.2.3.4 Влияние вариаций гидрологических масс

В отечественной литературе впервые влияние изменения массы подземных вод на ускорение свободного падения было подробно рассмотрено Вихиревым Б.В. [39]. Им показано, что оно может достигать от 50 до 70 мкГал. Одним из методов учета влияния изменения уровня грунтовых вод является постоянный контроль уровня в специальных параметрических скважинах [40]. В 2006 году на геофизической станции Membach в Бельгии был поставлен эксперимент [41], итоговые результаты эксперимента представлены на рисунке 7. Как видно из рисунка, расчет гравиметрических поправок за влияние гидрологических масс выполняется с погрешностью на уровне 3 мкГал. Однако далеко не везде существует возможность контролировать уровень грунтовых вод и его влияние на стабильность УСП при помощи параметрических скважин. Следует провести исследования при помощи типовой аппаратуры, например, при помощи гравиметра CG-5 Autograv – самого распространенного высокоточного гравиметра в мире.



а) 3D – 2D, $\Delta_{макс}$ – 0.5 мкГал; б) 3D – 1D, $\Delta_{макс}$ – 3 мкГал; в) 2D – 1D, $\Delta_{макс}$ – 3,5 мкГал.

Рисунок 6 - Разница гравиметрических поправок

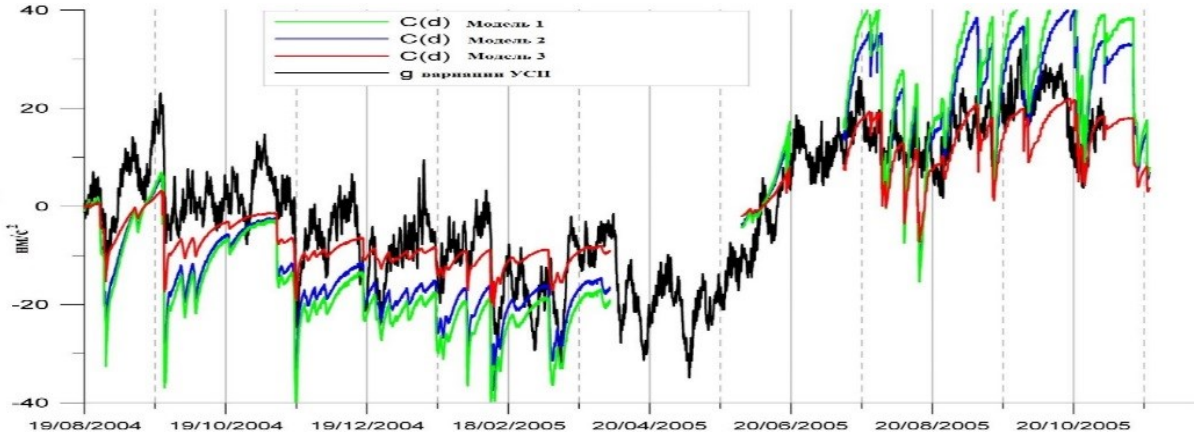


Рисунок 7 - Теоретические гравиметрические поправки от моделей различной детализации – серые сглаженные кривые; с регистрацией вариаций УСП с помощью криогенного гравиметра – черная кривая.

1.2.3.5 Влияние сейсмических воздействий

Сейсмические помехообразующие факторы от различных источников напрямую влияют на погрешность в измерения УСП гравиметрами. Экспериментальные работы в Институте Физики Земли [42] показали, что землетрясения магнитудой до семи баллов по шкале Рихтера приводят к увеличению погрешности измерений УСП до первых единиц милигал и препятствуют гравиметрическим измерениям до семи часов с момента окончания землетрясения. Более того, в зависимости от удаленности источника землетрясения и его магнитуды, проведение высокоточных гравиметрических измерений могут быть отложены по времени до двух суток.

Наибольший неучтенный вклад с абсолютное значение УСП, который затруднительно смоделировать с микрогальной погрешностью является эффект от изменения гидрологической обстановки. Суммарно неучтенные изменения УСП могут достигать 100 мкГал. Единого подхода для контроля неприливных вариаций УСП нет, необходимы дополнительные исследования.

1.2.4 Выводы по разделу 1.2

1) Исследование методов оценки изученности гравитационного поля Земли показывает, что в открытом доступе хранится большое количество разнородной гравиметрической информации. Базы данных гравитационных градиентов отсутствуют. Распространение баз данных аномалий УСП

ограничено по площади и объему. Опубликованной информации о характере распределения УСП и гравитационных градиентов внутри закрытых помещений и вдоль горных ущелий нет. Необходимо разработать метод создания навигационных гравитационных карт на удаленные территории, для горных ущелий, а также для объемов внутри закрытых помещений.

2) Базы данных аномалий УСП не обладают единым форматом, масштабом и погрешностью значений УСП. Необходимо разработать метод создания навигационных гравитационных карт из нерегулярных данных в узлы сетки с регулярным шагом 1 км.

3) Проведенный анализ методов контроля стабильности УСП во времени показывает, что достижимая погрешность учета вариаций УСП составляет десятки мкГал. Единого подхода при контроле влияния вариаций атмосферного давления и уровня грунтовых вод не существует. Необходимо выполнить дополнительные исследования по оценке величины неприливных вариаций УСП, вызванных долговременной стабильностью ГПЗ, изменением атмосферного давления и гидрологической обстановки в районе измерений.

1.3 Особенности создания навигационных гравитационных карт

1.3.1 Методы гравиметрической съемки для создания навигационных гравитационных карт

Существует определенный перечень видов измерений для подготовки навигационных гравитационных карт:

– наземная гравиметрическая съемка УСП и гравитационных градиентов;

– воздушная гравиметрическая съемка УСП и гравитационных градиентов;

– морская гравиметрическая съемка УСП и гравитационных градиентов;

– космическая съемка гравитационных градиентов, а также профиля гравитационного потенциала.

1.3.1.1 Наземная гравиметрическая съемка

Основные положения по проведению наземных гравиметрических работ отражены в [30]. Основной формой сети пунктов наблюдений при площадной съемке является квадратная. Наблюдения в рейсах проводятся, как правило, по однократной методике. При наблюдениях могут быть применены один, два и более гравиметров в зависимости от точности съемки. Координатная привязка измерений определяется требованиями точности определения координат и высот гравиметрических пунктов с учетом физико-географических условий района работ и картографо-геодезической обеспеченности [43].

Ключевой особенностью наземных гравиметрических съемок является высокая точность измерений (от 0,03 до 2 мГал) и низкая себестоимость работ. Однако, учитывая время, необходимое для получения единичного качественного измерения, производительность составляет 0,8 км^2·N за рабочую смену, где N – количество приборов. Поэтому, такой метод подготовки целесообразно использовать для уточнения небольших по площади локальных участков или составления профилей (дорожные покрытия, железнодорожные насыпи), вдоль которых необходимо знать навигационную гравиметрическую информацию.

Отдельно следует отметить, что в РФ и за рубежом существуют только переносимые гравиметры. Парка переносимых гравитационных градиентометров нет. До наших дней сохранились только некоторое количество переносимых гравитационных вариометров типа Е-60.

1.3.1.2 Воздушная гравиметрическая съемка

Основные положения аэро-гравиметрических съемок не регламентированы «Инструкцией по гравиразведке». Это обусловлено малым измерительным парком приборов (аэрогравиметров и аэроградиентометров), а также сложностью организации самого процесса съемочных работ и обработки получаемых данных [44, 45].

Тем не менее, на основании опыта работ «ГНПП Аэрогеофизика» и других зарубежных компаний, погрешность измерений УСП над сушей,

оцененная по повторным маршрутам, как правило, находится на уровне 0.6-0.7 мГал [46]. Это утверждение подтверждается сопоставлением аэрогравиметрических данных с высокоточными наземными съемками [47]. Над акваториями погрешность измерений УСП составляет около 0.4 мГал.

В РФ опыта применения аэроградиентометров нет. Зарубежный опыт применения аэроградиентометров [48] показывает, что достижимая погрешность измерения горизонтальных гравитационных градиентов находится в диапазоне от 1 до 5 Этвеш, вертикального – от 5 до 10 Этвеш.

Эффективная производительность аэрогравиметрических работ составляет около 1500 пог. км/сутки (при продолжительности вылета 5 часов). При этом, расстояние между соседними профилями съемки может варьироваться в диапазоне от 100 м до 8 км.

1.3.1.3 Морская гравиметрическая съемка

Основные положения морских гравиметрических съемок регламентируются «Инструкцией по морской гравиметрической съемке» (ИГ-78), 1979 г. Достижимая погрешность измерения УСП составляет от 0,35 до 1 мГал. Эффективная производительность морских гравиметрических работ составляет около 200 – 400 пог.км/сутки. В РФ опыта применения морских гравитационных градиентометров нет. Немногочисленные публикации зарубежного опыта использования морских градиентометров [49] показывают, что их применение целесообразно в комплексе с другими морскими геофизическими методами (сейсморазведка, магниторазведка и др.). Преимуществами морской градиентометрии является более высокая точность измерений гравитационных градиентов (от 1 до 3 Этвеш) за счет достижения более спокойных бортовых условий применения.

1.3.1.4 Текущее состояние разработок по созданию комплексов подготовки навигационных гравитационных карт

В открытых источниках информации данных по наличию разрабатываемых или действующих унифицированных комплексов

подготовки навигационных гравитационных карт нет. Тем не менее, предпосылки для создания таких комплексов имеются. Причем необходимо создание не только перебазируемого (наземного) комплекса измерителей, но и мобильного комплекса (воздушного и морского), который способен производить измерения геофизических параметров в движении, например с борта БПЛА.

Типовой состав перебазируемого комплекса измерителей:

– средства координатной привязки измерений;

– мобильный гравитационный градиентометр;

– мобильный высокоточный относительный гравиметр;

– абсолютный баллистический гравиметр (АБГ);

– комплекс бортовых аппаратных средств предварительной обработки измерений;

– стационарное автоматизированное рабочее место подготовки навигационных карт.

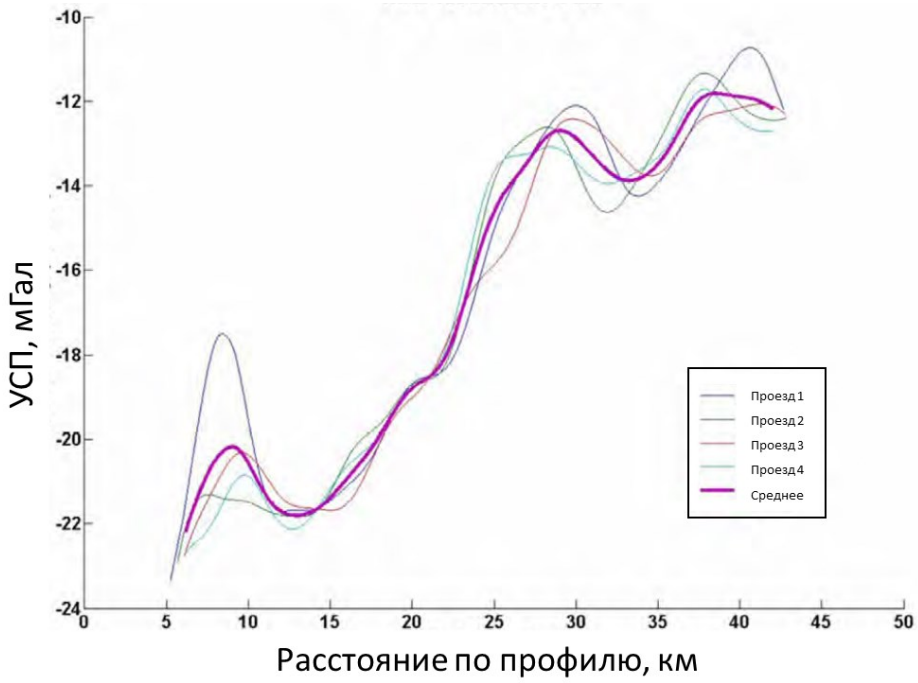
За исключением АБГ, для которого необходимо выполнять измерения в стационарном режиме в течение нескольких десятков минут, остальные геофизические и геодезические измерители работают в движении.

Наиболее технически-сложным моментом при создании такого комплекса является обустройство гиростабилизированной платформы для бортового гравиметра и градиентометра и системы подавления широкого спектра помехообразующих частот колебаний транспортного средства. Анализ зарубежного опыта показывает, что такие попытки проводились в США и Австралии с размещенными гравиметром и гравитационным градиентометром внутри автомобилей.

В 2006 году фирма Lacoste&Romberg [50] провела тестовые испытания аэрогравиметра TAGS, размещенного внутри минивэна (рисунок 8).

Рисунок. 8 - Испытания гравиметра TAGS фирмы Lacoste&Romberg

Испытания проводились при движении по прямому участку дороги, имитируя полет на самолете. Маршрут был выбран вдоль наиболее ровного участка дороги с возможностью чисто принимать сигнал GPS, при котором была возможность проводить повторные измерения с наименьшим отклонением от первоначальной траектории (рисунок 9). Похожий эксперимент был выполнен с одной из последних разработок компании Rio Tinto и Университета Восточной Австралии в области авиационной гравитационной градиентометрии – авиационным гравитационным градиентометром VK1 AGG instrument [51].



ось абсцисс – дистанция в километрах, ось ординат – аномалия в свободном воздухе в милигалах. Розовая кривая – среднее значение по результатам 4-х повторений. Погрешность измерений - 0,61 мГал.

Рисунок 9 - Результаты наземных испытаний гравиметра TAGS фирмы Lacoste&Romberg.

VK1 AGG instrument является градиентометром, который создавался с учетом опыта и технических характеристик авиационного градиентометра Falcon AGG, но с возможностью выполнять измерения с более высокой частотой. Предварительные лабораторные испытания градиентометра показали, что в полосе пропускания 0,5 Гц градиентометр VK1 AGG instrument обладает погрешностью измерений 15,2 Е. После прохождения лабораторных испытаний градиентометр был установлен внутри минивена. По аналогии с испытаниями, описанными выше, было выполнено четыре тестовых измерения вдоль дороги (рисунок 10).

Графики построены без учета влияния топографических масс, поэтому кривые красные и синие не совпадают на отдельных участках маршрута. Тем не менее модернизация градиентометра VK1 AGG instrument продолжается, ожидаемая погрешность измерений составит 1Е.

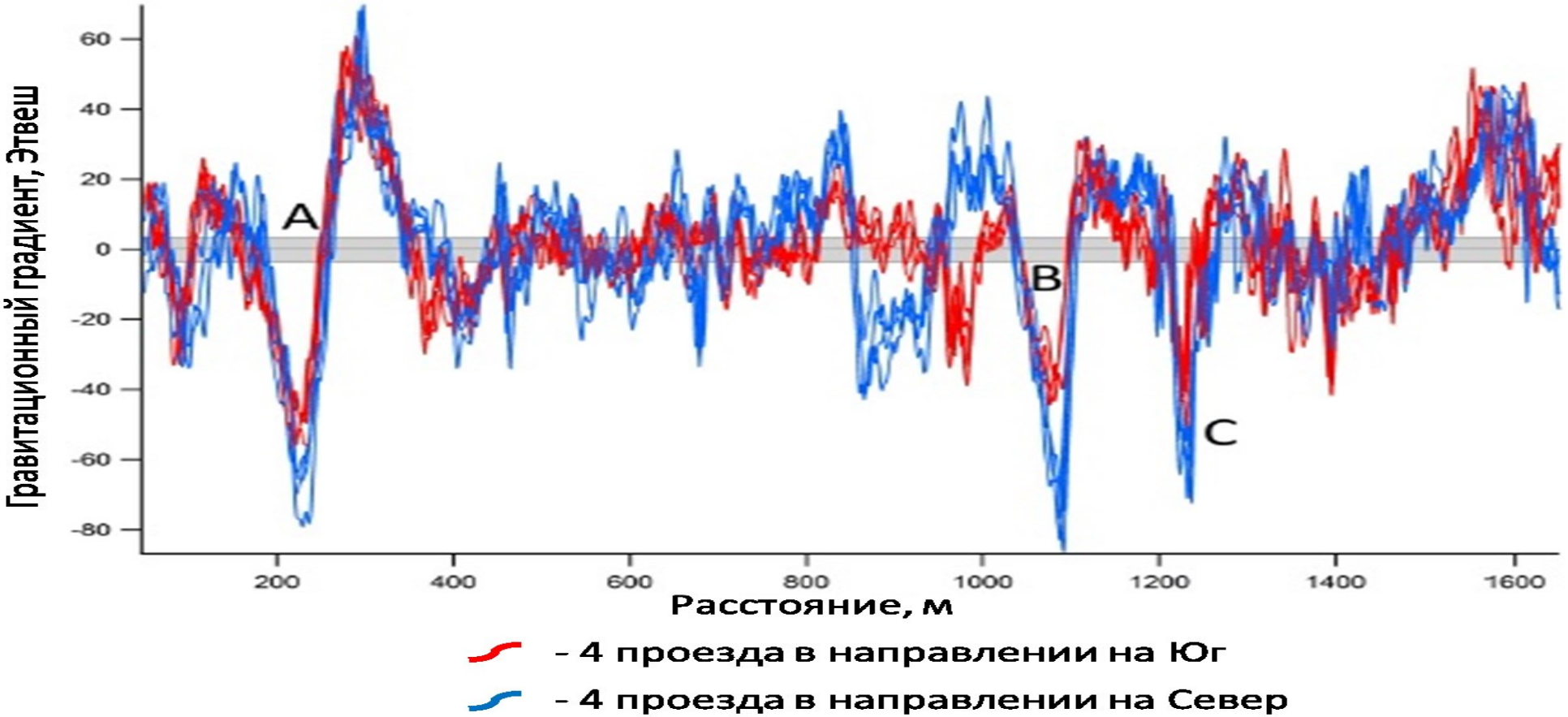
Результаты обоих экспериментов позволяют утверждать, что применение гравиметров и градиентометров возможно в составе наземных комплексов

подготовки геофизических навигационных многослойных карт не только в качестве перебазируемых, но и в качестве мобильных средств измерений. Следует отметить, что в последнее время ведутся разработки по расположению на борту носителя измерителей, для работы которых необходимы условия покоя. В первую очередь речь идет о возможности проводить измерения при помощи АБГ и измерителя уклонения отвесной линии. Уже в начале 2000-х годов была предложена концепция совместного применения для морской гравиметрии АБГ и высокоточного относительного гравиметра, установленных на гиростабилизированной платформе [52]. При этом не обязательно проводить непрерывное измерение УСП с помощью АБГ. Абсолютный гравиметр АБГ может применяться для периодического контроля ВОГ у причала или во время остановок судна в спокойном море. При этом интерес представляют АБГ с малой длиной пути свободного падения [53].

В 2016 году Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» [54] провел тестовые испытания отечественного АБГ ГАБЛ-ПМ, размещенном на модуляционной платформе, совершавшей периодические вертикальные колебания.

Вертикальность чувствительной оси АБГ поддерживалась двухосной гиростабилизированной платформой. Результаты экспериментов подтвердили возможность применения АБГ непосредственно на борту судна, что позволит в будущем в несколько раз сократить затраты времени на проведение морских измерений.

Аналогичные исследования были проведены в 2012 году [55] швейцарскими исследователями. В ходе эксперимента использовался АБГ FGL. После серии наземных экспериментов по установке АБГ на двухосной гиростабилизированной платформе в кузове движущегося грузовика, был выполнен эксперимент по установке АБГ внутри самолета (рисунок 11).



Ось абсцисс – дистанция в метрах, ось ординат – гравитационный градиент в Этвешах, синие кривые – направление маршрутов на Север, красные кривые – направление маршрутов на Юг.

Рисунок 10 - Результаты измерений градиентометра VK1 AGG instrument

Результаты эксперимента по измерению абсолютного значения УСП во время полета показали, что уровень погрешности составил 7 мГал, что не соответствует современным требованиям, предъявляемым к точности аэрогравиметрической съемки [56].

Рисунок 11 - Эксперимент по измерению абсолютного значения УСП на борту самолета при помощи АБГ FGL.

1.3.2 Краткий обзор бортовых гравиметров и градиентометров

1.3.2.1 Гравиметр ГМН-КМ

Комплекс морского гравиметра ГМН-КМ создан ОАО НЕФТЕКИП, РОССИЯ [57] (рисунок 12).

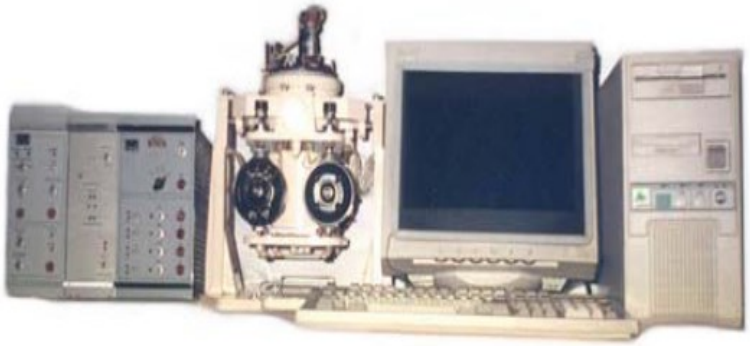


Рисунок 12 - Комплекс морского гравиметра ГМН-КМ, ОАО НЕФТЕКИП

Комплекс ГМН-КМ предназначен для измерений гравитационного поля в океанах, на шельфах и в прибрежно-лиманных зонах.

Основные технические характеристики гравиметра:

– диапазон измерения УСП - 7000 мГал;

– точность измерения УСП в океане при предельном уровне вертикальных возмущающих ускорениях до 200 Гал: до 1,0 мГал;

– точность измерения УСП на шельфах морей и в прибрежно-лиманных зонах при предельных уровнях вертикальных возмущающих ускорений до 25 Гал - 0,10-0,20 мГал;

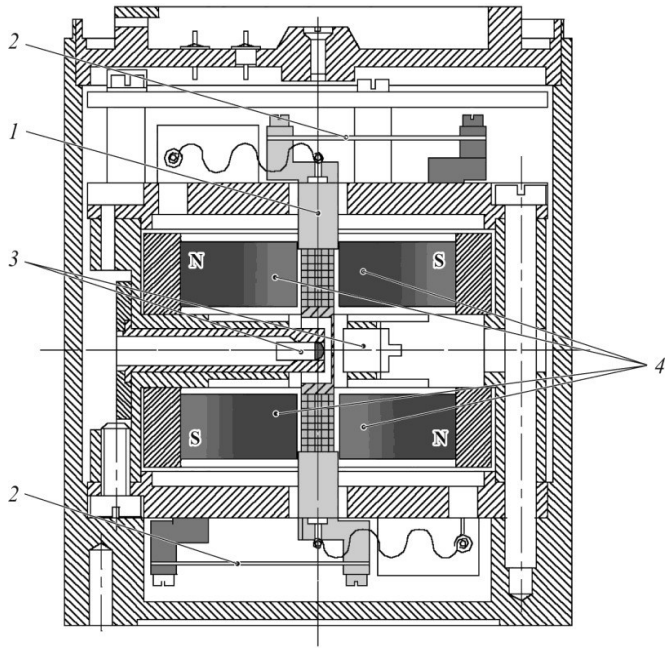
– вес оборудования комплекса - не более 200 кг.

Дальнейшем развитием морских гравиметров с фоторегистрацией стал гравиметрический комплекс «Чета-АГГ», где впервые в мировой и отечественной практике в 1982 г. разработан специализированный цифровой вычислитель, позволяющий измерять УСП в реальном времени. Позднее были созданы комплексы «Скалочник», «Чекан М», «Чекан АМ» [58].

Каждый последующий отличается от предыдущего элементной базой, весогабаритными характеристиками, энергопотреблением, точностными характеристиками, устойчивостью к возмущающим физическим факторам.

1.3.2.2 Бортовой гравиметр МАГ (GT1/2A)

Чувствительная система гравиметрического комплекса МАГ [59] представляет собой емкостный преобразователь, по сигналу которого удерживается пробная масса в нулевом положении электромагнитом. Ток, протекающий через электромагнит, пропорционален изменению силы тяжести и является выходной величиной гравиметра. В этом случае сигнал с датчика используется только для поддержания массы в заданном положении. Обратная связь реализуется электромагнитом, который по сигналу емкостного датчика удерживает пробную массу в нулевом положении (рисунок 13).



Чувствительный элемент имеет осевую конструкцию с пробной массой *1* на упругом подвесе *2*, фотоэлектрический датчик положения *3* и магнитоэлектрические датчики силы *4* (обратной связи и компенсирующий)
Рисунок 13 – Гравиметрический комплекс МАГ

Основные технические характеристики гравиметра:

– диапазон измерения УСП - 8000 мГал;

– диапазон возмущающих ускорений – до 200 Гал;

– точность измерения УСП не хуже 1,0 мГал;

– вес оборудования комплекса - не более 154 кг.

1.3.2.3 Бортовой гравиметр ЧЕКАН-АМ (модель ШЕЛЬФ)

Высокоточный относительный гравиметр «Чекан-АМ» - мобильный универсальный аэро-морской автоматизированный гравиметрический комплекс, который быстро устанавливается на любом судне или самолете, не обслуживается в процессе измерений и не имеет ограничений по погодным условиям [60]. Комплекс ни в чём не уступает иностранным аналогам, а по устойчивости к возмущающим ускорениям превосходит их.

Гравиметр «Чекан-АМ» состоит из гравиметрического датчика и гиростабилизированной платформы.

Основные технические характеристики гравиметра:

– диапазон измерения УСП - 8000 мГал;

– диапазон возмущающих ускорений – до 500 Гал;

– точность измерения УСП не хуже 0,4 мГал;

– вес оборудования комплекса - не более 78 кг.

1.3.2.4 Бортовой градиентометр AirFALCON (HeliFALCON)

В корпорации *Lockheed Martin* [61] разработаны действующие относительнеые ротационные ГГ: одноосный прибор *AGG,* и трехосный прибор *FTG* (или *Air-FTG* для измерений на самолете). Сборка трех вращающихся платформ трехосного прибора *Air-FTG* в кардановом подвесе представлена на рисунке 14.

Рисунок 14 – Сборка трех ортогональных платформ с акселерометрами градиентометра Air-FTG в кардановом подвесе

В приборе *FTG* диаметр вращающейся платформы равен 15 см [62, 63], на платформе установлены четыре дополнительных акселерометра, что позволило повысить чувствительность прибора. Скорость вращения прибора составляет 5-10 Гц, при стабильности вращения на уровне 10^{-7}.

Прибор *FTG* непосредственно измеряет все компоненты градиентного тензора, в том числе и компоненту T_{zz}. Для AGG значение T_{zz} оценивают теоретически методом эквивалентных источников. В этом случае считают, что

погрешность в оценке компоненты T_{zz} примерно вдвое превосходит погрешности измеряемых горизонтальных компонентов.

В [64] приведен подробный анализ шумов *AGG* и *FTG*. Для *AGG* среднеквадратичное значение шума при измерении вертикальной компоненты градиента равно 6-7,6 Этвеш. В [65-67] приводятся данные, что в *FTG* пороговое значение ошибки измерения этой же компоненты градиента находилось в интервале 2 – 3 Е. Отечественных гравитационных градиентометров наземных и бортовых к настоящему моменту времени не создано, ведутся инициативные разработки.

Перспективным направлением разработки является создание конструктивно более простых градиентометров, уравнение сигнала *M* на выходе измерительной системы такого градиентометра имеет вид:

$$M = k_1 \cdot W_\Delta \sin 2\omega t + k_2 \cdot W_{xy} \cos 2\omega t, \tag{1.3}$$

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

Проведенный анализ зарубежных исследований по созданию градиентометров показал, что для исследования их метрологических характеристик единого подхода не сформировано: встречаются как методы калибровки при помощи эталонных масс, выполненных из благородных металлов, так и методы, имитирующие состояние свободного падения, для снижения шумовой составляющей измерений. Требуется провести дополнительные исследования по выбору более простых способов калибровки разрабатываемых градиентометров.

1.3.2.5 О возможностях использования бортовых гравиметров как средств навигации

Как было показано выше, современный парк бортовых гравиметров

удовлетворяет требованиям для обеспечения ассистирующей технологии навигации. При этом, одной из наиважнейших составляющих высокоточной гравиметрической съемки на борту подвижного объекта навигации является система компенсации негравитационных ускорений в вертикальном направлении [68].

В практике выполнения воздушных гравиметрических съемок возмущающие ускорения, вызванные турбулентными потоками воздуха, по амплитуде достигают величин от нескольких десятков до нескольких сотен Гал. Для измерений на борту воздушного судна применяется система компенсации на основе ГНСС приемников, измеряющая возмущающие ускорения борта. В зависимости от интервала усреднения и условий выполнения съемки, погрешность компенсации возмущающих ускорений находится в диапазоне от 0,2 до 0,7 мГал. Это позволяет получать карты измеренных значений УСП с погрешностью от 0,7 до 1,3 мГал [46].

В последнее время в открытой печати появляются статьи про измерения УСП на борту колесного транспортного средства, двигающегося по автодорогам [69]. В ходе отработки методики измерений сотрудниками Национального университета Cheng Kung, Тайвань [70] были выполнены исследования по оценке возможности использования новой системы на базе лазерного дальномера, направленного вниз. В качестве гравиметра использовалась высокоточная БИНС. Результаты повторных заездов по одному маршруту в прямом и обратном направлениях показали, что внутренняя сходимость измеренных значений УСП находится на уровне 1,17 мГал. Погрешность между значениями УСП измеренными на борту автомобиля и значениями УСП, измеренными при помощи гравиметра CG-5 Autograv, находится на уровне 1,9 мГал. Авторы отмечают, что лазерный дальномер показал высокие результаты при использовании в качестве альтернативной автономной системы компенсации бортовых ускорений.

Следует отметить, что попытки использования такого рода систем на борту воздушного судна положительного результата не принесли в виду

большого расстояния и неоднородности отражающей поверхности [71].

При этом, принципиально важным моментом является то, что все бортовые гравиметры являются относительными средствами измерений, т.е. измеряемая величина – это профиль изменения УСП без привязки к абсолютным значениям.

1.3.3 Космическая съемка параметров ГПЗ

Начиная с 2000 года последовательно были запущены четыре космических градиентометрические миссии: CHAMP, GOCE, GRACE и GRACE-FO [72]. В общем виде основные задачи космических градиентометрических миссий состояли в следующем:

– опытное радиозондирование атмосферы и ионосферы в интересах оперативного прогноза погоды, навигации и изучения глобальных изменений климата, а также прием сигналов GPS, отраженных от поверхности океана;

– определение гравитационного ускорения поля Земли с точностью лучше, чем 1 мГал (1 мГал = 10^{-5} м/с^2) через измерение тензора градиента силы тяжести в совокупности с измерениями относительного движения по линии спутник GOCE – спутники GPS с помощью бортового многоканального навигационного приемника;

– определение высоты геоида (т.е. высоты эквипотенциальной поверхности гипотетического океана в состоянии покоя) с точностью лучше, чем 1 см;

– выполнение этих двух измерений при длине волны разложения гравитационного потенциала менее 100 км (что соответствует степени и порядку сферических гармоник разложения около 200).

В настоящее время запущена и функционирует космическая миссия GRACE-FO.

Структура GRACE – FO имеет много общего со своим предшественником GRACE:

− используются два спутника в качестве пробных масс;

− тела спутников имеет схожую форму и размеры со спутниками

GRACE;

− спутники располагаются на круговых полярных орбитах,

− высота орбиты ~ 420 км, расстояние между спутниками 220 км.

Главным отличием проекта GRACE – FO является наличие собственной орбиты у каждого спутника GRACE – FO, максимальное расхождение между плоскостями которых составляет 25 км (рисунок 16).

Рисунок 16 - Орбитальная группировка GRACE - FO

Основным инструментом для измерения межспутникового расстояния является фазовый радиодальномер на двух частотах. Однако в качестве эксперимента и демонстрации возможностей в спутники GRACE – FO включили лазерный интерферометр. Погрешность измерения межспутникового расстояния таким средством измерений составляет порядка 10^{-8}, что на два порядка меньше, чем погрешности фазового радиодальномера. Это существенно повышает точность определения параметров ГПЗ и увеличивает разрешающую способность, что позволяет детектировать малые гравитационные возмущения.

Спутники космических миссий CHAMP, GOCE, GRACE и GRACE-FO являются мощным инструментом для изучения таких глобальных вопросов как изменение климата, перемещение масс, изменение баланса континентальных вод, а самое главное – мониторинга параметров гравитационного поля. Дополнительно следует отметить, что измерения при помощи низкоорбитальных спутников является единственным глобальным

методом уточнения параметров ГПЗ. Доступ к базам данных измерений космических градиентометров является открытым, однако обновление данных происходит постепенно по мере обработки сырых спутниковых данных. Доступа к телеметрии спутников в режиме реального времени нет. Также остаются неясными методы калибровки и подтверждения характеристик средств измерений из состава космических миссий. Следовательно, проверить качество предоставляемой информации представляется затруднительным.

Российская перспективная космическая измерительная система находится в стадии разработки.

1.3.4 Методы создания карт параметров ГПЗ по глобальным моделям

Навигационные гравитационные карты могут создаваться по следующим слоям:

– карта-слой аномалий УСП;

– карта-слой гравитационных градиентов вертикальных;

– карта-слой гравитационных градиентов горизонтальных.

Источниками исходных данных для создания цифровых карт трансформант ГПЗ могут служить как данные, полученные из непосредственных измерений, так и при использовании существующих моделей ГПЗ. Основной особенностью моделей ГПЗ является то, что по одним и тем же гравиметрическим данным могут быть подготовлены многослойные карты различных параметров. Описание методов определения трансформант ГПЗ приведено ниже.

Исходной информацией для разработки высокоточных (высокостепенных) моделей ГПЗ служат спутниковые альтиметрические и наземные гравиметрические данные. В последние годы произошел качественный скачок в решении проблемы построения моделей ГПЗ на основе спутниковых методов. Он обусловлен постоянно растущими требованиями к точности решения различного рода геодезических, геофизических,

астрономических и других прикладных задач, и связан, прежде всего, с бурным развитием космических исследований, успехами, достигнутыми в области разработки новых средств и методов космической геодезии, вычислительной техники, с реализацией новых спутниковых программ. В таблице 2 приведены некоторые известные высокостепенные модели ГПЗ [73].

Таблица 2 – Высокостепенные модели ГПЗ

Модель	Год создания	Степень	Данные	Организация
GECO	2015	2190	EGM2008, S(Goce)	DICA, Italy
EIGEN-6C4	2014	2190	A, G, S(Goce), S(Grace), S(Lageos)	GFZ Potsdam and GRGS Toulouse
GGMPlus	2013		GOCE, GRACE, EGM2008, Topography	Curtin University, Australia Technical University Munich, Germany
EIGEN-6C2	2012	1949	S(GOCE,GRACE,LAGEOS),G,A	Gfz-Potsdam
ГАО2012, Россия	2012	360	S(GOCE),G,A	ЦНИИГАиК, Россия
GIF48	2011	360	S(GRACE),G,A	University Texas
EIGEN-6C	2011	1420	S(GOCE,GRACE,LAGEOS),G,A	Gfz-Potsdam
EIGEN-51C	2010	359	S(GRACE,Champ),G,A	Gfz-Potsdam
GGM03C	2009	360	S(GRACE),G,A	Gfz-Potsdam
EIGEN-5C	2008	360	S(GRACE,LAGEOS),G,A	Gfz-Potsdam
EGM2008	2008	2190	S(GRACE),G,A	NGA
ЭМ2008	2006	360	S (GL04S), G,A	ВТУ МО РФ, Россия
EIGEN-GL04C	2006	360	S(GRACE,LAGEOS),G,A	Gfz, GRGS-Тулуза
EIGEN-CG03C	2005	360	S(Champ,GRACE),G,A	Gfz-Potsdam
EIGEN-CG01C	2004	360	S(Champ,GRACE),G,A	Gfz-Potsdam
ПЗ-2002/360	2004	360	S(ГЕО-ИК), G,A	ВТУ МО РФ, Россия
GGM02C	2004	200	S(GRACE), G, A	University Texas
GGM01C	2003	200	TEG4, S(GRACE)	University Texas

Все модели ГПЗ находятся в свободном доступе их можно загрузить с сайта Gfz-Potsdam (кроме российских моделей) в формате .gfc.

Формулы для вычисления трансформант ГПЗ в интересах создания карт-слоев можно вычислить по следующим формулам, приведенным в ПЗ-90.11

[74]:

– для смешанных аномалий силы тяжести:

$$\Delta g(\rho,\varphi,\lambda)=\frac{fM}{\rho^2}\sum_{n=2}^{N}(n-1)\left(\frac{a}{\rho}\right)^n\sum_{m=0}^{N}\left(\Delta\bar{C}_{nm}\cos m\lambda+\bar{S}_{nm}\sin m\lambda\right)\bar{P}_{nm}(\sin\varphi);$$

- для гравитационных градиентов:

$$|\nabla W|=\sqrt{\left(W_{ap}+\Phi_p\right)^2+\left[\frac{1}{p\cos\varphi}\left(W_{a\lambda}+\Phi_\lambda\right)^2\right]+\left[\frac{1}{p}\left(W_{a\varphi}+\Phi_\varphi\right)^2\right]},$$

$$W_{ap}=-\frac{fM}{p^2}\sum_{h=0}^{N}(n+1)\left(\frac{a}{p}\right)^n\sum_{m=0}^{N}\left(C_{nm}^{W}\cos m\lambda+S_{nm}^{W}\sin m\lambda\right)P_{nm}(\sin\varphi),$$

$$W_{a\lambda}=-\frac{fM}{p}\sum_{h=0}^{N}\left(\frac{a}{p}\right)^n\sum_{m=0}^{N}m\left(S_{nm}^{W}\cos m\lambda-C_{nm}^{W}\sin m\lambda\right)P_{nm}(\sin\varphi),$$

$$W_{a\varphi}=\frac{fM}{p}\sum_{h=0}^{N}\left(\frac{a}{p}\right)^n\sum_{m=0}^{N}\frac{\partial P_{nm}(\sin\varphi)}{\partial\varphi}\left(C_{nm}^{W}\cos m\lambda+S_{nm}^{W}\sin m\lambda\right),$$

при этом центробежный потенциал в общем виде:

$$\Phi=\frac{1}{2}\omega^2p^2(\cos\varphi)^2,$$

$$\Phi_p=\omega^2p(\cos\varphi)^2,$$
$$\Phi_\lambda=0,$$
$$\Phi_\varphi=-\omega^2p^2\cos\varphi\sin\varphi,$$

– для высот квазигеоида:

$$\varsigma(\rho,\varphi,\lambda)=\frac{fM}{\gamma\rho^2}\sum_{n=2}^{N}\left(\frac{a}{\rho}\right)^n\sum_{m=0}^{N}\left(\Delta\bar{C}_{nm}\cos m\lambda+\bar{S}_{nm}\sin m\lambda\right)\bar{P}_{nm}(\sin\varphi);$$

– для составляющих уклонений отвесной линии:

$$\xi(\rho,\varphi,\lambda)=-\rho''\frac{fM}{\gamma\rho^2}\sum_{n=2}^{N}\left(\frac{a}{\rho}\right)^2\sum_{m=0}^{N}\left(\Delta\bar{C}_{nm}\cos m\lambda+\bar{S}_{nm}\sin m\lambda\right)\bar{P}'_{nm}(\sin\varphi),$$

$$\eta(\rho,\varphi,\lambda)=\rho''\frac{fM}{\gamma\rho^2\cos\varphi}\sum_{n=2}^{N}\left(\frac{a}{\rho}\right)^2\sum_{m=0}^{N}\left(\Delta\bar{C}_{nm}\sin m\lambda-\bar{S}_{nm}\cos m\lambda\right)\bar{P}_{nm}(\sin\varphi),$$

$$\varepsilon=\sqrt{\xi^2+\eta^2},$$

где $\rho''=206264{,}80625''$;

$\bar{P}_{nm}(\sin\varphi)$, $\bar{P}'_{nm}(\sin\varphi)$ – полностью нормированные полиномы Лежандра и их производные;

fM − геоцентрическая гравитационная постоянная с учетом атмосферы;

a − большая полуось общеземного эллипсоида;

N – максимальная степень ряда;

ρ, φ, λ – сферические геоцентрические координаты точки;

$\bar{S}_{nm}$, $\Delta\bar{C}_{nm}$ – полностью нормированные коэффициенты степени *n* и порядка *m*; $\Delta\bar{C}_{nm} = C_{nm}$ за исключением коэффициентов зональных гармоник четных степеней n = 2, 4, 6 и 8;

γ – нормальное значение УСП, вычисляемое по формуле:

$$\gamma(B, H_{=0}) = \frac{a\gamma_a \cos^2 B + b\gamma_b \sin^2 B}{\sqrt{a^2 \cos^2 B + b^2 \sin^2 B}},$$

где B – геодезическая широта;

H – геодезическая высота;

γ_a, γ_b – ускорение нормальной силы тяжести на экваторе и полюсе общеземного эллипсоида;

$$\left.\begin{aligned} \gamma_a &= \frac{fM}{a^2}\left[1 - \sum_n (2n+1) J_n^0 P_n(0)\right] - \omega^2 a \\ \gamma_b &= \frac{fM}{b^2}\left[1 - \sum_n (2n+1)\left(\frac{a}{b}\right) J_n^0\right] \end{aligned}\right\} \text{ для } n\text{=2, 4, 6 и 8.}$$

Зависимость нормального значения УСП от высоты имеет вид:

$$\gamma(B, H) \cong \gamma(B, H_{=0})(1 + f_1 H + f_2 H \sin^2 B + f_3 H^2),$$

где

$$f_1 = -\frac{2}{a}(1 + \alpha + m), \qquad f_2 = \frac{4}{a}\alpha,$$
$$f_3 = \frac{3}{a^2}, \qquad m = \frac{\omega^2 a}{\gamma_a}.$$

Несмотря на многообразие цифровых моделей ГПЗ, потенциально удовлетворяющих требованиям, предъявляемым к навигационным гравитационным картам, следует обратить внимание, что модели построены с привлечением разнородных спутниковых, авиа- , морских- и наземных гравиметрических данных, поэтому точность вычисления параметров ГПЗ требует проверки на специальных тестовых площадках (гравиметрических

полигонах).

1.3.5 Выводы по разделу 1.3

1) Исследование методов гравиметрической съемки для подготовки навигационных гравитационных карт показывает, что наибольшую точность обеспечивает наземная съемка параметров ГПЗ. Морская и воздушная гравиметрические съемки находятся примерно на одном уровне точности. Рекомендуемым направлением применения наземных гравиметрических съемок являются измерения вдоль линейных объектов (дороги, ж/д дороги и т.д.) в виду малой производительности наземных работ. Морская и воздушная гравиметрические съемки наиболее эффективны при подготовке навигационных гравитационных карт на большие территории. Недостатками всех трех видов гравиметрической съемки являются их локальный характер, а также отсутствие возможности проведения измерений на недоступных территориях (например, на территории другой страны).

2) Информации о существующих унифицированных комплексах подготовки навигационных гравитационных карт нет. Необходимо выполнить исследования по формированию основных задач, решаемых комплексом, обоснованию состава измерительной и вычислительной аппаратуры, а также сформировать методику его применения для решения типовых задач.

3) Существующий парк бортовых гравиметров и градиентометров потенциально обладает точностью, необходимой как для подготовки навигационных гравитационных карт, так и для размещения их на борту средств навигации для первичной отработки методов автономной навигации по ГПЗ. Отечественные перебазируемые и бортовые градиентометры не созданы. Методы испытаний и калибровки перспективных бортовых градиентометров не разработаны. Требуется провести исследования по выбору простого способа калибровки разрабатываемых градиентометров.

4) Космическая съемка параметров ГПЗ является единственным методом подготовки глобальных навигационных гравитационных карт на удаленные и труднодоступные территории. Разрешающая способность такого

метода ограничена плотностью измерений: одно измерение с погрешностью 1 мГал на 60 – 100 км. Этот метод может использоваться только для измерений сглаженных абсолютных значений УСП на удаленных территориях.

5) Методы создания навигационных гравитационных карт параметров ГПЗ по глобальным моделям являются наиболее оперативными и наименее ресурсозатратными. Однако требуется провести дополнительные исследования по оценке достижимой точности вычислений параметров ГПЗ на примере гравиметрических полигонов с известными характеристиками ГПЗ.

1.4 Выводы по главе 1 и постановка задач исследований

1) Анализ возможностей перспективных КЭНС на базе бортовых гравиметров и градиентометров показывает, что достижимая погрешность навигации таких КЭНС находится на уровне от 900 до 1800 метров. При этом для реализации КЭНС на основе измерителей параметров ГПЗ необходимо обладать навигационными гравитационными картами параметров ГПЗ с погрешностью не хуже 2 мГал и 10 Этвеш, при дискретности 1 км.

2) В настоящее время ключевым моментом, сдерживающим создание автономных навигационных систем по ГПЗ является их низкая обеспеченность цифровыми навигационными гравиметрическими картами.

3) Исследование методов оценки изученности гравитационного поля Земли показывает, что в открытом доступе хранится большое количество разнородной гравиметрической информации. Распространение баз данных аномалий УСП ограничено по площади и объему. Базы данных гравитационных градиентов отсутствуют. Информация о характере распределения УСП и гравитационных градиентов внутри закрытых помещений и вдоль горных ущелий нет. Необходимо разработать метод создания навигационных гравитационных карт, в том числе на удаленные территории, внутри закрытых помещений и вдоль горных ущелий.

4) Базы данных аномалий УСП не обладают единым форматом,

масштабом и погрешностью значений УСП. Необходимо разработать метод создания навигационных гравитационных карт из нерегулярных данных в узлы сетки с регулярным шагом 1 км.

5) Проведенный анализ методов контроля стабильности УСП во времени показывает, что достижимая погрешность учета вариаций УСП составляет десятки мкГал. Единого подхода при контроле влияния вариаций атмосферного давления и уровня грунтовых вод не существует. Необходимо выполнить дополнительные исследования по оценке величины неприливных вариаций УСП, вызванных долговременной стабильностью ГПЗ, изменением атмосферного давления и гидрологической обстановки в районе измерений.

6) Исследование методов гравиметрической съемки для подготовки навигационных гравитационных карт показывает, что наибольшую точность обеспечивает наземная съемка параметров ГПЗ. Морская и воздушная гравиметрические съемки находятся примерно на одном уровне точности. Рекомендуемым направлением применения наземных гравиметрических съемок являются измерения вдоль линейных объектов (дороги, ж/д дороги и т.д.) в виду малой производительности наземных работ. Морская и воздушная гравиметрические съемки наиболее эффективны при подготовке навигационных гравитационных карт на большие территории. Недостатками всех трех видов гравиметрической съемки являются их локальный характер, а также отсутствие возможности проведения измерений на недоступных территориях (например, на территории другой страны).

7) Информации о существующих унифицированных комплексах подготовки навигационных гравитационных карт нет. Необходимо выполнить исследования по формированию основных задач, решаемых комплексом, обоснованию состава бортовой измерительной и вычислительной аппаратуры, а также сформировать методику его применения для решения типовых задач при создании навигационных гравитационных карт.

8) Существующий парк бортовых гравиметров и градиентометров потенциально обладает точностью, необходимой как для подготовки

навигационных гравитационных карт, так и для размещения их на борту средств навигации для первичной отработки методов автономной навигации по ГПЗ. Отечественных перебазируемых и бортовых градиентометров не создано. Методы испытаний и калибровки перспективных бортовых градиентометров не разработаны. Требуется провести исследования по выбору простого способа калибровки разрабатываемых градиентометров.

9) Космическая съемка параметров ГПЗ является единственным методом подготовки глобальных навигационных гравитационных карт. Однако разрешающая способность такого метода ограничена одним измерением с погрешностью 1 мГал на 60 – 100 км. Этот метод может использоваться только для измерений сглаженных абсолютных значений УСП на удаленных территориях.

10) Методы создания навигационных гравитационных карт параметров ГПЗ по глобальным моделям являются наиболее оперативными и наименее ресурсозатратными. Однако, требуется провести дополнительные исследования по оценке достижимой точности вычислений параметров ГПЗ на примере гравиметрических полигонов с известными характеристиками ГПЗ.

11) Необходимо разработать метод подготовки навигационных гравитационных карт, особенно, на удаленные территории, на основе привлечения дополнительной информации о связи ГПЗ с другими геофизическими полями, например, с полем рельефа земной поверхности.

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.

2.1 Исследования по оценке достижимой точности вычислений параметров ГПЗ на примере гравиметрических полигонов с известными характеристиками

Подтверждение характеристик высокоточных моделей гравитационного поля Земли возможно на специальных полигонах путем получения набора гравиметрических измерений при помощи средств измерений утвержденного типа и эталонов с известными характеристиками, которые в процессе обработки приводятся к необходимому формату, пригодному для оценки модели ГПЗ. Таким методом осуществляется калибровка цифровых моделей ГПЗ по опорным значениям. Одной из наиболее распространенных моделей ГПЗ является модель EGM2008. Расстояние между узлами ячеек модели составляет 18,5 км, заявленная погрешность значений аномалии УСП в редукции свободного воздуха с учетом поправок за приливные вариации составляет 5 мГал.

Оценка погрешности модели выполнялась для следующих территорий:

– гравиметрический полигон ФГУП «ВНИИФТРИ» Московской области (холмистая местность);

– локальный гравиметрический полигон ФГУП «ВНИИФТРИ» Московской области (холмистая местность);

– профиль гравиметрический от ФГУП «ВНИИФТРИ» до г. Троицк Московской области (холмистая местность);

– гравиметрический полигон ФГУП «ВНИИФТРИ» Иркутской области (предгорная местность);

– испытательный гравиметрический полигон «Kauring airborne gravity test site», Западная Австралия [75] (холмистая местность).

2.1.1 Методика выполнения измерений на полигонах ФГУП «ВНИФТРИ»

Средства измерений, которые применялись для экспериментальной оценки модели EGM2008:

– АБГ FG-L зав. №106 фирмы Micro-g LaCoste из состава «Государственного вторичного эталона единицы ускорения свободного падения в диапазоне значений от 9,77 до 9,85 м/с^2» с погрешностью измерений не хуже 10 мкГал:

– высокоточные относительные гравиметры – два гравиметра Scintrex CG-5 Autograv с погрешностью измерений не хуже 5 мкГал;

– гравиметрический пункт №2 из состава «Государственного вторичного эталона единицы ускорения свободного падения в диапазоне значений от 9,77 до 9,85 м/с^2», р.п. Менделеево;

– гравиметрический пункт «Ломоносов-1» из состава Государственного первичного специального эталона единицы ускорения в области гравиметрии. ГЭТ 190-2019, г. Санкт-Петербург;

– гравиметрический пункт «ГрП-6031» Восточно-Сибирского филиала ФГУП «ВНИИФТРИ», г.Иркутстк.

В силу того, что на пунктах полигонов необходимо значение абсолютной величины УСП, а гравиметры Scintrex CG-5 Autograv измеряют разность УСП, то для выполнения косвенных измерений была разработана и аттестована «Методика измерений ускорения свободного падения с использованием гравиметра CG-5 Autograv», свидетельство об аттестации методики № 284-RA.RU.311243-2016 от 24.11.2016 г [76].

Согласно методике измерений, определение значений УСП на пунктах гравиметрических полигонов выполнялись дифференциальным методом измерений с использованием исходного значения УСП на пунктах Государственной фундаментальной гравиметрической сети (ГФГС):

$$g_{оп} = g_{ГФГС} + \Delta g_{оп}$$
$$g_{ряд} = g_{оп} + \Delta g_{ряд} \quad , \qquad (2.1)$$

где $g_{ГФСГ}$ – значение ускорения свободного падения (УСП) на пункте ГФГС, $g_{оп}$ - значение УСП на гравиметрическом пункте опорном, $g_{ряд}$ - значение УСП на гравиметрическом пункте рядовом, $\Delta g_{оп}$ - измеренное значение разности УСП между пунктом ГФГС и гравиметрическим пунктом опорным, $\Delta g_{ряд}$ - измеренное значение разности УСП между гравиметрическим пунктом опорным и гравиметрическим пунктом рядовым.

Значение УСП на ГФГС получали путем прямого измерения при помощи АБГ FG-L зав. №106. Для измерений, выполненных на территории Московской области применялась двухступенчатая система определения значений УСП:

$$g_{ряд} = g_{ГФГС} + \Delta g_{ряд},$$

Для измерений, выполненных на территории Иркутской области применялась трехступенчатая система определения значений УСП согласно (2.1).

Погрешность измерений

Составляющими неисключенной систематической погрешности (НСП) метода измерения УСП с использованием гравиметра CG-5 Autograv являются:

- предел допускаемой абсолютной погрешности измерений ускорения свободного падения на пункте ГФГС с использованием Государственного вторичного эталона единицы ускорения свободного падения в диапазоне значений от 9,77 до 9,85 м/с2 составляет ΘУСП = 10·10-8 м/с2;

- предел допускаемой абсолютной погрешности измерений разности значений ускорения свободного падения в рабочем диапазоне от 9,76 до 9,84 м/с2 от пункта ГФГС на гравиметрический пункт опорный составляет ΘΔУСП = 5·10- 8 м/с2;

- предел допускаемой абсолютной погрешности измерений разности значений ускорения свободного падения в рабочем диапазоне от 9,76 до 9,84 м/с2 от пункта опорного гравиметрического на гравиметрические пункты рядовые составляет ΘΔУСП = 5·10-8 м/с2;

Число составляющих НСП равно трем. Принимая допущение о равномерном распределении НСП, доверительные границы погрешности измерений ускорения свободного падения на гравиметрическом пункте опорном вычислялись по формулам (п. 9.1 ГОСТ Р 8.736-2011):

$$\Delta_{ГПО} = \pm K \cdot S_{\Sigma ГПО},$$

где $S_{\Sigma ГПО} = \sqrt{S^2_{\Theta ГПО} + S^2_{\bar{x} ГПО}}$;

$$S_{\Theta ГПО} = \frac{\Theta_{\Sigma ГПО}}{\sqrt{3}};$$

$$\Theta_{\Sigma ГПО} = \Theta_{ГФГС} + \Theta_{\Delta УСП};$$

$$K = \frac{\varepsilon_{ГПО} + \Theta_{\Sigma ГПО}}{S_{\bar{x} ГПО} + S_{\Theta ГПО}};$$

$S_{\bar{x} ГПО} = \frac{S_{ГПО}}{\sqrt{n}}$, где n – количество измерений, $S_{ГПО}$ – СКО единичного измерения.

$\varepsilon = t \cdot S_{\bar{x} ГПО}$, где t коэффициент Стьюдента равный 3.182 для четырех измерений.

Доверительные границы для измерений ускорения свободного падения на гравиметрическом пункте рядовом вычислялись по формулам (п. 9.1 ГОСТ Р 8.736-2011):

$$\Delta_{ГПР} = \pm K \cdot S_{\Sigma ГПР},$$

где $S_{\Sigma ГПР} = \sqrt{S^2_{\Theta ГПР} + S^2_{\bar{x} ГПР} + S^2_{\bar{x} ГПО}}$;

$$S_{\Theta ГПР} = \frac{\Theta_{\Sigma ГПР}}{\sqrt{3}};$$

$$\Theta_{\Sigma ГПР} = \Theta_{ГФГС} + \Theta_{\Delta УСП} + \Theta_{\Delta УСП};$$

$$K = \frac{\varepsilon_{ГПР} + \Theta_{\Sigma ГПР}}{S_{\bar{x} ГПР} + S_{\Theta ГПР}};$$

$$S_{\bar{x} ГПР} = \frac{S_{ГПР}}{\sqrt{n}},$$

где n – количество измерений, $S_{ГПР}$ – СКО единичного измерения.

$$\varepsilon = t \cdot S_{\bar{x} ГПР},$$

где t коэффициент Стьюдента равный 3.182 для четырех измерений.

Таким образом, доверительные границы, в которых с вероятностью 0,95 находится погрешность измерения УСП пункта гравиметрического, представлены в Таблице 2.1.

Таблица 2.1 Погрешность измерений значения УСП на пунктах полигонов

Наименование пунктов	Доверительные границы погрешности измерения УСП (при доверительной вероятности P=0,95), м/с^2 (мГал)
Для измерений на территории Московской и Ленинградской областей	
Пункт ГФГС	$\pm 10 \cdot 10^{-8}$ (±0,01)
Гравиметрический пункт рядовой	$\pm 25 \cdot 10^{-8}$ (±0,025)
Для измерений на территории Иркутской области	
Пункт ГФГС	$\pm 10 \cdot 10^{-8}$ (±0,01)
Гравиметрический пункт опорный	$\pm 25 \cdot 10^{-8}$ (±0,025)
Гравиметрический пункт рядовой	$\pm 35 \cdot 10^{-8}$ (±0,035)

2.1.2 Оценка характеристик модели EGM2008 для территории Московской области

2.1.2.1 Гравиметрический полигон ФГУП «ВНИИФТРИ» Московской области

В 2016 году автором были выполнены опытные работы по измерению значений УСП на территории Московской области [77]. Учитывая размер ячейки модели EGM2008, расстояние между пунктами рядовой сети наблюдений было выбрано 5 км. В силу невозможности организовать рядовую сеть наблюдений с регулярным размером ячейки из-за плотной застройки территорий Московской области, часть пунктов наблюдений была перенесена на дорожную инфраструктуру с совмещением с инженерными сооружениями для дальнейшей сохранности пунктов. Схема расположения пунктов измерений представлена на рисунке 2.1. Количество пунктов рядовой сети составило 136, опорной – 5. Координатная привязка результатов измерений УСП выполнялась приемниками геодезическими Javad Sigma.

Последовательность выполнения оценки характеристик модели EGM2008:

– формирование каталога вида X, Y, H, $g_{ряд}$;

– вычисление аномалии за свободный воздух FA по измеренным значениям УСП, формирование базы данных «FA_Измеренная» вида X, Y, FA_Изм;

– вычисление аномалии за свободный воздух по модели EGM2008 в координатах пунктов рядовой сети, формирование базы данных «FA_Вычисленная» вида X, Y, FA_Выч;

– при помощи программного обеспечения Golden Software Surfer методом триангуляции и линейной интерполяции формируются файлы «FA_Изм.grd» и «FA_Выч.grd» типа «grid» с равномерным расстоянием между узлами сетки 1 км;

– вычисляется разность между «FA_Изм.grd» и «FA_Выч.grd», формируется итоговый файл разности «FA_Изм - FA_Выч.grd»;

– итоговый файл разности «FA_Изм - FA_Выч.grd» является характеристикой модели EGM2008, вычисляется погрешность значений УСП модели EGM2008.

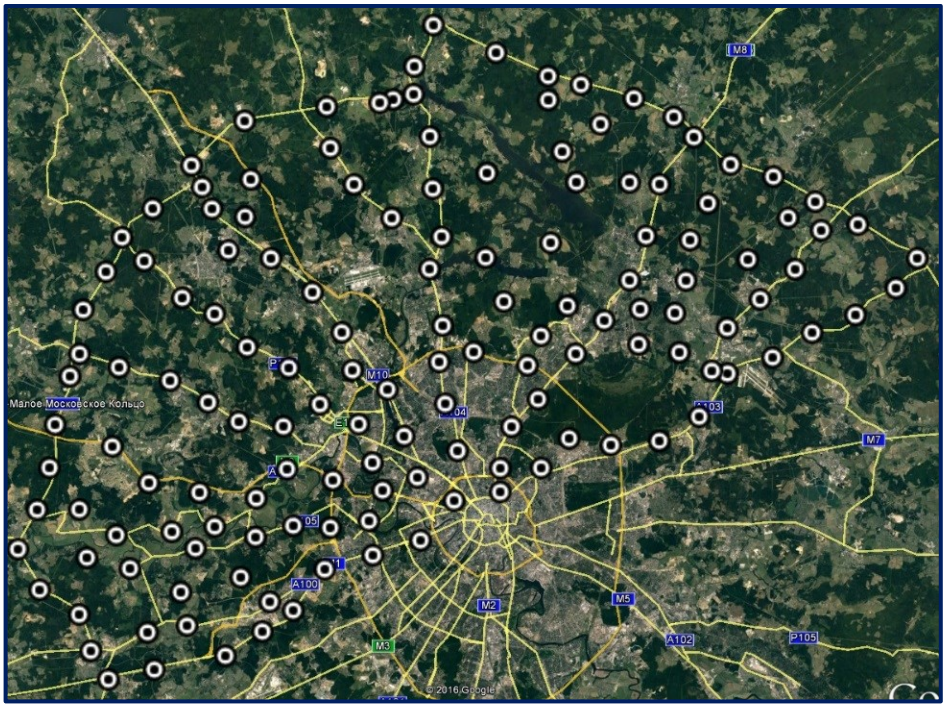


Рисунок 2.1 - Схема пунктов рядовой сети наблюдения Московской области

На рисунках 2.2 – 2.4 последовательно приведены карты «FA_Измеренная», «FA_Вычисленная» и карта разности «FA_Изм - FA_Выч».

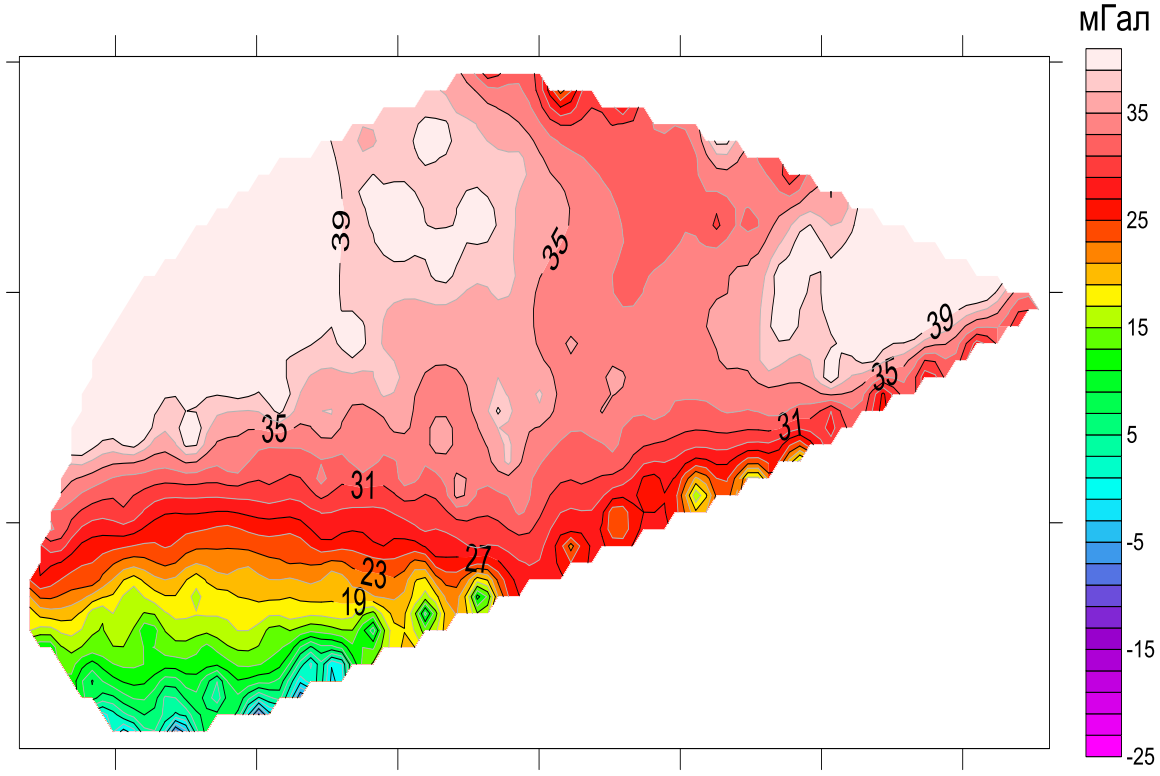


Рисунок 2.2 - Карта аномалий УСП Московской области по измеренным данным

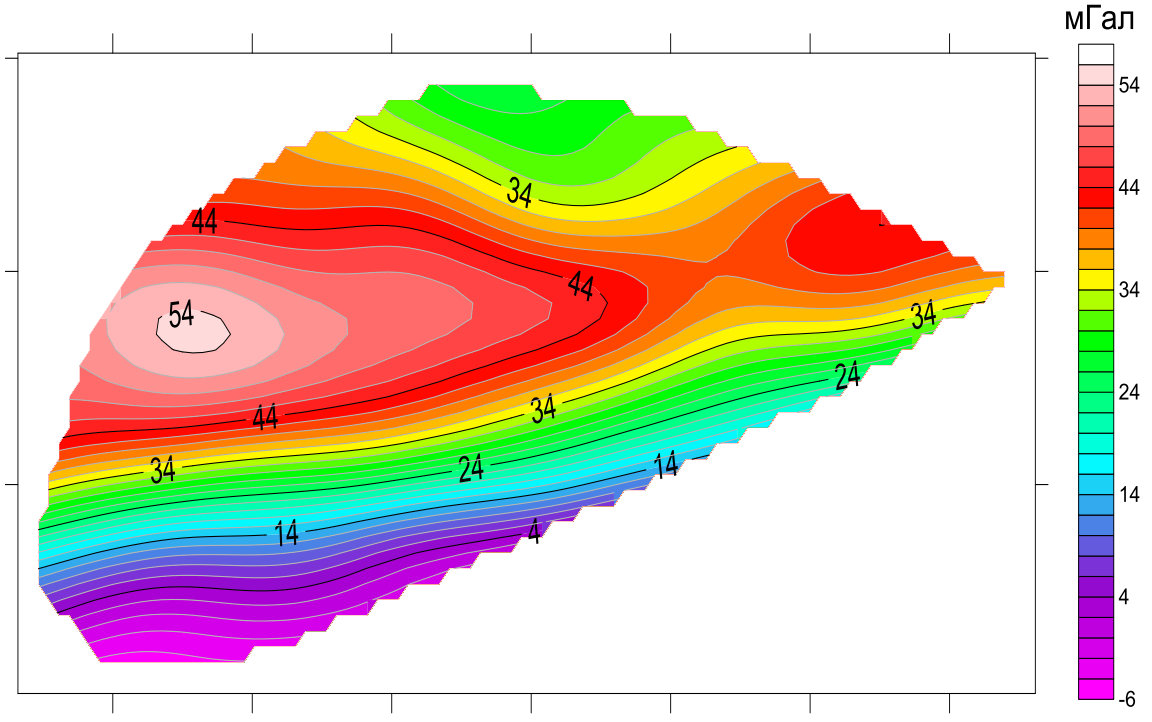


Рисунок 2.3 – Карта аномалий УСП Московской области, вычисленная по модели EGM2008

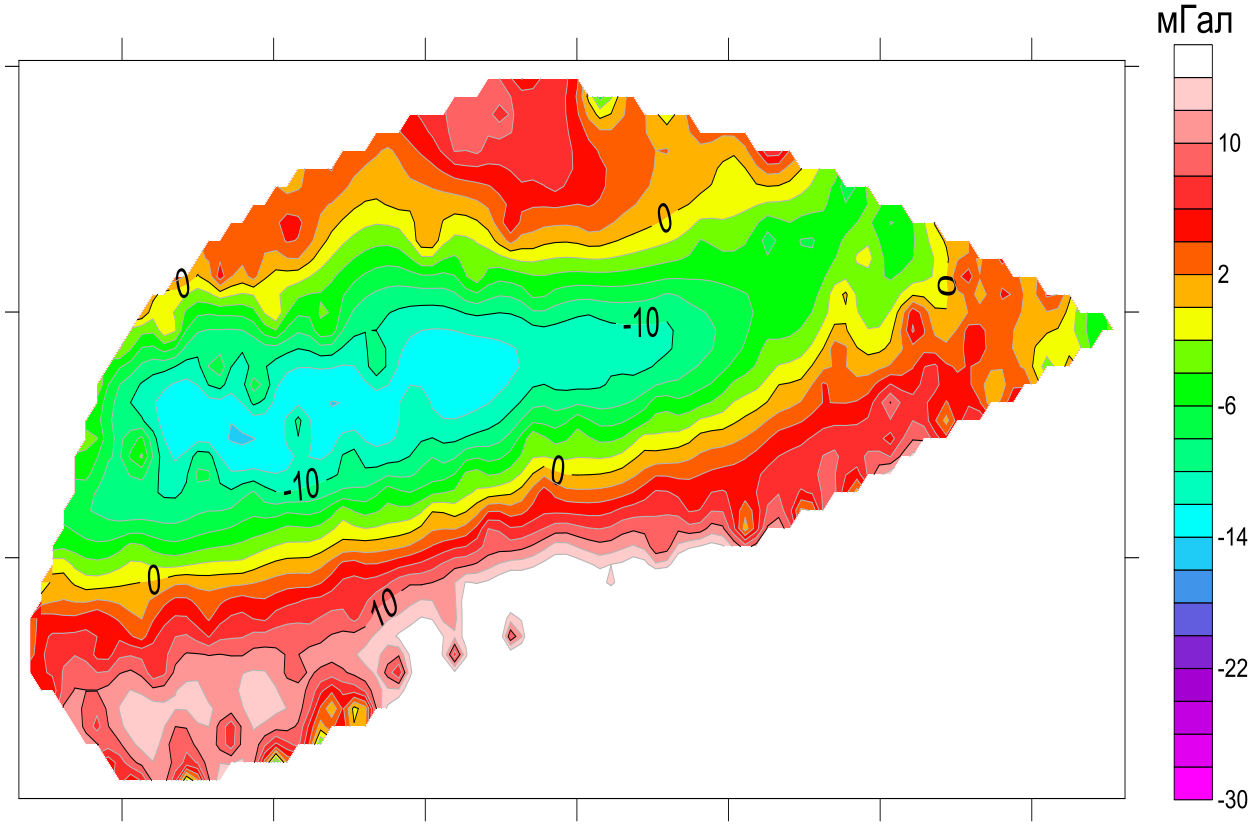


Рисунок 2.4 – Карта разности «FA_Изм - FA_Выч» для модели EGM2008

Проведенный анализ показал, что модель EGM2008 для территории Московской области имеет погрешность определения значений УСП на уровне 6 мГал (таблица 2.2).

Таблица 2.2 - Параметры точности аномалий УСП модели EGM2008

Характеристика	Значение, мГал
СКО	6
Среднее значение разности	0

Аналогичные вычисления были выполнены и по модели GGMPlus. Погрешность модели GGMPlus составила 5,5 мГал, что также превышает требуемую погрешность определения значений УСП (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Параметры точности аномалий УСП модели GGMPlus

Характеристика	Значение, мГал
СКО	5,5
Среднее значение разности	2

2.1.2.2 Профиль гравиметрический от ФГУП «ВНИИФТРИ» до г. Троицк Московской области

В 2019 году автором были проведены экспериментальные измерения УСП и составляющих уклонения отвесной линии вдоль профиля, проходящего вкрест направления Московской синеклизы (рисунок 2.5, 2.6). Особенности геологического строения Русской плиты таковы, что породы, слагающие осадочный чехол образуют отрицательную аномалию УСП амплитудой до 50 мГал [78]. При этом, линейные размеры аномалии таковы, что на расстоянии 60 км при поперечном движении величина аномалии УСП последовательно меняется от +30 до -20 мГал и обратно.

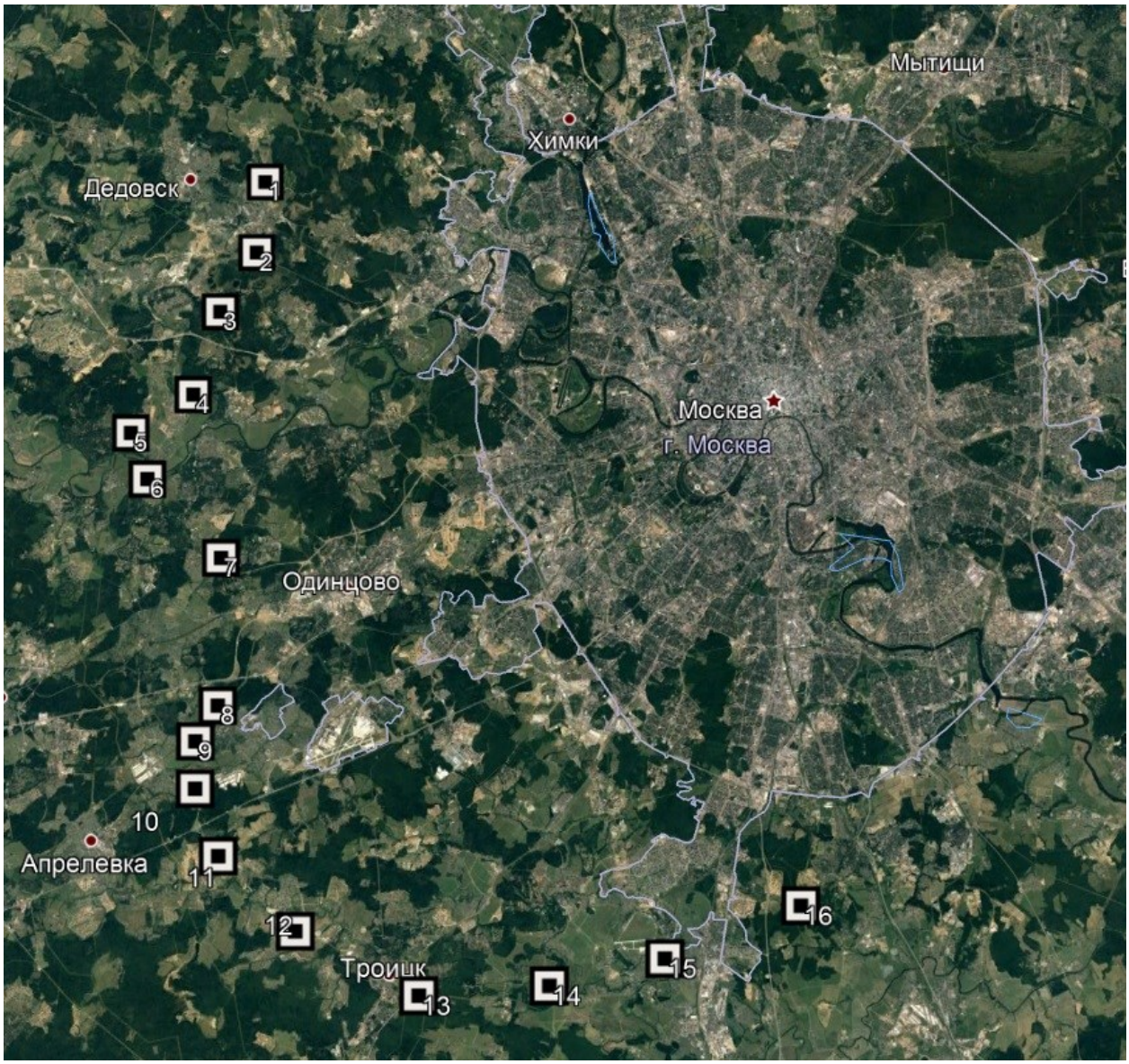


Рисунок 2.5 – Схема расположения пунктов профиля гравиметрического

Рисунок 2.6 – Структурная схема Московской синеклизы

На рисунке 2.7 приведен график изменения аномалии за свободный воздух измеренной (коричневая кривая) и вычисленной по модели EGM2008 (зеленая кривая).

Проведенный анализ показал, что модель EGM2008 на протяжении гравиметрического профиля имеет погрешность определения значений УСП на уровне 9 мГал (таблица 2.4).

Таблица 2.4 - Параметры погрешности значений УСП модели EGM2008

Характеристика	Значение, мГал
СКО	9
Среднее значение разности	4

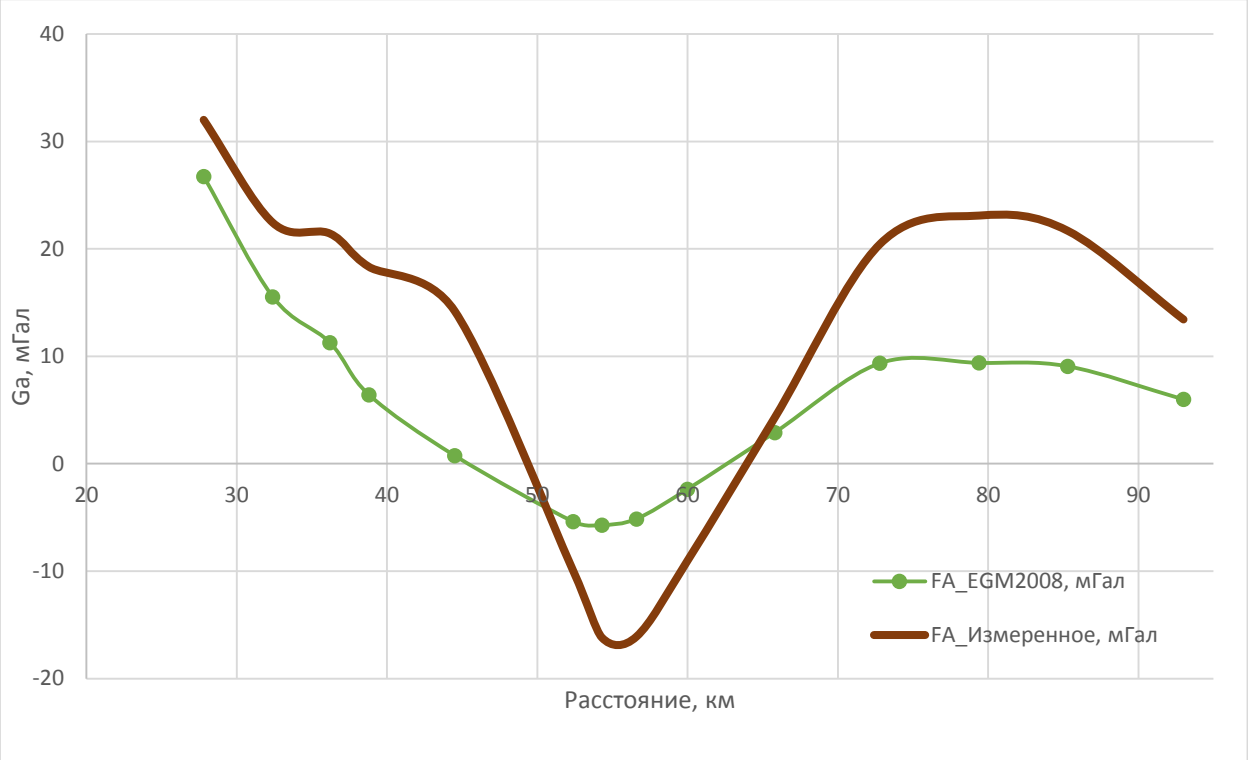


Рисунок 2.7 – График изменения измеренной и вычисленной по модели EGM2008 аномалии за свободный воздух

Экспериментальные работы, выполненные в п.п.2.2.1 – 2.2.2 показывают, что погрешность значений УСП модели EGM2008 для территории Московской области недостаточны для создания навигационных гравитационных карт УСП, использование моделей ГПЗ возможно исключительно с целью первоначальной оценки информативности подготавливаемой территории.

2.1.3 Оценка характеристик модели EGM2008 для территории Иркутской области

В 2017 году были выполнены опытные работы по измерению значений УСП на территории Иркутской области. Схема расположения пунктов измерений представлена на рисунке 2.8. Количество пунктов рядовой сети составило 133, опорной – 4. Координатная привязка результатов измерений УСП выполнялась приемниками геодезическими Javad Sigma.

Последовательность действий для оценки точности модели EGM2008 аналогична п.2.2.1. На рисунке 2.9 приведена карта разности «FA_Изм - FA_Выч».

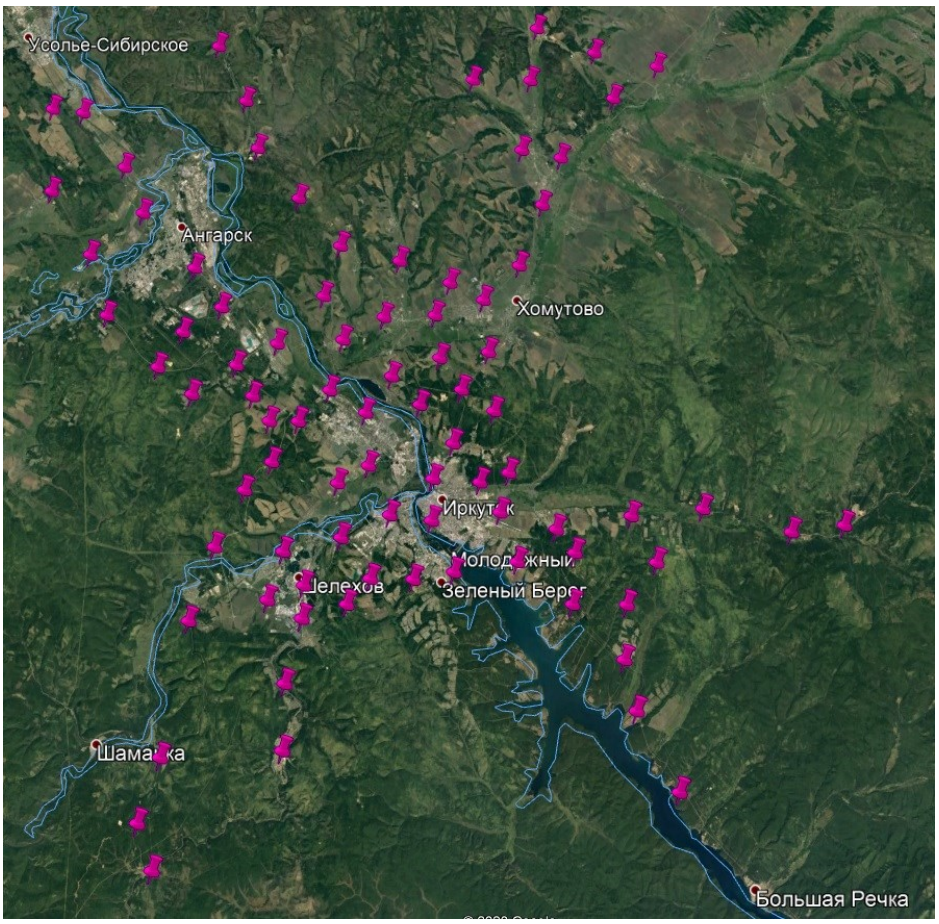


Рисунок 2.8 – Схема расположения пунктов гравиметрического полигона в Иркутской области

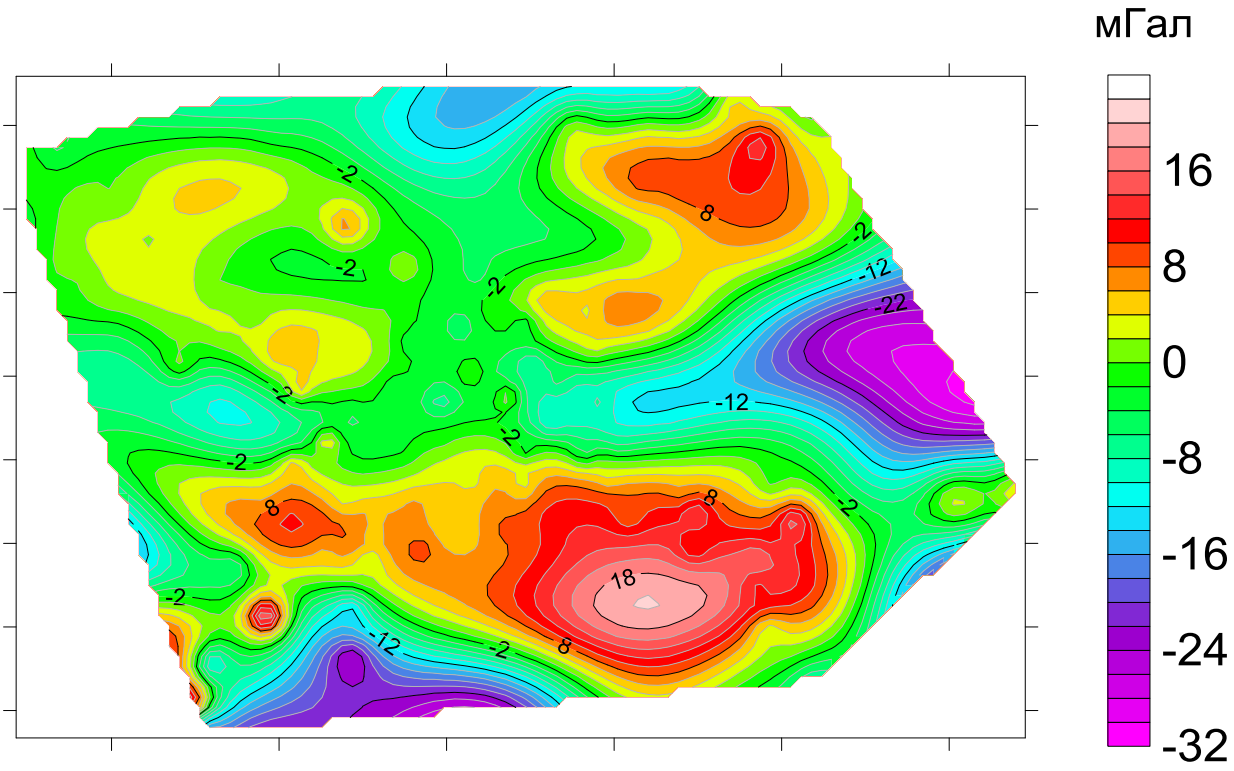


Рисунок 2.9 - Карта разности «FA_Изм - FA_Выч» для модели EGM2008

Проведенный анализ показал, что модель EGM2008 для территории Иркутской области имеет погрешность определения значений УСП на уровне 8 мГал (таблица 2.5). Характеристики точности значений УСП модели EGM2008 для территории Иркутской области недостаточны для применения в автономных навигационных системах по ГПЗ.

Таблица 2.5 - Параметры точности аномалий УСП модели EGM2008

Характеристика	Значение, мГал
СКО	9
Среднее значение разности	-2

2.1.4 Оценка характеристик модели EGM2008 на испытательном гравиметрическом полигоне «Kauring airborne gravity test site», Западная Австралия

Испытательный гравиметрический полигон «Kauring airborne gravity test site» предназначен для оценки характеристик погрешности аэрогравиметрических комплексов. В свободном доступе в сети Интернет [79] имеются данные об измеренных значениях УСП с борта самолета. Схема расположения испытательного полигона приведена на рисунке 2.10.

Рисунок 2.23 – Схема расположения испытательного полигона

Основные характеристики аэрогравиметрической съемки УСП:

– высота полета от 200 до 400 м;

– расстояние между полетными профилями от 200 до 1000 м;

– скорость самолета 45 м/с;

– погрешность измерений УСП 0,6 мГал;

– погрешность аномалии УСП 1,1 мГал.

Последовательность действий для оценки точности модели EGM2008 аналогична п.2.2.1. На рисунке 2.11 приведена карта разности «FA_Изм - FA_Выч».

Проведенный анализ показал, что модель EGM2008 для территории испытательного гравиметрического полигона «Kauring airborne gravity test site»имеет погрешность определения значений УСП на уровне 3 мГал (таблица 2.6). Характеристики точности значений УСП модели EGM2008 для территории испытательного полигона недостаточны для применения в автономных навигационных системах по ГПЗ.

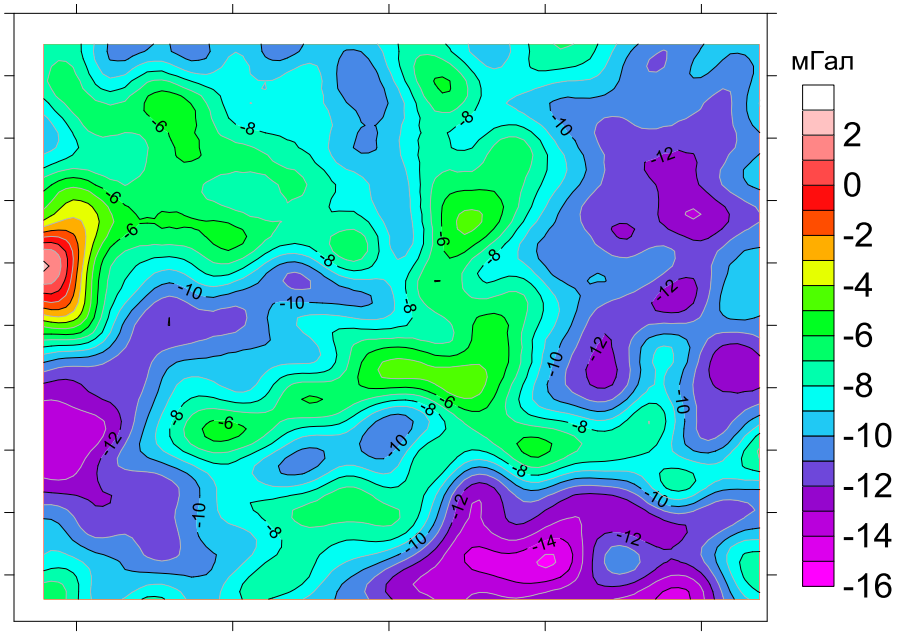


Рисунок 2.11 - Карта разности «FA_Изм - FA_Выч» для модели EGM2008

Таблица 2.6 - Параметры точности аномалий УСП модели EGM2008

Характеристика	Значение, мГал
СКО	3
Среднее значение разности	-9

2.2 Экспериментальная оценка стабильности УСП во времени

2.2.1 Оценка вариаций УСП за счет изменения атмосферного давления

Влияние атмосферных масс на гравиметрические наблюдения проявляется не только как влияние притягивающего промежуточного слоя, но и как влияние нагрузки, деформирующей земную кору. Возможное изменение УСП за счет изменения атмосферных масс может достигать 50 мкГал и более.

В настоящий момент в отечественной и зарубежной литературе, посвященной обработке гравиметрических данных, говорится о необходимости учета гравитационного эффекта атмосферы, зависящего от высоты пункта наблюдения. Масса всей атмосферы Земли вместе с массой твердой Земли включена в значение силы тяжести на поверхности эллипсоида. Согласно ПЗ-90.11 поправка в значение нормальной силы тяжести за притяжение атмосферы на высоте h вычисляется по формуле [80]:

$$\delta\gamma_a = -0.87e^{-0.116h^{1.047}}\,[мГал] \qquad (2.2)$$

Формула (2.2) не учитывает вариации атмосферных масс. Изменение массы атмосферы вызывает значительный эффект при измерениях УСП (до 20% от приливного воздействия) с коэффициентом пропорциональности примерно равным 0,3 мкГал/мбар для континентального расположения пункта наблюдения. Эффект представляет собой комбинацию гравитационного притяжения аномалии масс атмосферы и вертикальной деформации земной коры. Для положительной аномалии массы атмосферы гравитационное влияние составляет около -0,4 мГал/мбар и +0,1 мГал/ мбар при прогибе коры.

Вычисление поправки в значение силы тяжести δg_p, выведенной по формуле бесконечного плоскопараллельного слоя, предлагается вычислять по формуле:

$$\delta g_p = -0,426 \cdot \Delta P, \qquad (2.3)$$

где ΔP – изменение атмосферного давления в мбар. Аналогичная формула выведена зарубежными исследователями:

$$\delta g_p = -0,356 \cdot \Delta P, \tag{2.4}$$

Сравнение формул (2.3) и (2.4) показывает, что единого подхода к уменьшению влияния вариаций атмосферных масс на гравиметрические измерения пока нет. Поправка, связанная с изменением атмосферного давления, совершенно необходима при изучении неприливных изменений силы тяжести, при проведении площадных съемок и долговременных стационарных измерений [79, 80].

Поправка в УСП напрямую связана с плотностью притягивающих масс, заключенных в объеме. Плотность атмосферы непостоянна во времени [81].

В общем случае гравитационную поправку за влияние атмосферы можно представить соотношением:

$$\delta g_{am} = \delta \gamma_a + \delta g_{am_t} - \delta g_{am_p}, \tag{2.5}$$

где $\delta \gamma_a = -0.87 e^{-0.116 h^{1.047}}$ – гравитационная поправка за влияние стационарной атмосферы, h – высота над уровнем моря; δg_{am_t} – гравитационная поправка за изменение температуры воздуха; δg_{am_p} – гравитационная поправка за изменение атмосферного давления.

$$\delta g_{am_t} = 0.0016 dt,$$

$$\delta g_{am_p} = (0.8105 \cdot 10^{-3} - 0.2157 \cdot 10^{-6} p_0) dp, \tag{2.6}$$

где dt – изменение температуры; p_0 – начальное атмосферное давление в мбар; dp – изменение атмосферного давления в мбар.

Оценка влияния изменения атмосферного давления и температуры окружающей среды на измеренные значения УСП выполнена на примере непрерывной записи гравиметра №438 [82].

На рисунке 2.12 представлен общий вид лунно-солнечных вариаций УСП. Приливные составляющие УСП были удалены с помощью метода физического моделирования, для этого использовался программный пакет Atlantida, разработанный в ИФЗ РАН, модели упругой Земли IASP91 и океанических приливов FES2012 [83]. На рисунке 2.13 представлены измерения УСП, свободные от лунно-солнечных вариации.

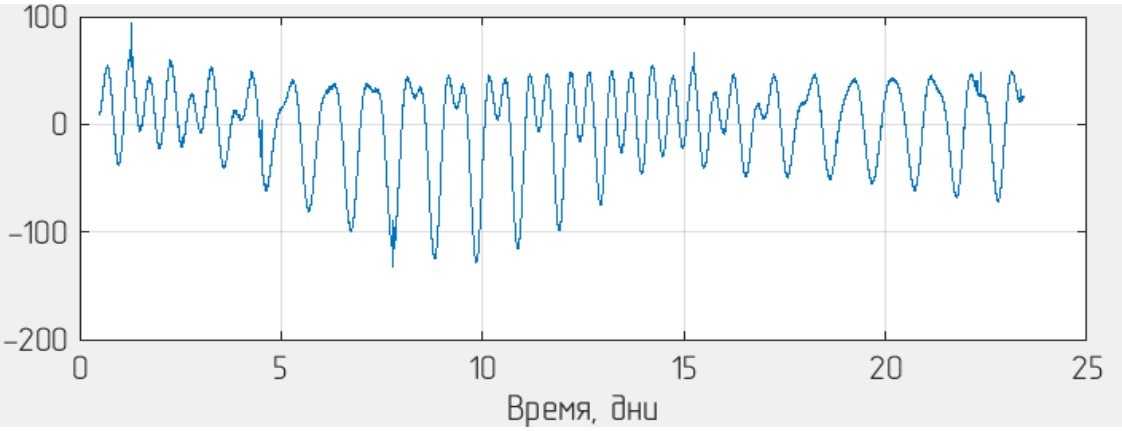


Рисунок 2.12 – Общий вид лунно-солнечных вариаций УСП

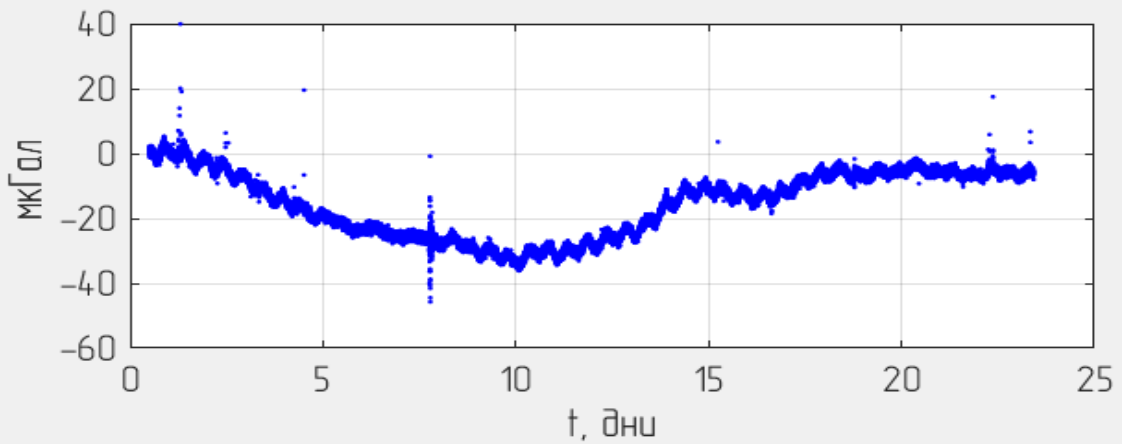


Рисунок 2.13 – График изменения УСП без приливной составляющей

По результатам измерений представлены зависимости изменения УСП от изменения атмосферного давления и температуры окружающего воздуха, рисунок 2.14.

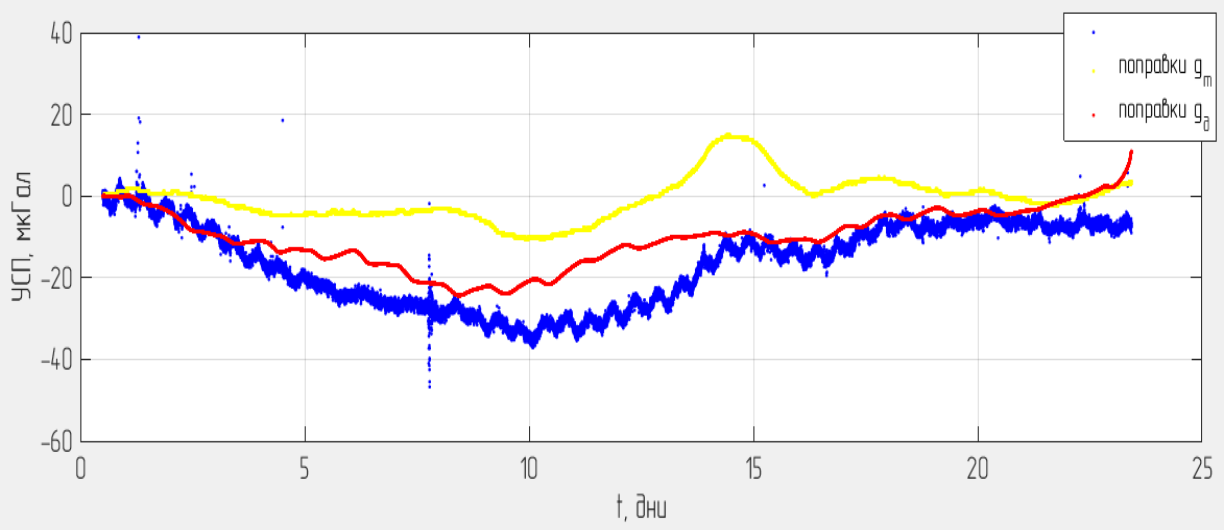


Рисунок 2.14 – График оценки изменения УСП (синяя кривая) от изменения атмосферного давления (желтая кривая) и температуры окружающей среды (красная кривая)

Проведенные экспериментальные исследования показывают, что поправка за изменение атмосферных масс достигала 20 мкГал. Несмотря на кажущуюся малость величины поправки за изменение атмосферных масс (до 10% от приливного воздействия), ее необходимо учитывать при выполнении высокоточных гравиметрических исследований с микрогальной точностью.

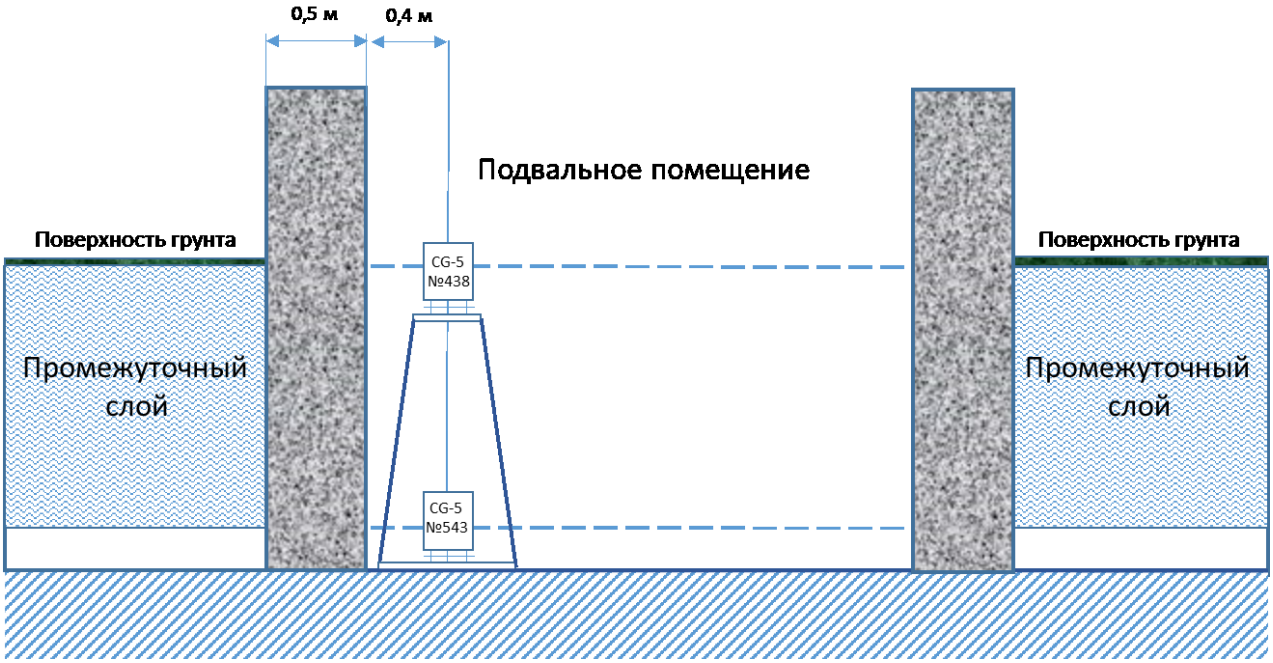
Для реализации технологии навигации по картам УСП поправкой за изменение атмосферного давления и температуры окружающего воздуха можно пренебречь.

2.2.2 Оценка вариаций УСП за счет изменения влагонасыщенности пород

Наибольший вклад на величину неприливных вариаций УСП вносит изменение гидрологической обстановки в районе измерений УСП [84]. Начиная с февраля 2018 г. в подвальном помещении на территории ФГУП «ВНИИФТРИ» проводятся исследования по оценке стабильности УСП во времени путем непрерывной регистрации вариаций УСП.

Схема экспериментальных измерений представлена на рисунке 2.15а. Гравиметры CG-5 Autograv (№438 и №543) размещаются на специальном штативе на высоте 1 м друг над другом и одновременно включаются на непрерывную запись (рисунок 2.15б). При этом оба гравиметра синхронно реагируют на приливные лунно-солнечные вариации УСП, а также на неприливные вариации, вызванные изменением атмосферного давления.

Что касается воздействия уровня и объема грунтовых вод, разница в показаниях гравиметров возникает при выпадении осадков, когда выпавшие осадки достигают плоского промежуточного слоя грунта, заключенного между гравиметрами (рисунок 2.15а). В этом случае увеличение массы слоя грунта за счет повышения влагонасыщенности приводит к изменению показаний гравиметров: показания верхнего гравиметра №438 увеличиваются, нижнего №543 – уменьшаются. Таким образом достигается удвоенная амплитуда измеренного сигнала.



а)

б)

а) – схема измерений вариаций вертикального градиента УСП; б) – внешний вид установки

Рисунок 2.15 – Экспериментальная установка для контроля вариаций вертикального градиента УСП

На рисунке 2.16 представлены результаты экспериментальных

измерений вариаций УСП. Длительность измерений составила 6 дней: с 31 августа по 5 сентября 2018 г. Верхняя голубая кривая соответствует результатам измерений гравиметра № 438, нижняя оранжевая кривая соответствует результатам измерений гравиметра № 543. Средняя кривая соответствует разности результатов измерений гравиметров.

Рисунок 2.16 – Результаты экспериментальных измерений

Как видно из рисунка, на графике разности в период с 1 по 3 сентября наблюдается увеличение значений разности показаний гравиметров на

величину до 2 мкГал. Учитывая, что это удвоенное значение амплитуды измеренного сигнала, получим истинное значение изменения УСП на 1 мкГал. Изменение притяжения слоя грунта мощностью 1 м на величину 1 мкГал равносильно изменению его плотности на 0,025 г/см^3, что, в свою очередь, соизмеримо с фильтрацией 25 мм осадков в этот слой грунта. По данным архива погоды [85, 86], в период с 31 августа по 2 сентября 2018 г. в районе г. Зеленоград наблюдался мелкий дождь, местами грозы, за этот период выпало около 30 мм осадков. Дальнейшее уменьшение разности измерений между гравиметром 438 и 543 в период с 1 по 4 сентября свидетельствует о фильтрации выпавших осадков вниз тем самым увеличивая значение УСП, регистрируемое нижним гравиметром. Увеличение разности измерений между гравиметром 438 и 543 в период с 4 по 5 сентября вызвано очередным выпадением осадков схожей интенсивности.

Таким образом, результаты экспериментальных измерений вариаций УСП подтвердили теоретическое воздействие изменения влагонасыщенности пород за счет выпадения осадков на уровне 1 мкГал/25 мм осадков. В общем виде зависимость изменения УСП от выпадения осадков определяется формулой:

$$\delta g_{влаг} = \frac{1}{25} h_{осадков},$$

где $h_{осадков}$ – количество выпавших осадков в мм.

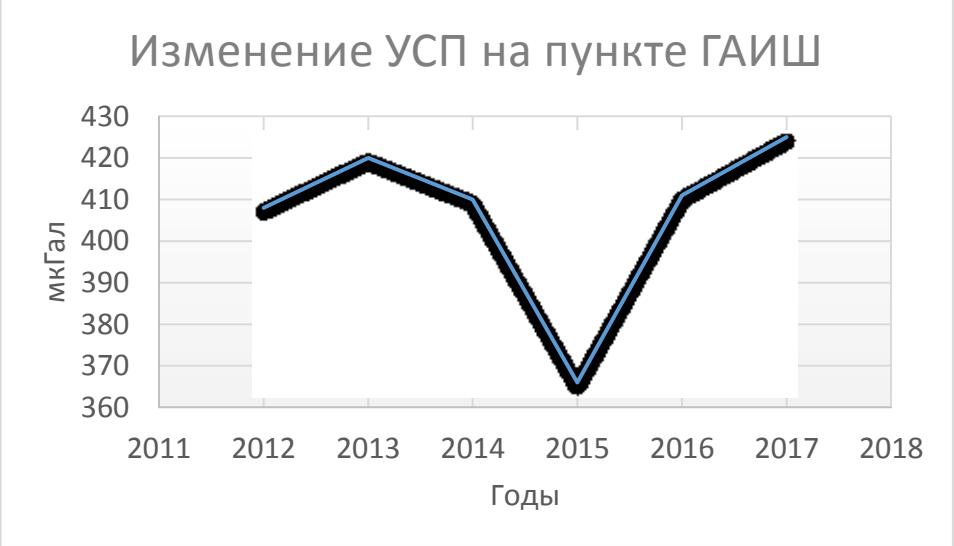
Для реализации технологии навигации по картам УСП поправкой за изменение влагонасыщенности пород можно пренебречь.

2.2.3 Оценка долговременной стабильности значений УСП

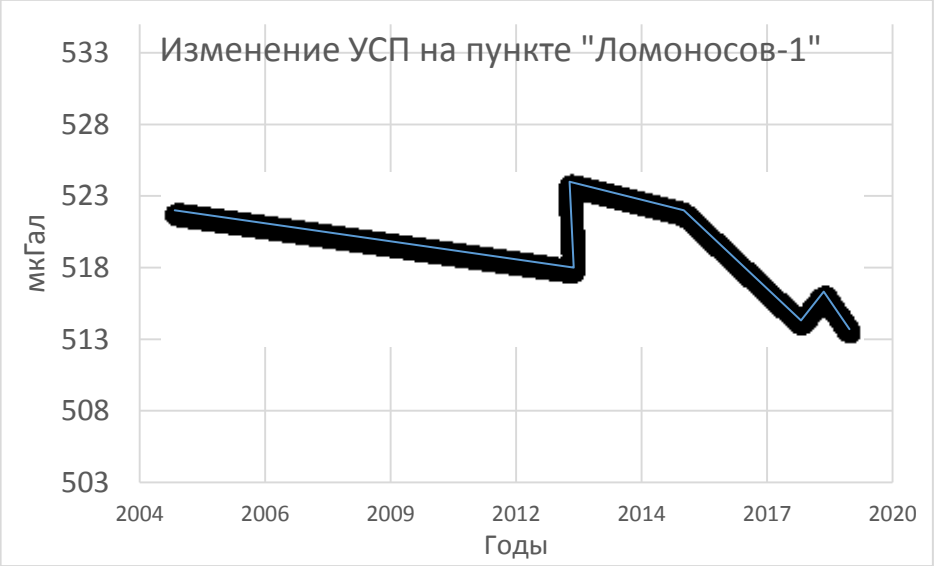
Долговременная стабильность значений УСП экспериментально оценивалась на двух гравиметрических пунктах: Ломоносов-1 из состава Государственного первичного эталона единицы ускорения для гравиметрии (ГПСЭ) г. Санкт-Петербург и ГАИШ-МГУ - самом старом гравиметрическом пункте на территории г. Москвы. Средством оценки являлся абсолютный баллистический гравиметр (АБГ), входящий в состав государственного

вторичного эталона единицы ускорения свободного падения в диапазоне значений от 9,77 до 9,85 м/с^2. Предел погрешности измерений эталона – 10 мкГал.

На рисунке 2.17а представлен график изменений УСП на пункте ГАИШ-МГУ с 2012 г. по 2017 г., на рисунке 2.17б представлен график изменений УСП на пункте Ломоносов-1.



а)



б)

Рисунок 2.17 – Изменение УСП на длительном интервале времени. а) – на пункте ГАИШ-МГУ, б) – на пункте Ломоносов-1

Для пункта ГАИШ-МГУ за период времени с 2012 по 2017 год значение УСП изменилось на +18 мкГал, в 2015 году резкое изменение УСП на -40

мкГал вызвано активными строительными работами Московского метрополитена, повлиявшими на работу АБГ. Среднее значение скорости изменения УСП составляет 18/5 = 3,6 мкГал/год.

Для пункта Ломоносов-1 за период времени с 2004 по 2019 год значение УСП изменилось на -5 мкГал. Среднее значение скорости изменения УСП составляет -5/15 = 0,3 мкГал/год.

Для реализации ассистирующей технологии навигации по картам УСП поправкой за изменение УСП во времени можно пренебречь.

2.3 Разработка метода повышения точности и детальности создания навигационных гравитационных карт УСП на основе дополнительного учета влияния рельефа и плотности пород литосферы

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

2.3.1 Метод №1. Метод простой интерполяции.

Наиболее простым методом повышения детальности карты является линейная интерполяция значений g_N и g_{N+1} в требуемую точку интерполяции (рисунок 2.18) по формуле:

$$g_i^{инт} = g_N + \frac{g_{N+1} - g_N}{L} \Delta l \quad , \tag{2.7}$$

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, Δl - интервал интерполяции.

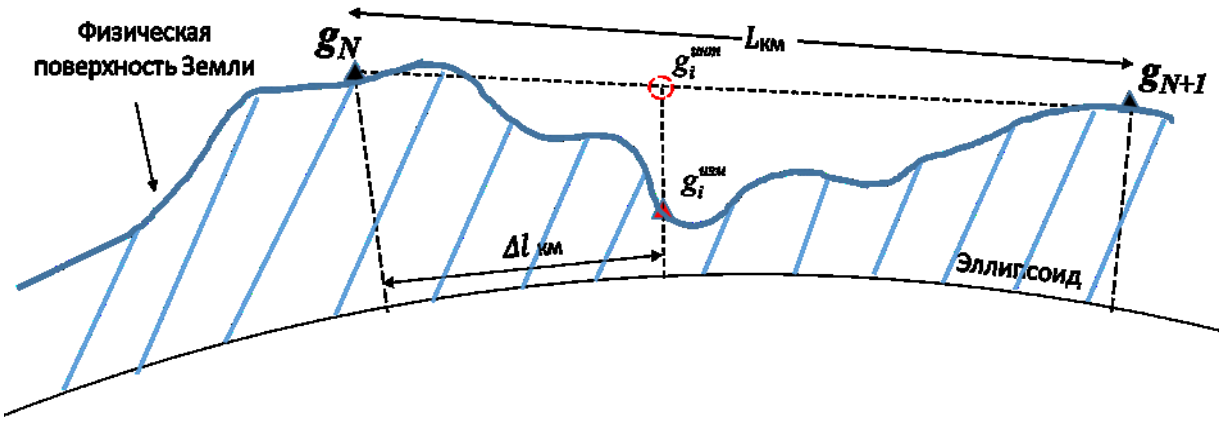


Рисунок 2.18 – Схема метода №1

Оценка погрешности созданных карт выполнялась на примере трех экспериментальных профилей Московского гравиметрического полигона (рисунок 2.19). Для каждого профиля расстояние L между крайними точками g_N и g_{N+1} составило ≈5 км, количество промежуточных точек равно пяти, расстояние Δl между промежуточными точками 800 - 900 м,. Итого для каждого измерительного профиля интерполяции получен набор из семи точек с измеренными координатами, каждой 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.

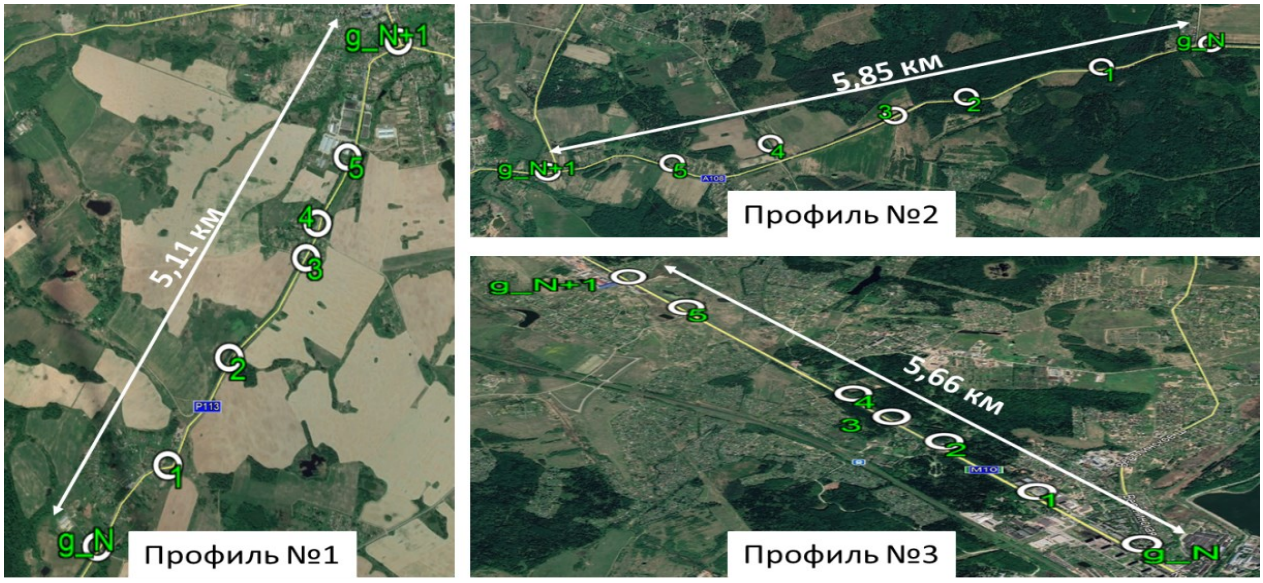


Рисунок 2.19 – Схема расположения профилей интерполяции

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 2.7 (столбцы 4 и 6). Отсюда видно, что разность $\sigma g^{(1)}$ изменяется от -3 до +3 мГал.

Таблица 2.7. Оценка погрешности методов интерполяции для Московского гравиметрического полигона

№ п/п точки, i	Δl, 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 $\frlvert\sigma g^{(1)}\frrvert / \frlvert\sigma g^{(2)}\frrvert$
1	2	3	4	5	6	7	8
Профиль №1							
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					
Профиль №2							
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					
Профиль №3							
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 $\frlvert\sigma g^{(1)}\frrvert / \frlvert\sigma g^{(2)}\frrvert$							**5**

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

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

$$g = \gamma_0 + \delta g_h + \Delta g_H + \Delta g_{\Delta\rho}, \qquad (2.8)$$

где γ_0 - нормальное гравитационное поле Земли, δg_h - аномальная добавка за счет геодезической высоты точки, Δg_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 γ_0 определяется по известной формуле [87]:

$$\gamma_0 = g_e \cdot (1 + \beta \sin^2 \varphi - \beta_1 \sin^2 2\varphi), \tag{2.9}$$

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

Величина δg_h вычисляется по формуле [87]:

$$\delta g_h = 0{,}3086 \bullet \quad , \tag{2.10}$$

где h – высота пункта наблюдений.

Аномальная добавка за счет влияния промежуточного слоя Δg_H определяется по формуле [88]:

$$\Delta g_H = \sum_{200км} \frac{G\rho_i \cdot v_i}{r_i^2} \quad , \tag{2.11}$$

где G – гравитационная постоянная, ρ_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 $g^{изм}$ (взятым из каталога, либо измеренным) эту величину можно вычислить на основе формулы (2.8):

$$\Delta g^{выч}_{\Delta\rho_i} = g_i^{изм} - (\gamma_0 + \delta g_h + \Delta g_H)_i^{выч}, \tag{2.12}$$

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

(2.8), (2.9) и (2.10).

Формулы (2.9), (2.10) и (2.11) имеют свои особенности применения. Составляющие γ_0 и δg_h вычисляются по координатам точки $g^{выч}$, слагаемое Δg_H вычисляется по формуле (2.11) в том случае, когда известна информация о высотах рельефа местности и значениях плотности пород вокруг точки $g^{выч}$. 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 B, L, H координаты [89]. Автором выполнена проверка заявленной погрешность миссии SRTM на примере Иркутского гравиметрического полигона. В ходе проверки погрешность миссии SRTM была подтверждена и составила 8м. Подробные результаты проверки представлены далее в разделе 2.3.2.1.

В феврале 2020 г. была опубликована глобальная модель плотностного строения пород рельефа TopoDensT [90]. 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 TopoDensT выполнена методом Неттлетона на примере Московского и Иркутского полигонов. Проверка подтвердила заявленную погрешность модели TopoDensT в 0,23 г/см^3. Подробные результаты проверки представлены далее в разделе 2.3.2.2.

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 (2.11) вычисляется следующим образом [88]:

$$\frac{G\rho_i \cdot v_i}{r_i^2} = -G\rho_i \int_{\xi_1}^{\xi_2}\int_{\eta_1}^{\eta_2}\int_{\zeta_1}^{\zeta_2}\Big[\ (\xi - x)\ln(\eta + R) + \eta \ln\big((\xi - x) + R\big) + \\ + \zeta\, arctg\left(\frac{\eta}{\zeta}\right) - \zeta\, arctg\frac{(\xi - x)\eta}{\zeta R}\Big] dxdydz, \qquad (2.13)$$

где G – гравитационная постоянная, ρ_i – плотность пород, ξ_1 и ξ_2 – координаты углов по оси X, η_1 и η_2 – координаты углов по оси Y, ζ_1 и ζ_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 (2.9), (2.10), (2.13) и (2.12) 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 2.20) по формуле:

$$\Delta g^{инт}_{\Delta\rho_i} = \Delta g_{\Delta\rho N} + \frac{\Delta g_{\Delta\rho N+1} - \Delta g_{\Delta\rho N}}{L} \Delta l, \tag{2.14}$$

где $\Delta g^{инт}_{\Delta\rho_i}$ – интерполированное значение аномальной составляющей УСП, $\Delta g_{\Delta\rho N}$ и $\Delta g_{\Delta\rho N+1}$ – вычисленные по формуле (2.12) аномальные составляющее УСП в крайних точках профиля интерполяции , L – длина профиля интерполяции, Δl – интервал интерполяции.

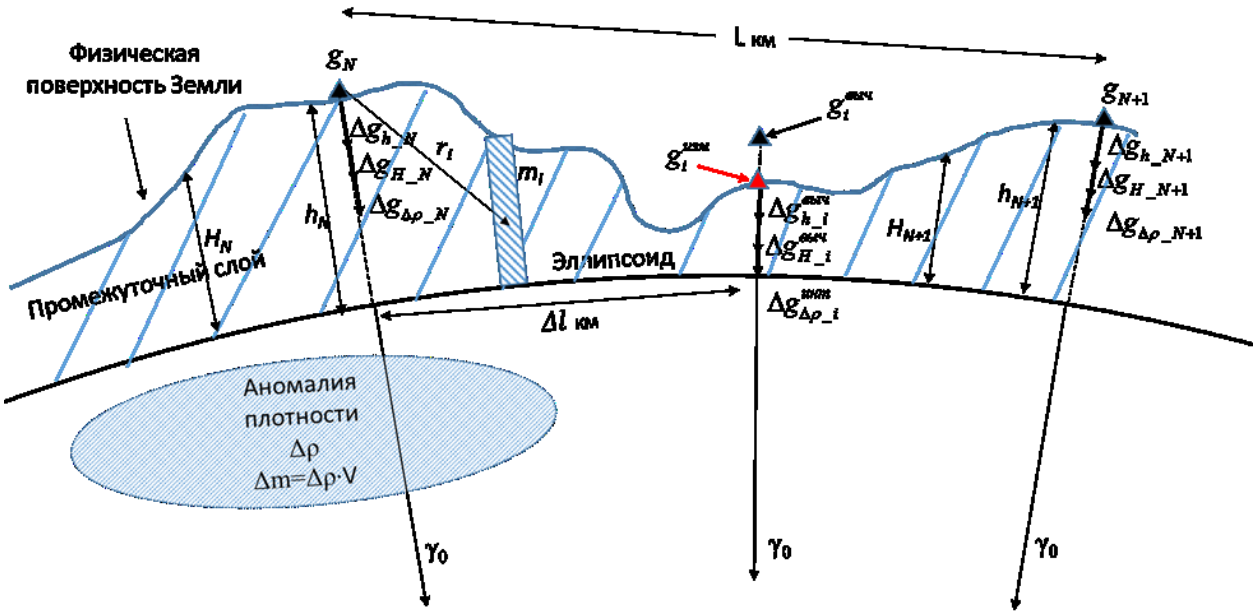


Рисунок 2.20 – Схема реализации метода №2

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

$$g_i^{выч} = (\gamma_0 + \delta g_h + \Delta g_H)_i^{выч} + \Delta g^{инт}_{\Delta\rho_i}, \tag{2.15}$$

Проверка погрешности интерполяции метода №2 выполнялась на примере трех экспериментальных измерительных профилей Московского

гравиметрического полигона, характеристики которых представлены ранее. Вычисление $\Delta g^{выч}_{\Delta\rho_N}$ и $\Delta g^{выч}_{\Delta\rho_N+1}$ для крайних точек профилей были выполнены по формулам (2.13), (2.8), (2.9), (2.12), по цифровой карте рельефа на Московскую область и модели TopoDensT. Погрешность вычисления значений $\Delta g^{выч}_{\Delta\rho_N}$ и $\Delta g^{выч}_{\Delta\rho_N+1}$ составила 0,05 мГал. Далее по формуле (2.14) была выполнена интерполяция значений $\Delta g^{инт}_{\Delta\rho_i}$ в промежуточные точки $g_i^{выч}$ экспериментальных профилей. Значения $g_i^{выч}$ в промежуточных точках профилей вычислялись по формулам (2.8), (2.9), (2.13), (2.15), 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 2.7 (столбцы 5 и 7). Отсюда видно, что разности $\sigma g^{(2)}$ существенно меньше, а отношение $\left|\sigma g^{(1)}\right| \,/\, \left|\sigma g^{(2)}\right|$ меняется от 1 до 20.

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, 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.

2.3.2.1 Результаты оценки характеристик точности цифровых карт рельефа (ЦКР)

Одним из самых полных и масштабных ресурсов по распространению глобальных цифровых данных, в том числе и цифровых карт рельефа, на территорию Земли является сайт https://earthexplorer.usgs.gov [91]. Данные о рельефе были получены в ходе работы космической миссии Shuttle radar topographic mission (SRTM) - радарная топографическая съемка большей части территории земного шара, за исключением северных (>60°) и южных широт (>54°), а также океанов, произведенная за 11 дней в феврале 2000 г. при помощи двух радиолокационных сенсоров SIR-C и X-SAR. Основные характеристики цифровых данных миссии SRTM представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Форма предоставления цифровых карт миссии SRTM

Проекция	Географическая
Система координат	WGS84
Модель квазигеоида	EGM96 (Earth Gravitational Model 1996)
Значения высот	Метры
Горизонтальное разрешение	1" (~30 м) 3" (~90 м)
Размер территории в одном файле	1°x1°

Наиболее типовыми формами представления цифровых карт рельефа являются форматы файлов (рисунок 2.20) в виде географически привязанных снимков GEOTIFF или файлы равномерных сеток, наложенных как на географические координаты B, L, H или прямоугольные X, Y, Z.

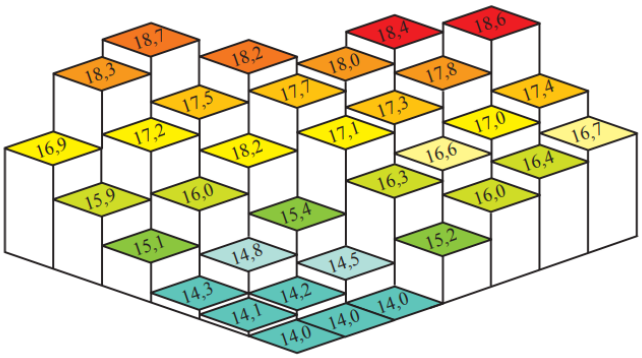


Рисунок 2.20 форма представления рельефа

Формат файлов GEOTIFF обычно используется для быстрой визуализации карт высот рельефа для первичной оценки качества цифрового материала. Для локальных (несколько квадратных км) вычислений параметров ГПЗ в пределах листа карты размером 1°x1° удобнее пользоваться файлом равномерной сетки в прямоугольных координатах. Для вычислений за пределами одного листа карты удобнее использовать файлы равномерных сеток в географических координатах.

Заявленная точность данных миссии SRTM представлена в таблице 2.9 [92].

Таблица 2.9 – Характеристики точности ЦКР миссии SRTM

	Африка	Австралия	Евразия	Острова	Северная Америка	Южная Америка
Ошибка в плане, м	11.9	7.2	8.8	9.0	12.6	9.0
Ошибка по высоте, м	9.8	4.7	8.7	6.2	7.0	5.5

Экспериментальная оценка точности ЦКР миссии SRTM

Выполним оценку точности высот ЦКР на примере Иркутского гравиметрических полигона, для пунктов которого известны значения нормальных высот, измеренные с более высоким классом точности. Результаты проверки точности ЦКР миссии SRTM представлены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Оценка точности ЦКР миссии SRTM

№ п/п точки	Норм. Высота, м	ЦКР, м	Разность высот, м
1	768.91	766.52	-2.38
2	463.46	451.91	-11.54
3	452.77	443.90	-8.86
. . . .	. . . .	. . . .	. . . .
130	501.95	496.00	-5.95
131	481.96	474.35	-7.61
132	890.71	894.86	4.15
		СКО, м	**8**

Среднее квадратическое отклонение составило 8 м, что находится внутри диапазона заявленной погрешности высоты ЦКР миссии SRTM.

2.3.2.2 Результаты оценки характеристик точности модели плотности пород рельефа

Погрешность значения плотности при моделировании параметров ГПЗ оказывает существенное влияние на точность конечных вычислений. В виду того, что КЭНС по гравитационному полю Земли должны обладать глобальностью, возникает необходимость в подготовке навигационных гравитационных карт на всю территорию Земли. Для этого необходимо не только обладать глобальными цифровыми картами рельефа, но и глобальными данными о значениях плотности пород, слагающих рельеф. До настоящего времени при вычислениях параметров ГПЗ использовалось твердое значение плотности 2,67 г/см^3, характерное для большинства пород, слагающих рельеф. Однако, реальные вариации плотности пород находятся в диапазоне от 1,2 до 4,7 г/см^3, поэтому использование постоянного значения плотности приведет к увеличению погрешности вычислений параметров ГПЗ на величину до 56%.

В 2012 году была опубликована уточненная глобальная модель строения литосферы Земли CRUST1.0 [93]. Модель построена на основании обработки глобальных данных сейсмических скоростей, цифровой модели рельефа, и

усредненных значений УСП. Модель CRUST1.0 предоставляется по регулярной сетке размером 1°x1° в виде значений скорости распространения сейсмической волны. По значениям скоростей можно вычислить значения плотности пород. Наилучшее применение модель CRUST1.0 нашла при изучении глубинного строения Земли, для определения плотности пород рельефа она не годится в виду низкого разрешения.

В феврале 2020 года на сайте Университета Нового Брюнвика (Канада) была опубликована глобальная модель плотностного строения пород рельефа TopoDensT [94]. Модель построена на основании обработки глобальных цифровых геологических карт, цифровой модели рельефа, информации о петрофизических свойствах пород и цифровых гидрографических и гляциологических данных. Например, для территории Московской области значение плотности пород по модели TopoDensT равно 2,52 г/см^3, погрешность 0,23 г/см^3. Для территории Иркутской области значение плотности пород по модели TopoDensT равно 2,79 г/см^3, погрешность 0,23 г/см^3. Для других территорий Земли погрешность определения плотности пород варьируется от 0,1 до 0,3 г/см^3.

Экспериментальная оценка точности модели TopoDensT на примере Московской и Иркутской областей

Одним из методов определения плотности пород по измеренным значениям УСП является метод Неттлетона [95]. Суть метода Неттлетона заключается в том, что в точках профиля вычисляются аномалии УСП в редукции Буге с различными значениями плотности промежуточного слоя. Искомое значение плотности определяется из условия наименьшей корреляции между вычисленными аномалиями и высотами рельефа местности по формуле линейного коэффициента корреляции [96]:

$$r_{XY} = \frac{\sum (X - X_{cp})(Y - Y_{cp})}{\sqrt{\sum (X - X_{cp})^2 (Y - Y_{cp})^2}}, \tag{2.16}$$

где r_{XY} - коэффициент корреляции, X и Y - числовые выборки, X_{cp} и Y_{cp} - средние значения числовых выборок.

Классическая формула редукции Буге представлена формулой [87]:

$$g_Б = g^{изм} - \gamma_0 + (0.3086 - 0.0419\delta)h, \quad (2.17)$$

где $g_Б$ - аномалия УСП в редукции Буге в мГал, $g^{изм}$ - измеренное значение УСП в мГал, γ_0 - нормальное поле Земли в точке вычислений, δ - плотность пород в г/см^3, h – высота пункта наблюдения в метрах.

Выполним оценку значений плотности пород вышеуказанным способом по имеющимся данным Московского гравиметрического полигона. Для этого выполним расчет аномалий в редукции Буге для плотностей пород от 2 до 3 г/см^3 с шагом 0,1 г/см^3. На рисунке 2.21 представлен график зависимости значений коэффициента линейной корреляции от значений плотности пород.

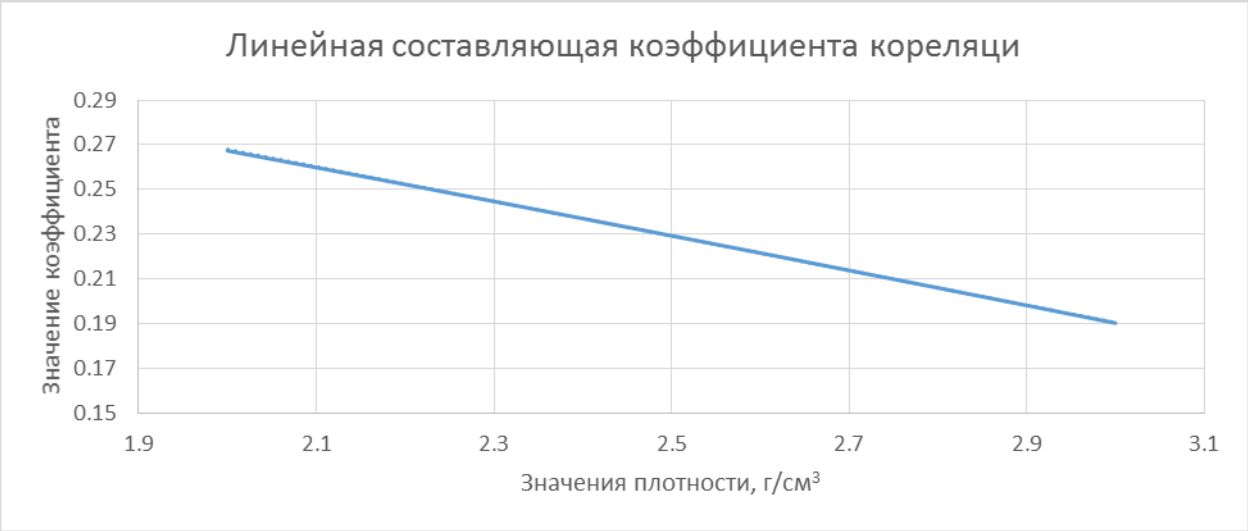


Рисунок 2.21 – График линейной составляющей коэффициента корреляции

Обратная корреляция в общем виде говорит о том, что при увеличении значения плотности, поправка Буге уменьшается за счет уменьшения члена (0.3086-0.0419·δ)·h. Сама по себе такая зависимость очевидна и не информативна. На рисунке 2.22 представлен график нелинейной составляющей коэффициента корреляции.

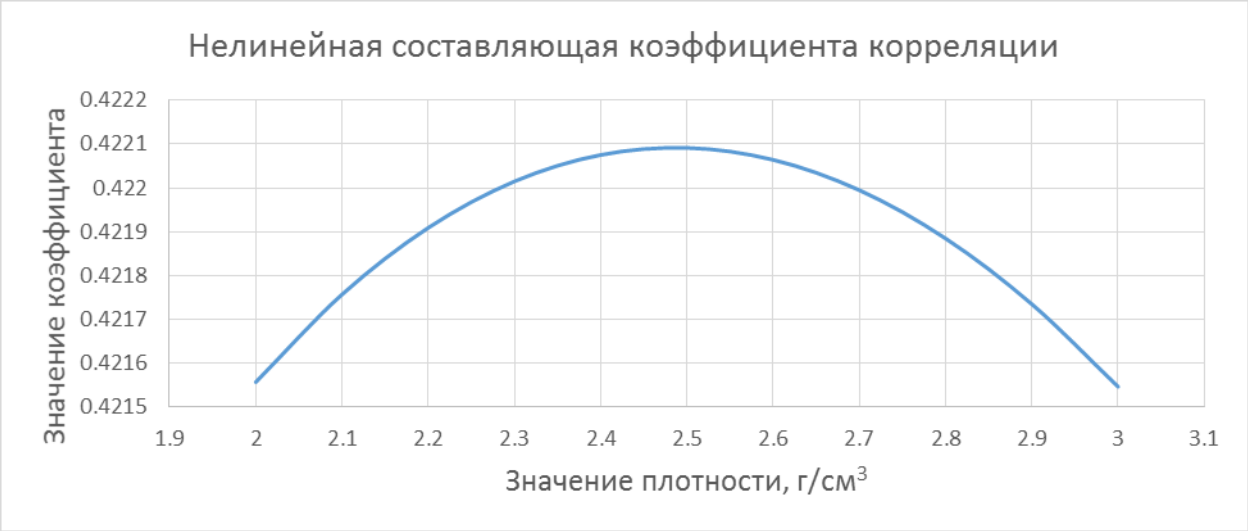


Рисунок 2.22 – Нелинейная составляющая коэффициента корреляции

Прямая зависимость между $g_Б$ и δ в диапазоне плотностей от 2 до 2,45 г/см^3 говорит нам о том, что аномалии Буге вычислены с плотностью, меньшей действительной. Обратная зависимость между $g_Б$ и δ в диапазоне плотностей от 2,5 до 3 г/см^3 свидетельствует о завышенном значения плотности, взятым в расчет. Истинное значение плотности находится в диапазоне от 2,48 до 2,5 г/см^3 (среднее 2,49).

Погрешность представленного метода определения плотности составляет 0,15 г/см^3 [88].

Одна из аналитических разновидностей метода Неттлетона реализуется на основе метода наименьших квадратов и рассчитывается по формуле [88]:

$$\delta = \delta_0 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(g_{Б_i} - g_{Б_{ср}})(h_i - h_{ср})}{\sum_{i=1}^{N}[\ 0,0419(h_i - h_{ср}) - (g_{\Delta H_i} - g_{\Delta H_ср})(h_i - h_{ср})\ ]}, \qquad (2.18)$$

где δ - искомое значение плотности пород в г/см^3, δ_0 - приблизительное значение плотности пород в г/см^3, $g_{Б_i}$ и $g_{Б_{ср}}$ - аномалия Буге в i-той точке и среднее значение аномалии соответственно, h_i - высота *i*-той точки, $h_{ср}$ - средняя высота рельефа, $g_{\Delta H_i}$ - поправка за влияние рельефа в *i*-той точке, вычисленная с плотностью 1 г/см^3, $g_{\Delta H_ср}$ - среднее значение поправки за влияние рельефа.

Среднеквадратическая погрешность определения плотности [88] вычисляется по формуле:

$$\varepsilon_{\delta} = \varepsilon_{Б} / \sum_{i=1}^{N} [\ 0{,}0419(h_i - h_{ср}) - (g_{рельеф_i} - g_{рельеф_{ср}})(h_i - h_{ср})\ ]^2, \quad (2.19)$$

где $\varepsilon_{Б}$ - средняя квадратическая погрешность определения аномалии Буге.

Выполним оценку значений плотности пород аналитическим методом Неттлетона по имеющимся данным Иркутского гравиметрического полигона. Приблизительное значение плотности пород δ_0 примем за 2 г/см^3. Образец результатов вычислений представлен в таблице 2.11 Погрешность вычисленного значения составила 0,1 г/см^3.

В Таблице 2.12 представлено сравнение значений плотности, вычисленных по реальным данным и полученным по модели TopoDensT.

Таблица 2.12 – Результаты оценки характеристик точности модели TopoDensT

Значение плотности по реальным измерениям, г/см^3	Погрешность вычислений, г/см^3	Значение плотности по модели TopoDensT, г/см^3	Погрешность значения по модели TopoDensT, г/см^3	Оценка разности значений плотности
Московский гравиметрический полигон				
2,49	0,2	**2,52**	0,23	В пределах погрешности модели
Иркутский гравиметрический полигон				
2,95	0,1	**2,79**	0,23	В пределах погрешности модели

Таблица 2.11 – Вычисление плотности пород на примере Иркутского полигона

Высота, м	Среднее значение высоты, м	Нормальное поле Земли, мГал	Поправка за рельеф, мГал	Среднее значение поправки за рельеф, мГал	Плотность δ_0, г/см^3	Аномалия Буге, мГал	Среднее значение аномалии, мГал	Разность Буге, мГал	Разность высот, м	Числитель	Знаменатель	Дробь	Значение плотности δ, г/см^3
460,553	487.479	981251.079	15,850	16.64	2	-59.706	-49.925	-9.78	-27.08	6886.97	-7194.48717	-0.95	2.95
463.458		981252.103	15.910			-56.890		-6.97	-34.71				
452.769		981257.086	15.423			-52.180		-2.26	34.38				
521.865		981258.174	17.633			-52.258		-2.33	30.39				
517.877		981260.110	17.741			-54.084		-4.16	38.17				
525.658		981260.676	17.597			-56.932		-7.01	3.17				
490.658		981261.451	16.771			-54.432		-4.51	31.76				
519.249		981264.024	17.637			-53.806		-3.88	25.88				
513.36		981265.052	17.603			-53.946		-4.02	12.22				
499.702		981256.896	17.177			-54.396		-4.47	-13.95				
473.525		981258.529	16.159			-54.503		-4.58	-31.67				
455.805		981259.658	15.627			-52.918		-2.99	-15.43				
472.045		981260.182	16.415			-55.598		-5.67	-7.93				
479.542		981265.392	16.292			-48.551		1.37	-35.44				
452.032		981262.684	15.639			-51.752		-1.83	-44.66				

Таким образом, выполненная оценка заявленной точности значений плотности модели TopoDensT, подтверждается. Это позволяет использовать данную модель при дальнейших вычислениях параметров ГПЗ при создании навигационных гравитационных карт.

2.4 Выводы по главе 2

1) Метод сравнения измеренных опорных параметров ГПЗ и вычисленных по модели EGM2008 применим для оценки точности любых цифровых моделей ГПЗ.

2) Результаты оценки точности модели EGM2008 для равнинной, холмистой и предгорной местности показали, что погрешность вычисления значений УСП находится в диапазоне от 6 до 9 мГал.

3) Учитывая, что для систем автономной навигации по ГПЗ требуются навигационные гравитационные карты УСП с погрешностью не хуже 2 мГал, при детальности не менее 1 км - применение моделей ГПЗ для создания навигационных гравиметрических карт невозможно.

4) Выполненные экспериментальные исследования оценки стабильности значений УСП во времени показали, что погрешность навигационных гравитационных карт УСП за счет не учёта неприливных вариаций УСП составляет величину до 40 мкГал и в общем виде вычисляется по формуле:

$$\sigma_{базы_данных} = \frac{1}{25} \cdot h_{осадков} - 0.0016dt + (0.8105 \cdot 10^{-3} - 0.2157 \cdot 10^{-6} p_0)dp,$$

где, $h_{осадков}$ - количество выпавших осадков в мм, dt – изменение температуры; dp – изменение атмосферного давления в мбар. Наибольшее влияние на вариации УСП оказывает изменение атмосферного давления и температуры окружающего воздуха (до 30 – 35 мкГал). Изменения УСП, вызванные изменением влагонасыщенности пород, достигают 6 мкГал при 140 мм выпавших осадков. Среднегодовые изменения УСП достигают 3,6 мкГал в год.

5) Разработан и экспериментально подтвержден метод повышения

точности и детальности создания навигационных гравитационных карт УСП на основе дополнительного учета влияния рельефа и плотности пород литосферы.

Преимуществами разработанного метода является малая величина погрешности и высокая детальность созданных карт УСП (1 км). Метод применим для доступных территорий, для которых существует возможность измерить координаты точек $g_i^{выч}$.

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

3.1 Оценка применимости метода №2 для подготовки навигационных гравитационных карт УСП на удаленные территории.

Отличительной особенностью труднодоступных территорий является отсутствие возможности прямых измерений УСП или гравитационных градиентов для выбранных пунктов территорий, а также координат этих пунктов.

Для создания навигационных гравитационных карт УСП на труднодоступную территорию используем развитый выше метод №2 (см. подраздел 2.3.2). Оценку применимости метода выполним на примере Московского гравиметрического полигона. Для этого для него выполним последовательность действий по приведенному выше методу №2 для определения значений $g_i^{выч}$ в промежуточных точках трех заранее выбранных измерительных профилей 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 3.1.

Таблица 3.1 Разность $g_i^{выч}$ и $g_i^{изм}$ значений УСП для варианта труднодоступной территории

№ профиля интерполяции Московского полигона	**Средняя величина $\sigma g^{(2)} = g_i^{выч} - g_i^{изм}$ 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 ТороDensT сформулированы требования к допустимой погрешности

составляющих в уравнении (2.15), необходимые для создания карт УСП с погрешностью не более 2 мГал:

– $\sigma(\gamma_0 + \delta g_h + \Delta g_H)_i^{выч}$ 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 (2.9), (2.10), (2.12) и (2.13) путем вычисления дифференциалов.

Сформулируем последовательность действий, необходимых для создания навигационных гравитационных карт на труднодоступные территории на основе цифровых моделей рельефа и плотности пород:

1. Выполнить поиск источников предоставления информации о X, Y, H, $g^{изм}$.

2. Выполнить загрузку ЦКР на требуемую территорию.

3. Определить значения плотности пород по модели TopoDensT.

4. Вычислить по формуле (2.12) значения $\Delta g_{\Delta p}$, интерполировать в узлы регулярной сети с дискретностью 1 км по методу №2.

5. Выполнить по формулам (2.15), (2.9), (2.10) и (2.13) вычисление $g_{выч}$ в узлы регулярной сети, используя модели ЦКР и TopoDensT.

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 3.1). 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.

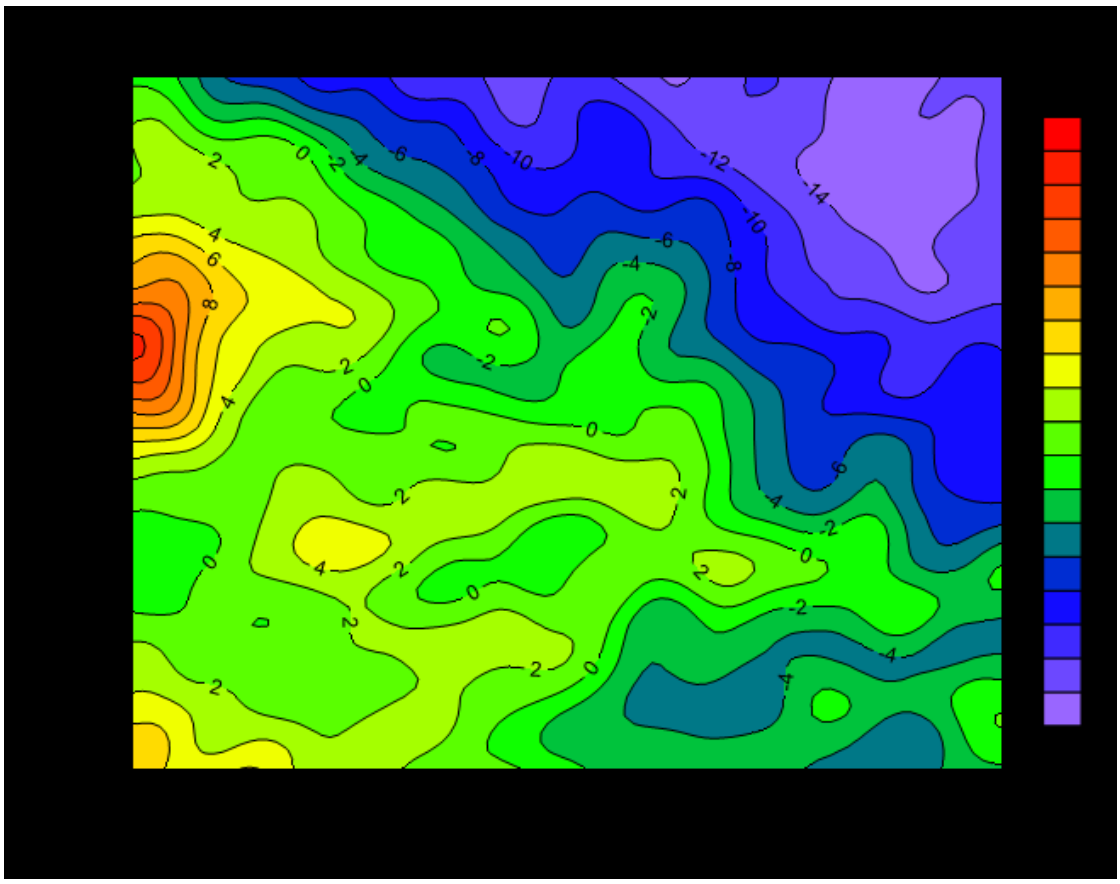


Рисунок 3.1 – Созданная навигационная гравитационная карта

Таким образом доказана применимость метода №2 для создания навигационных гравитационных карт УСП на труднодоступные территории на основе цифровых моделей рельефа и моделей плотности пород.

3.2 Разработка метода подготовки навигационных гравитационных карт гравитационных градиентов

3.3 Экспериментальная проверка возможности создания навигационной гравитационной карты гравитационных градиентов

3.3.1 Метод №1. Метод простой интерполяции

По аналогии с методом №1, рассмотренным в разделе 2.3.1, уравнение интерполяции гравитационных градиентов $W_{\alpha\beta}$ определяется формулой:

$$W_{\alpha\beta_i}^{инт} = W_{\alpha\beta_N} + \frac{W_{\alpha\beta_N+1} - W_{\alpha\beta_N}}{L}\Delta l\,, \qquad (3.1)$$

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 , Δl - интервал интерполяции.

Проверку применимости метода выполним на примере ограниченно опубликованных результатов воздушных геофизических исследований для известной территории штата Миссури, США [97]. Краткая характеристика аэро-градиентометрической съемки:

– бортовой градиентометр HeliFalcon AGG;

– измеряемые составляющие W_{xy} и W_{Δ};

– погрешность измерений не более 3 Этвеш;

– диапазон изменений составляющих W_{xy} и W_{Δ} от -45 до 45 Этвеш;

– носитель - малогабаритный самолет;

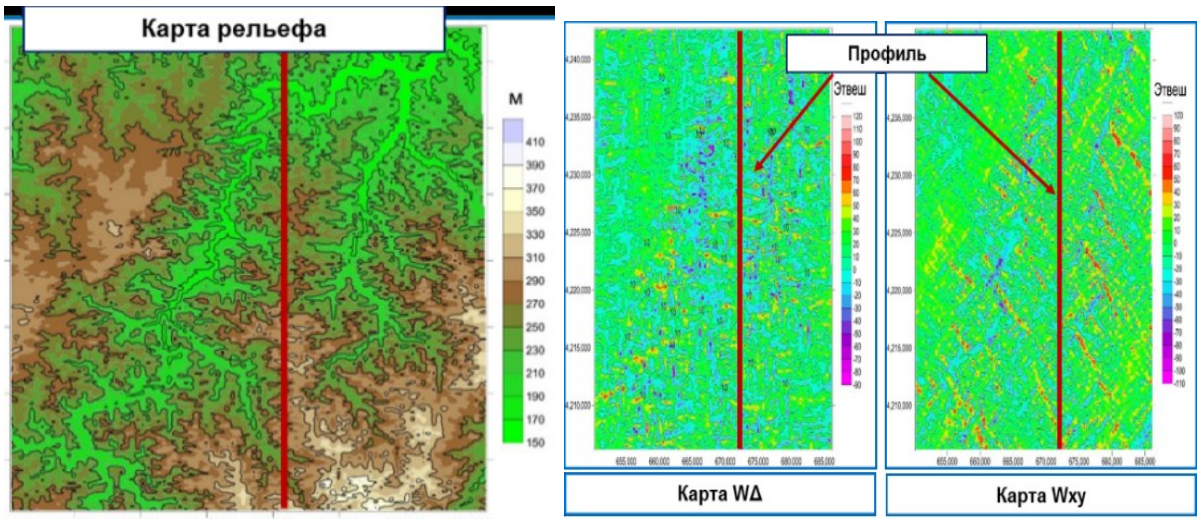
– режим полета – с обтеканием рельефа на высоте 60-80 м;

– скорость полета 160 км/ч;

– диапазон изменений высот рельефа от 150 до 410 м.

На рисунке 3.3 представлена общая характеристика рельефа местности и карты измеренных составляющих W_{xy} и W_{Δ}.

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.



а) б)

а) -Карта рельефа, б) - составляющих W_{xy}, W_{Δ}

Рисунок 3.3 - Схема района аэро-градиентометрической съемки

Выполним интерполяцию измеренных значений W_{Δ} и W_{xy} в узлы регулярной сетки с расстоянием 1 км между узлами. 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.

3.3.2 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 следующей суммы:

$$W_{\alpha\beta} = U_{\alpha\beta_\gamma} + \Delta T_{\alpha\beta_H} + \Delta T_{\alpha\beta_{\Delta\rho}}, \qquad (3.2)$$

где α, β 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.

Как было отмечено в разделе 1.3.2.4, наиболее перспективными в части направления разработки отечественных градиентометров являются горизонтальные градиентометры [98], измеряющие составляющие гравитационных градиентов W_{Δ} и W_{xy}. Применительно к этим составляющим,

уравнение (3.2) представим в виде:

$$W_{\Delta} = W_{yy} - W_{xx} = (U_{yy_{\gamma}} + \Delta T_{yy_H} + \Delta T_{yy_{\Delta\rho}}) - (U_{xx_{\gamma}} + \Delta T_{xx_H} + \Delta T_{xx_{\Delta\rho}}),$$
$$W_{xy} = U_{xy_{\gamma}} + \Delta T_{xy_H} + \Delta T_{xy_{\Delta\rho}} \qquad (3.3)$$

Составляющие гравитационных градиентов нормального поля находятся по известным формулам [99]:

$$U_{xx_{\gamma}} = -\frac{\gamma_0}{M};\ U_{yy_{\gamma}} = -\frac{\gamma_0}{N};\ U_{xy_{\gamma}} = 0, \qquad (3.4)$$

где , γ_0 - нормальное поле Земли, вычисляемое по формуле (2.9); M и N – радиус кривизны меридиана и первого вертикала соответственно.

Составляющие $U_{xx_{\gamma}}$, $U_{yy_{\gamma}}$ вычисляются по координатам точки с погрешностью тысячные доли Этвеш.

Слагаемые ΔT_{xx_H}, ΔT_{yy_H}, ΔT_{xy_H} в общем виде вычисляется по формуле [100, 101]:

$$\Delta T_{\alpha\beta_H} = \sum_{20км} \frac{G\rho_i \cdot v_i}{r_i^3}, \qquad (3.5)$$

где G – гравитационная постоянная, ρ_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 (3.5) 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 (3.5) вычисляется в виде определенного интеграла при известных размерах призм [102, 103, 104]:

$$\Delta T_{xx_H} = G\delta \left| \ arctg \frac{(y-\eta)(z-\zeta)}{(x-\xi)R} \right|_{\xi_1}^{\xi_2} \Bigg|_{\eta_1}^{\eta_2} \Bigg|_{\zeta_1}^{\zeta_2}, \qquad (3.6)$$

$$\Delta T_{yy_H} = G\delta \left| arctg \frac{(x-\xi)(z-\zeta)}{(y-\eta)R} \right|_{\xi_1}^{\xi_2} \Bigg|_{\eta_1}^{\eta_2} \Bigg|_{\zeta_1}^{\zeta_2}, \quad (3.7)$$

$$\Delta T_{xy_H} = -G\delta \left| \ln\left((z-\zeta)+R\right) \right|_{\xi_1}^{\xi_2} \Bigg|_{\eta_1}^{\eta_2} \Bigg|_{\zeta_1}^{\zeta_2}, \quad (3.8)$$

$$T_\Delta = \Delta T_{yy_H} - \Delta T_{xx_H}. \quad (3.9)$$

где G – гравитационная постоянная, δ – плотность, ξ_1 *и* ξ_2 – координаты углов по оси X, η_1 и η_2 – координаты углов по оси Y, ζ_1 и ζ_2 – координаты углов по оси Z. $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, где x, y и z – координаты точки вычислений.

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

В открытой печати сведений о величине аномальных составляющих $\Delta T_{\alpha\beta_{\Delta\rho}}$ нет [105, 106]. 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 [107].

Условия моделирования:

– простирание разлома на 20 км поперек направления движения объекта навигации;

– ширина 10 м;

– глубина залегания от 0 до 1 км;

– контраст плотности 1 г/см^3.

Задача моделирования – оценить зону влияния разлома на результат измерений бортового градиентометра объекта навигации, приближающегося перпендикулярно к геометрическому центру разлома (рисунок 3.4). Для расчетов использовались формулы (3.6) – (3.9).

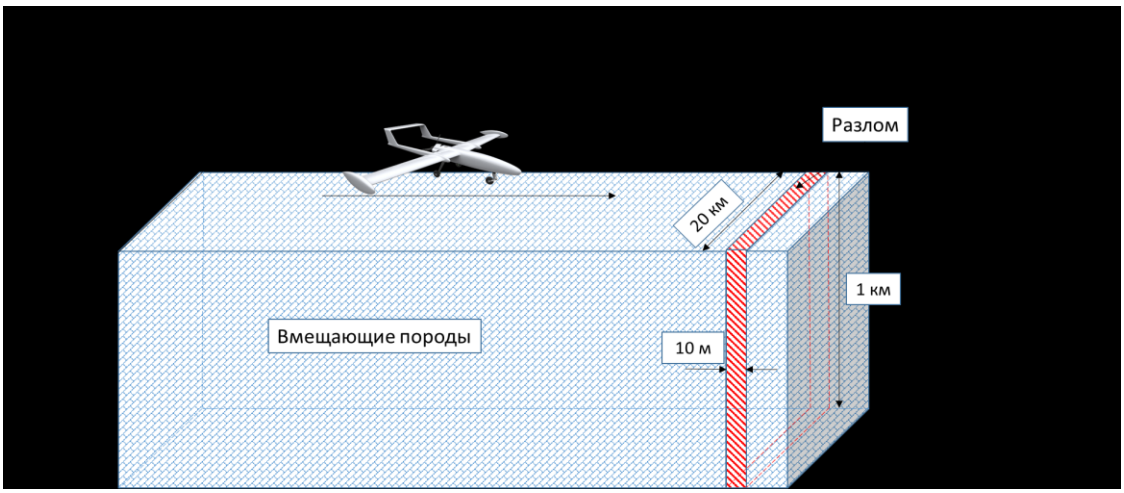


Рисунок 3.4 – общая схема эксперимента

На рисунке 3.5 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.

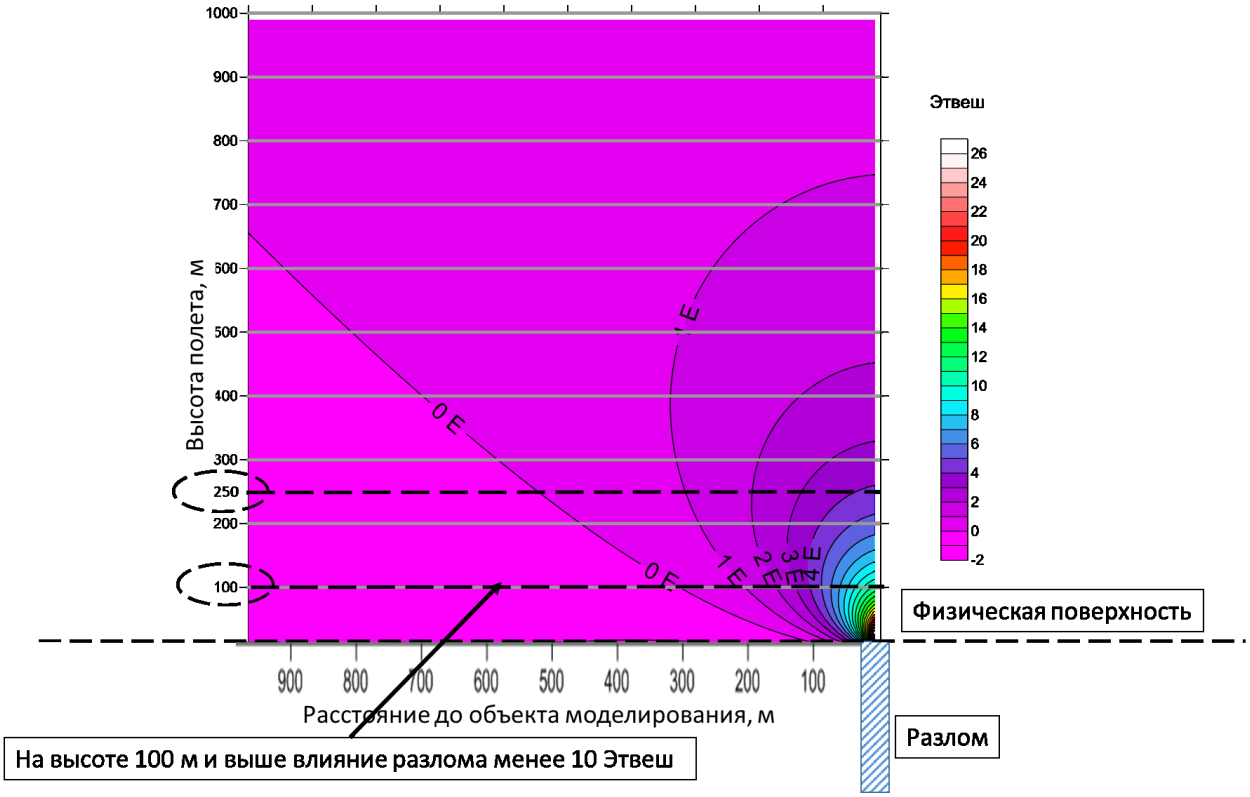


Рисунок 3.5 Оценка влияния разлома на измерения $\Delta T_{\alpha\beta_{\Delta\rho}}$

Аналогичные вычисления были сделаны и для геологического тела

размерами 20 000мХ100мХ100м (например, захороненное русло реки). Результаты моделирования представлены на рисунке 3.6.

Исследование результатов моделирования позволяет сделать вывод, что при высоте полета 200 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.

Если предположить, что сведения о плотностных свойствах пород рельефа, заключенных между физической поверхностью Земли и поверхностью эллипсоида известны, тогда можно переформулировать сделанный вывод - при геодезической высоте полета 250 м над эллипсоидом влиянием плотностных неоднородностей, располагающихся под поверхностью эллипсоида, можно пренебречь.

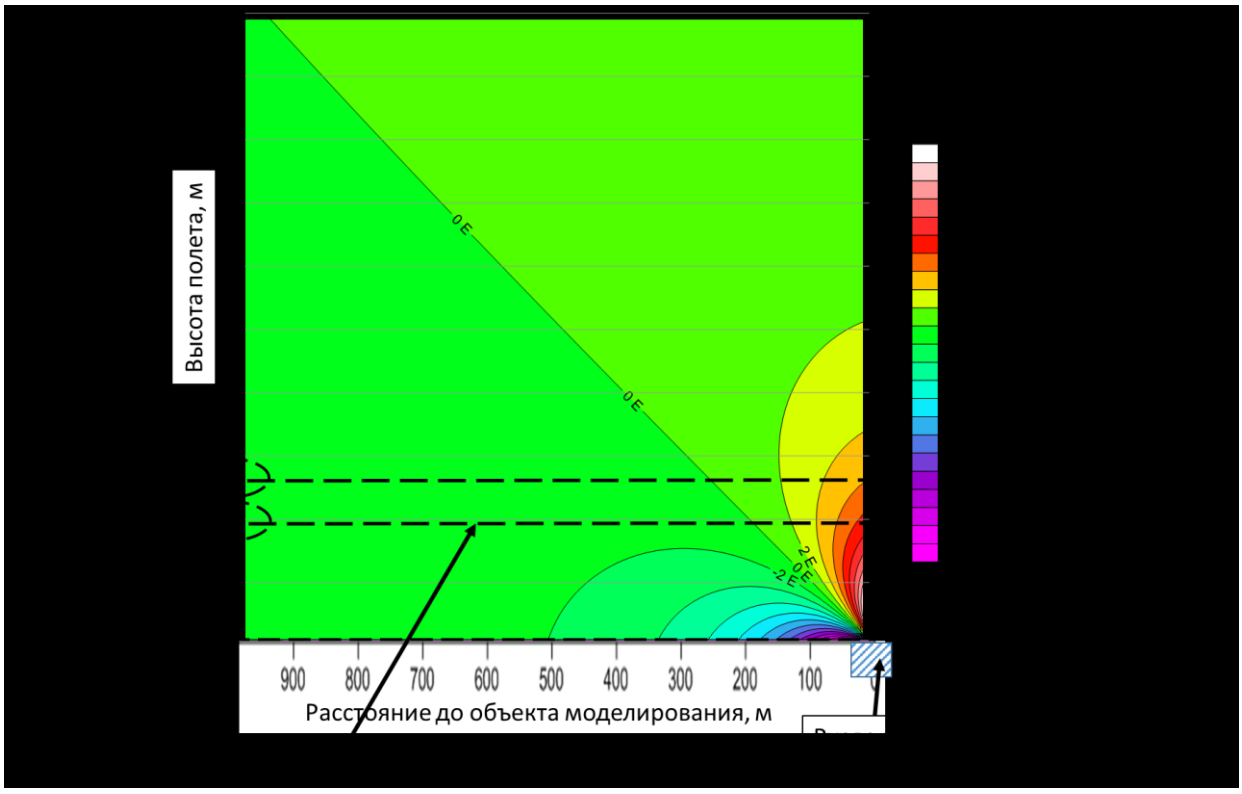


Рисунок 3.6 – Оценка влияния геологического тела на измерения $\Delta T_{\alpha\beta_{\Delta\rho}}$

Таким образом, для подготовки НГК составляющих W_{Δ} и W_{xy} необходимо использовать формулы (3.4), (3.5) и (3.6) – (3.9) при соблюдении следующих условий:

1. геодезическая высота в районе подготовки карты больше 250 м;

2. наличие цифровой карты рельефа и модели TopoDensT;

3.3.2.2 Экспериментальная проверка на примере реальных измерений

Выше были сформированы условия, при которых гравитационные градиенты W_{Δ} и W_{xy} будут практически полностью генерироваться породами рельефа, заключенными между физической поверхностью Земли и поверхностью эллипсоида.

Экспериментальную проверку сформулированных предположений выполним на примере реальных результатов геофизических исследований на территории штата Миссури, США [97].

Выполним вычисление $W_{\Delta_выч}$ и $W_{xy_выч}$ по формулам (3.6) – (3.9) для пунктов измерительного профиля (рисунок 3.7) без учета аномальных составляющих $\Delta T_{\alpha\beta_{\Delta\rho}}$. Для этого используем ЦКР на территорию штата Миссури и значение плотности пород 2,32 г/см^3 модели TopoDensT для этой территории.

Выполним оценку разности $\delta W_{\Delta} = W_{\Delta_изм} - W_{\Delta_выч}$. На рисунке 3.7 представлен результат вычислений для отдельного измерительного профиля. Коричневая кривая – высоты рельефа, голубая – измеренные значения $W_{\Delta_изм}$, оранжевая – вычисленные значения $W_{\Delta_выч}$. СКО δW_{Δ} составило менее 8 Этвеш.

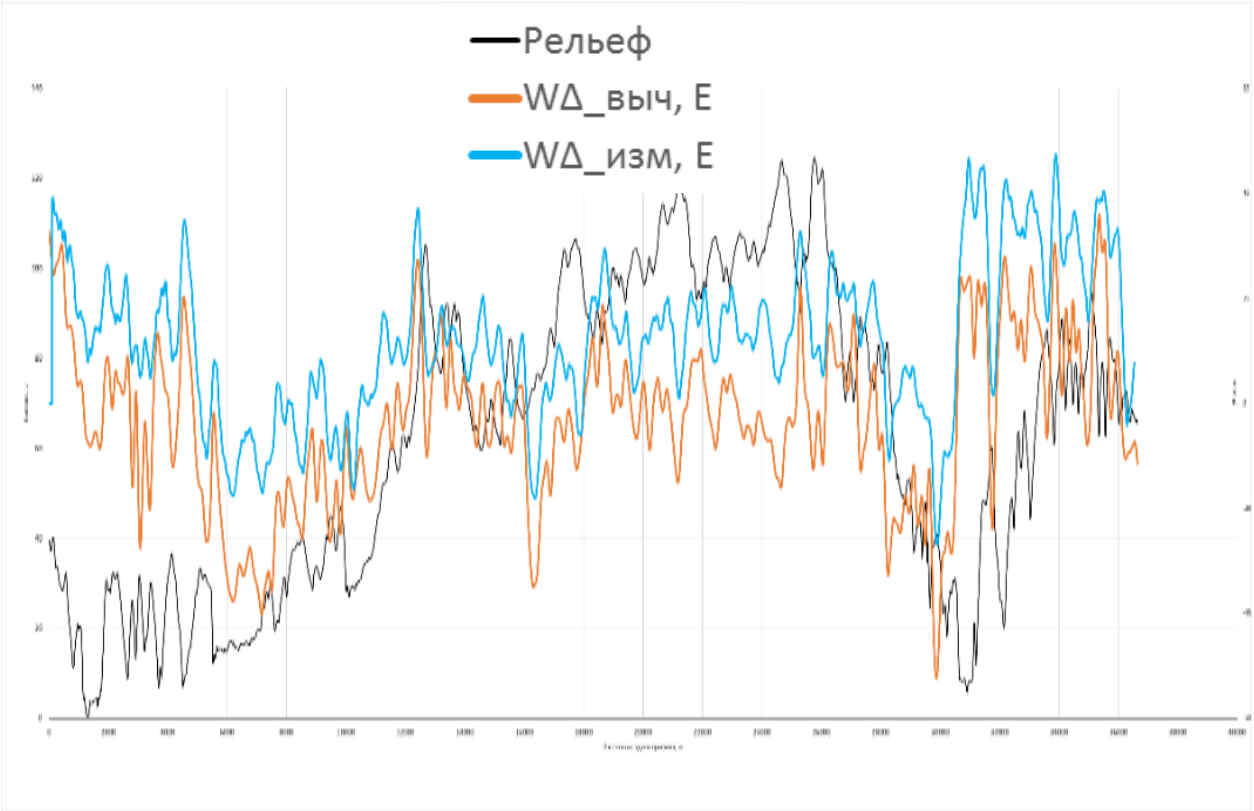
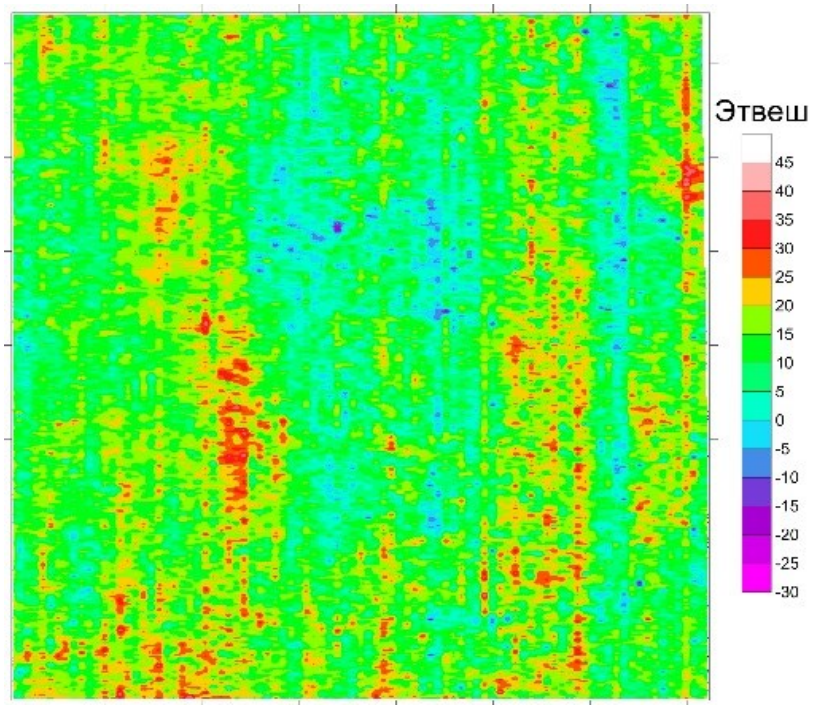
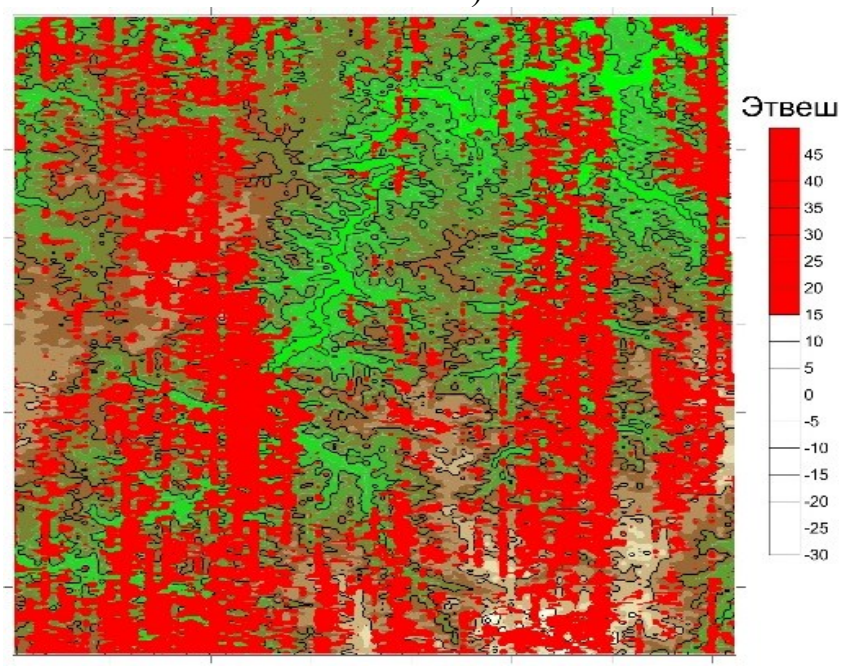


Рисунок 3.7 – Характеристики высот рельефа и составляющих W_{xy}, W_{Δ}.

На рисунке 3.8 представлена карта значений δW_{Δ} для всей площади исследований. Среднее значение δW_{Δ} составляет +12 Этвеш, при этом СКО δW_{Δ} - 6 Этвеш. Зависимости между концентрацией зон повышенных значений δW_{Δ} и характерными формами рельефа не наблюдается. Для составляющей δW_{xy} СКО разности также составило 6 Этвеш.



а)



б)

а) - Карта разности между $W_{\Delta_изм}$ и $W_{\Delta_выч}$; б) – Пространственное распределение невязок. Красным отмечены зоны, где значение разности превышает 10 Этвеш

Рисунок 3.8 – Результаты оценки погрешности вычислений

Малая величина СКО разности подтверждает сформулированные предположения о предельной высоте влияния плотностных неоднородностей, а также подтверждает возможность создания навигационных гравитационных карт W_{Δ} и W_{xy} по цифровой карте рельефа и модели плотности TopoDensT с

погрешностью не более 10 Этвеш и детальностью 1 км.

Таким образом, при соблюдении вышеуказанных условий, формула (3.3) упрощается:

$$W_{\Delta} = W_{yy} - W_{xx} = (U_{yy_{\gamma}} + \Delta T_{yy_H}) - (U_{xx_{\gamma}} + \Delta T_{xx_H}),$$
$$W_{xy} = U_{xy_{\gamma}} + \Delta T_{xy_H} \qquad (3.10)$$

3.3.3 Оценка навигационной информативности карт W_{xy} и W_{Δ}

Используя средние характеристики изменчивости гравитационных градиентов W_{xy} и W_{Δ} для вышеуказанной аэро-градиентометрической съемки, выполним приближенную оценку навигационной информативности параметров ГПЗ по формуле чувствительности [108, 109]:

$$\sigma_{нав} = \frac{\sigma_{изм}}{GRAD_{поля}}, \qquad (3.11)$$

где $\sigma_{нав}$ – ожидаемая СКО определения координат в метрах, $\sigma_{изм}$ – погрешность измерителя, $GRAD_{поля}$ – градиент параметра ГПЗ.

Для вычислений используем типовую погрешность гравитационных градиентометров 1 Этвеш и подтвержденную погрешность карты 6 Этвеш. По результатам моделирования ожидаемая СКО определения плановых координат по составляющим W_{xy} и W_{Δ} составила 0,3 км. Результаты представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Оценка ожидаемой навигационной информативности карт гравитационных градиентов

Наименование составляющей	Градиент поля по профилю, Этвеш/км	Погрешность бортового градиентометра, Этвеш	Погрешность карты, Этвеш	Ожидаемая СКО определения плановых координат, км
W_{xy}	20	1	6	0,3
W_{Δ}	20	1	6	0,3

Оценка навигационной информативности гравитационных градиентов в условиях передвижения по горному ущелью

В предыдущем разделе была доказана возможность применения ЦКР и

модели плотности для создания навигационных гравитационных карт W_{xy} и W_{Δ} в условиях передвижения объекта навигации над рельефом местности.

Одним из условий, ограничивающих возможности БИНС с коррекцией по сигналам ГНСС, является передвижение в условиях горного ущелья. Выполним оценку навигационной информативности карт W_{xy} и W_{Δ} в условиях передвижения вдоль русла ущелья и в условиях приближения к его бортам. На рисунке 3.9 показана карта рельефа Большого Каньона около г. Лас-Вегас, штат Невада, США. Красным нанесены пункты маршрута следования объекта навигации с превышением 50 м над руслом ущелья, синим – с постоянной высотой 1400 м в условиях приближения к бортам ущелья.

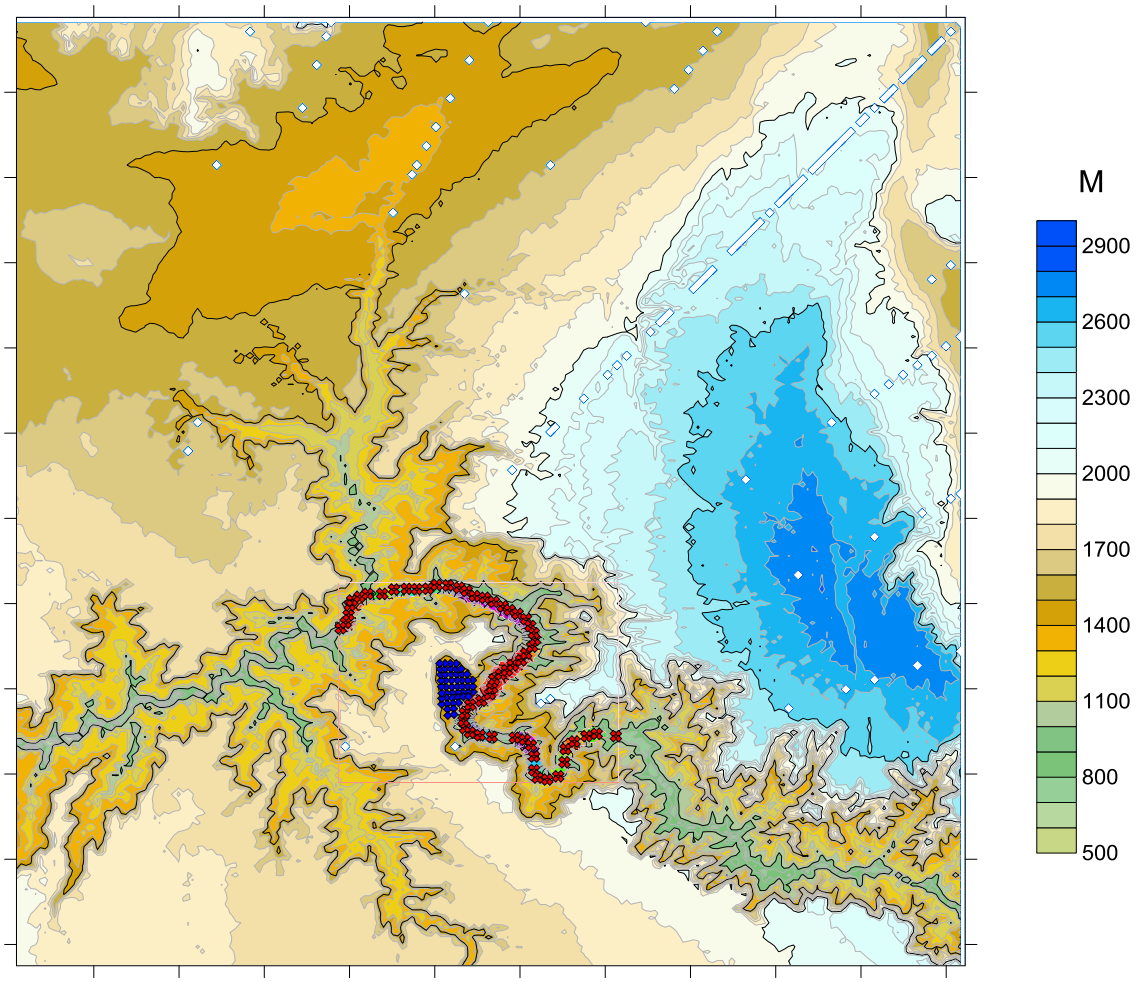
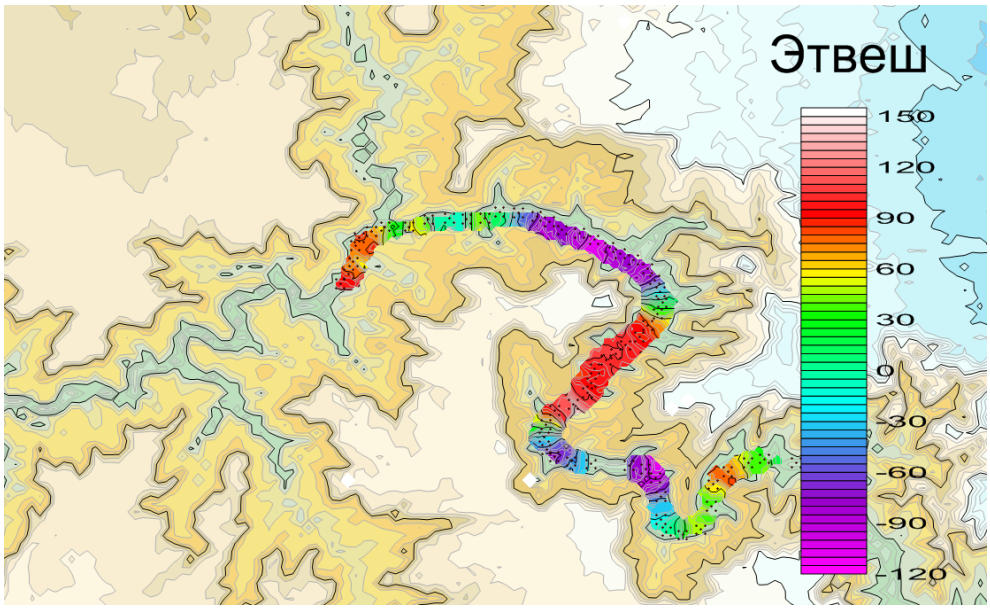


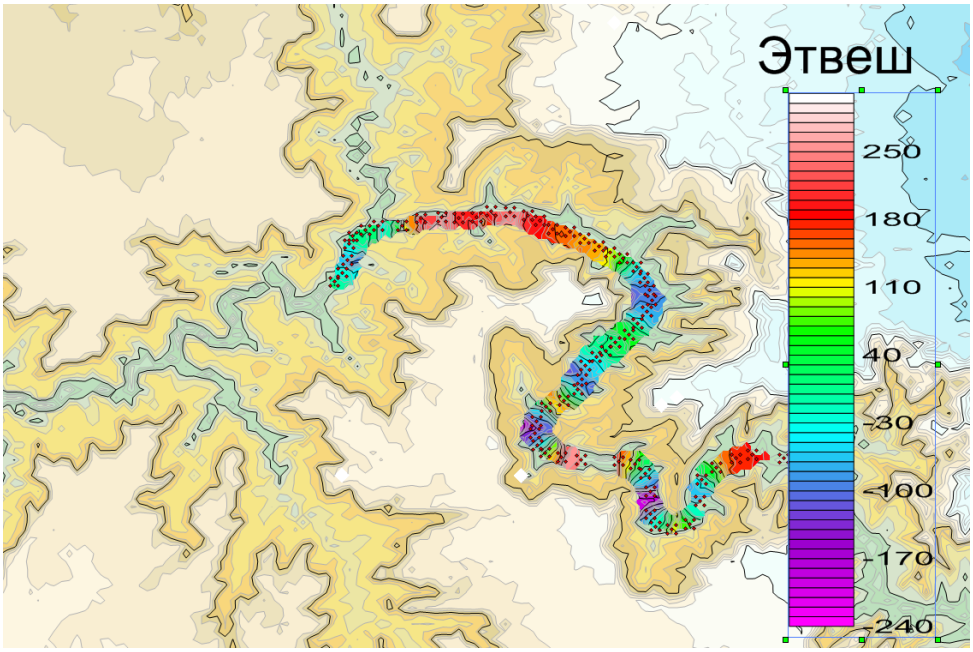
Рисунок 3.9 – Схема передвижения объекта навигации по ущелью

Выполним подготовку навигационной гравитационной карты $W_{xy_выч}$ и $W_{\Delta_выч}$ для пунктов профиля полета, обозначенного на рисунке 3.9. Для этого применим метод №2 (раздел 3.3.2), ЦКР на территорию штата Невада и

значение плотности пород 2,12 г/см^3 модели TopoDensT для этой территории. На рисунке 3.10 представлены результаты вычислений $W_{xy_выч}$ и $W_{\Delta_выч}$ при полете на высоте 50 м над руслом ущелья.



а)

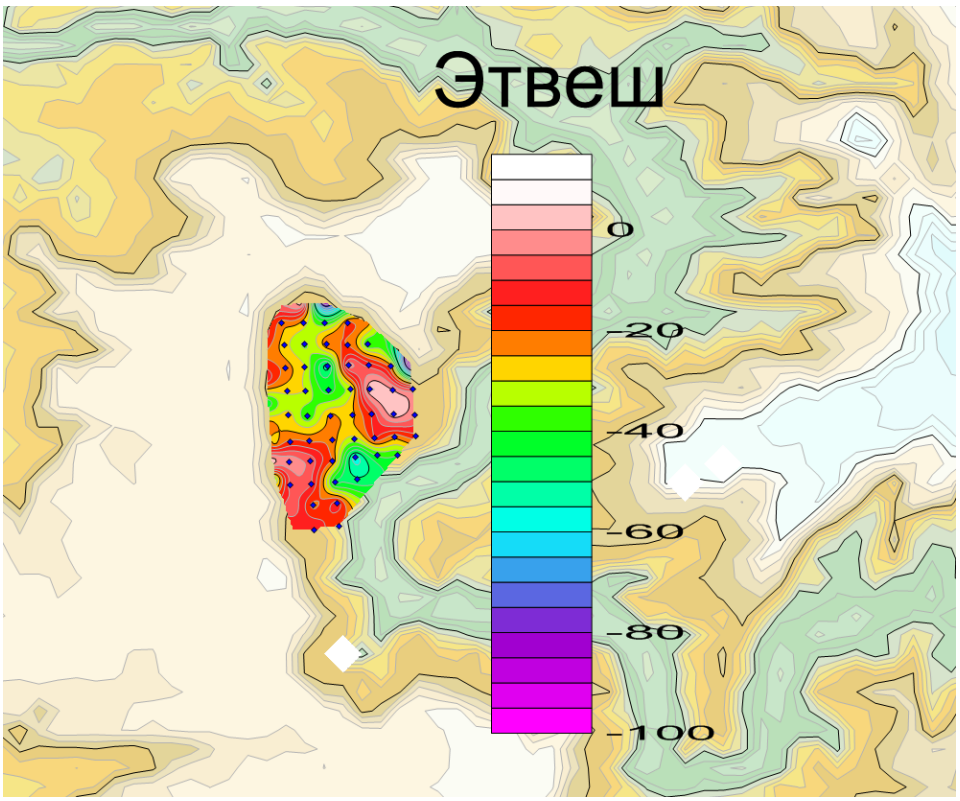


б)

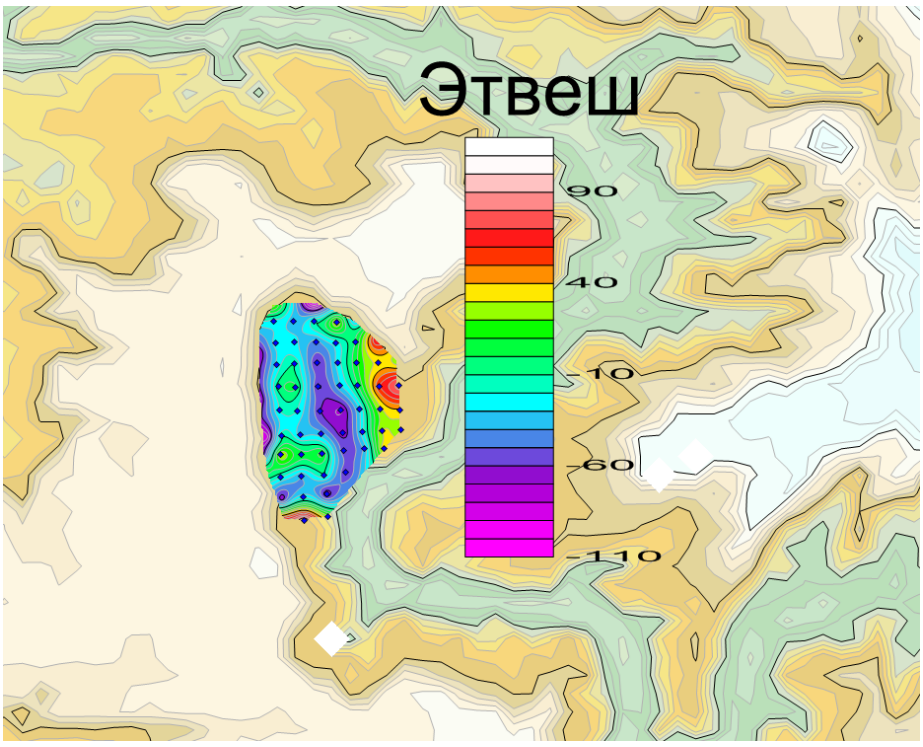
а) – карта изменений $W_{\Delta_выч}$, б) - карта изменений $W_{xy_выч}$

Рисунок 3.10 – Результаты вычислений.

На рисунке 3.11 представлены результаты вычислений $W_{xy_выч}$ и $W_{\Delta_выч}$ при полете на постоянной высоте около бортов ущелья.



а)



б)

а) – карта изменений $W_{\Delta_выч}$, б) - карта изменений $W_{xy_выч}$

Рисунок 3.11 - Результаты вычислений.

Используя средние характеристики изменчивости гравитационных градиентов $W_{xy_выч}$ и $W_{\Delta_выч}$ для вышеуказанных условий полета вдоль ущелья,

выполним оценку навигационной информативности в общем виде по формуле (3.11). В таблице 3.3 представлены результаты вычислений. Ожидаемая СКО определения плановых координат по гравитационным градиентам составила 0,2 км по составляющим W_{xy} и W_{Δ}.

Таблица 3.3 – Оценка навигационной информативности карт гравитационных градиентов

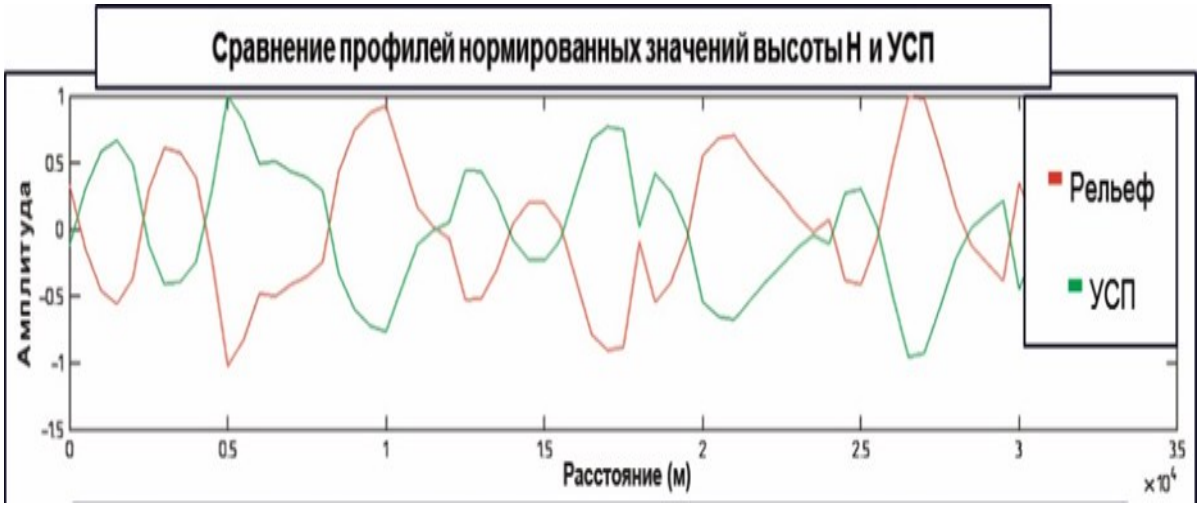
Наименование составляющей	Градиент поля, Этвеш/км	Погрешность бортового градиентометра, Этвеш	Погрешность карты, Этвеш	Ожидаемая СКО определения плановых координат, км
Полет на высоте 50 м над руслом каньона				
W_{xy}	30	1	6	0,2
W_{Δ}	30	1	6	0,2
Полет на постоянной высоте около бортов каньона				
W_{xy}	70	1	6	0,09
W_{Δ}	60	1	6	0,1

3.3.4 Оценка возможности калибровки спутниковых градиентометров по наземным измерениям

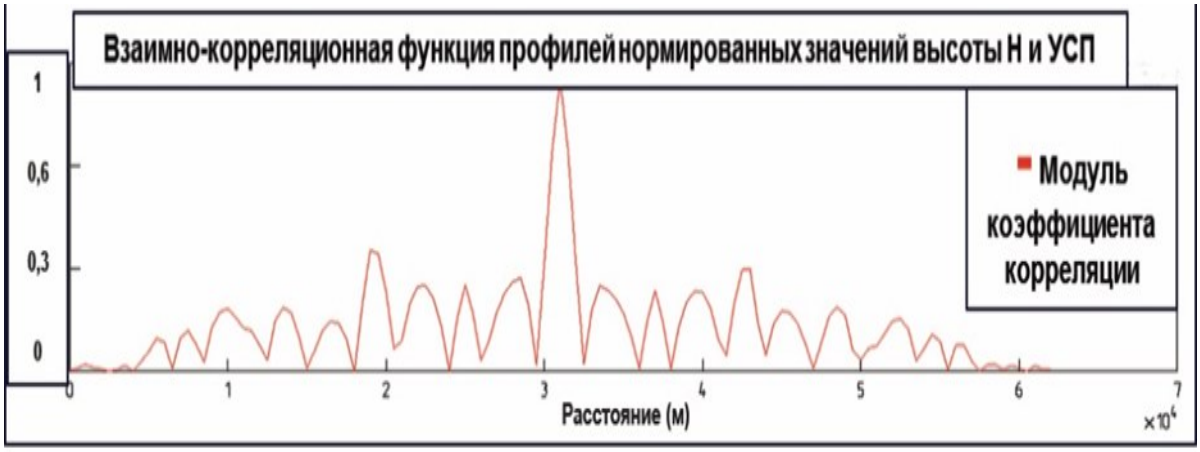
В настоящее время создание перспективной космической геодезической системы заключается не только в создании спутниковых измерителей параметров ГПЗ (УСП и гравитационных градиентов), но и в разработке методов их калибровки на наземных полигонах. Предполагается, что наземные полигоны калибровки будут располагаться 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.

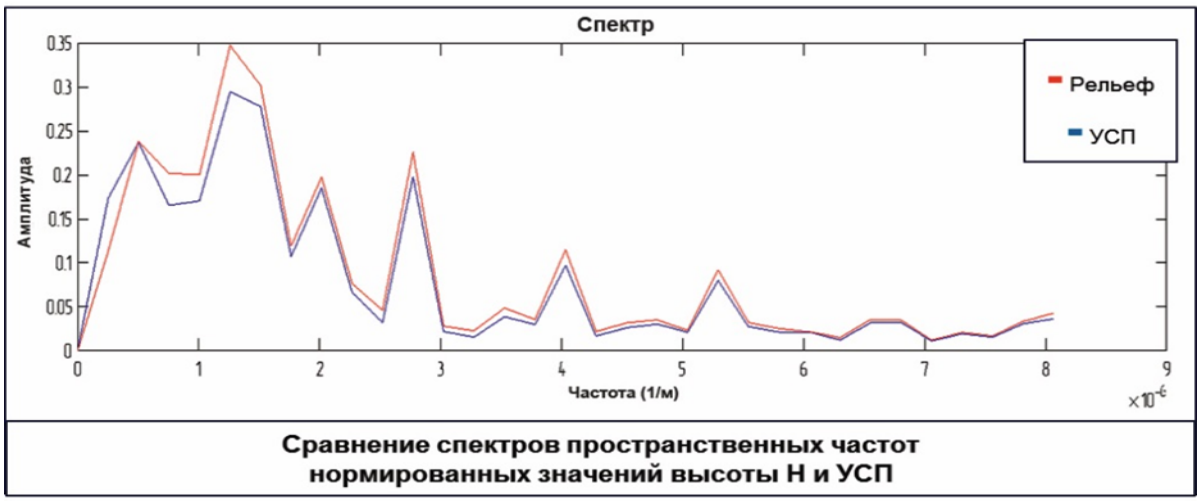
Один из возможных методов оценки корректной работы спутниковых измерителей параметров ГПЗ основан на использовании цифровых карт рельефа. Для подтверждения возможности использования цифровых карт рельефа необходимо выполнить оценку корреляционных зависимостей между изменениями рельефа местности и параметрами ГПЗ. На примере известных территорий [110] 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 3.12 и 3.13.



а)



б)

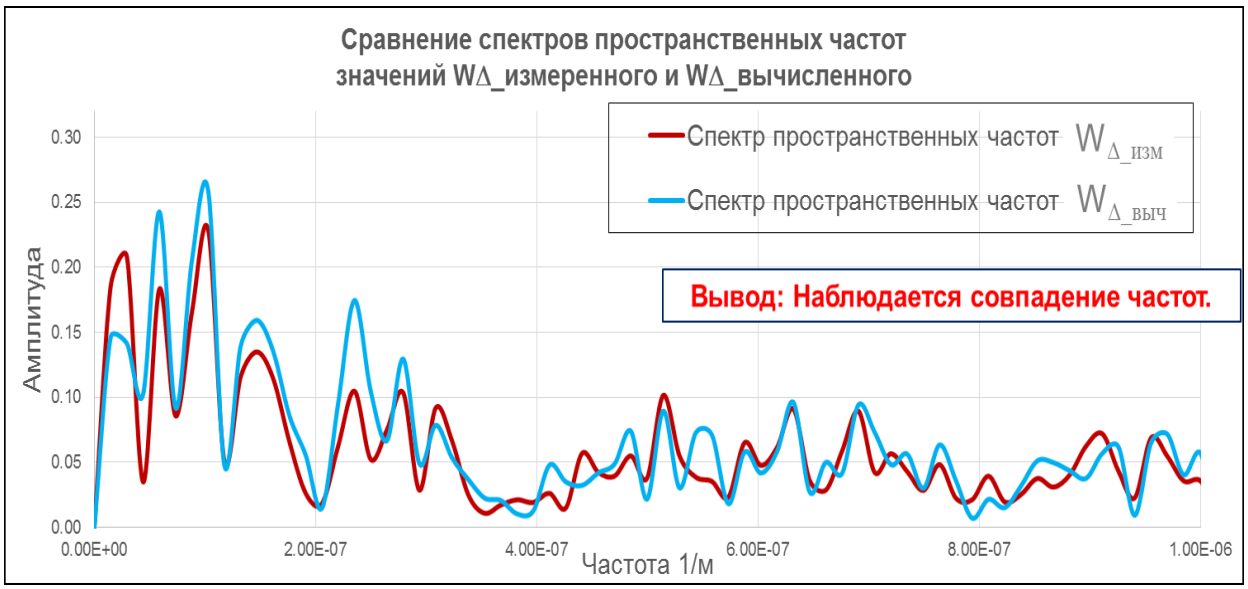


в)

Рисунок 3.12 - Корреляционные и спектральные характеристики профиля высот рельефа и ускорения свободного падения

На рисунке 3.12а приведены профили изменения рельефа и УСП. На графике рисунка 3.12б чётко прослеживается корреляционная связь профиля УСП и профиля высот рельефа. При этом спектральные составляющие пространственных частот УСП и высот рельефа практически полностью совпадают (рисунок 3.12в).

а)



б)

в)

Рисунок 3.13 - Корреляционные и спектральные характеристики профиля высот рельефа и гравитационных градиентов

Спектральные составляющие пространственных частот $W_{\Delta_изм}$ и высот рельефа не совпадают (рисунок 3.13а), 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 3.13б, 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 над труднодоступными территориями.

3.4 Выводы по главе 3

1) Впервые применен метод совместного использования цифровых карт рельефа и модели плотности пород промежуточного слоя для создания навигационных гравитационных карт УСП необходимой точности и детальности на труднодоступные территории;

2) Впервые на основе сопоставления с реальными измерениями доказана возможность создания навигационных гравитационных карт W_{xy} и W_{Δ} необходимой точности и детальности для воздушных объектов навигации на основе информации о высотах рельефа и значений плотности пород;

3) Впервые показана возможность применения и выполнена оценка навигационной информативности карт W_{xy} и W_{Δ} для объекта, летящего вдоль русла каньона как на постоянной высоте, так и с переменной высотой;

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 над труднодоступными территориями.

Таким образом, задача разработки метода подготовки навигационных гравитационных карт необходимой точности и детальности для наземных и воздушных объектов решена.

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

Задачу определения координат потребителя, перемещающегося внутри помещений по карте гравитационного поля (ГП) этих помещений, можно решить при помощи измерителей ГПЗ – гравиметров и градиентометров. Поэтому для обеспечения решения задачи навигации на основе этих измерений необходимо подготовить карты изменений УСП и составляющих гравитационных градиентов.

Существует два основных способа подготовки навигационных гравитационных карт внутри 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.

Последовательно остановимся на реализации обоих методов.

4.1 Условия моделирования параметров ГПЗ внутри типового помещения

Для вычисления параметров ГП внутри помещения воспользуемся ранее указанными соотношениями, определяющими изменение УСП (2.13), W_{yy} (3.6), W_{xx} (3.7), W_{xy} (3.8) и W_{Δ} (3.9) вдоль оси X от произвольного прямоугольного параллелепипеда, грани которого параллельны координатным плоскостям.

Для выполнения моделирования распределения параметров ГП внутри помещения была выбрана модель отдельно стоящей лабораторной комнаты на первом этаже здания вдали от источников гравитационных помех. Параметры помещения представлены на рисунке 4.1. Высота потолка принята за 2,9 м, толщина плит фундамента и потолка 0,3 м. Помещение расположено в геометрическом центре плиты фундамента с размерами 24х25 м. Плотность

материала стен выбрана в соответствии с плотностью кирпичной кладки - 1800 кг/м^3, плотность материала фундамента и потолка 2300 кг/м^3. В левой стене заложено окно с размерами 0,3х0,3 м. Вычисляемые параметры ГПЗ для модели лаборатории: УСП, гравитационные градиенты W_{Δ} и W_{xy}, гравитационное виляние Земли не учитывалось.

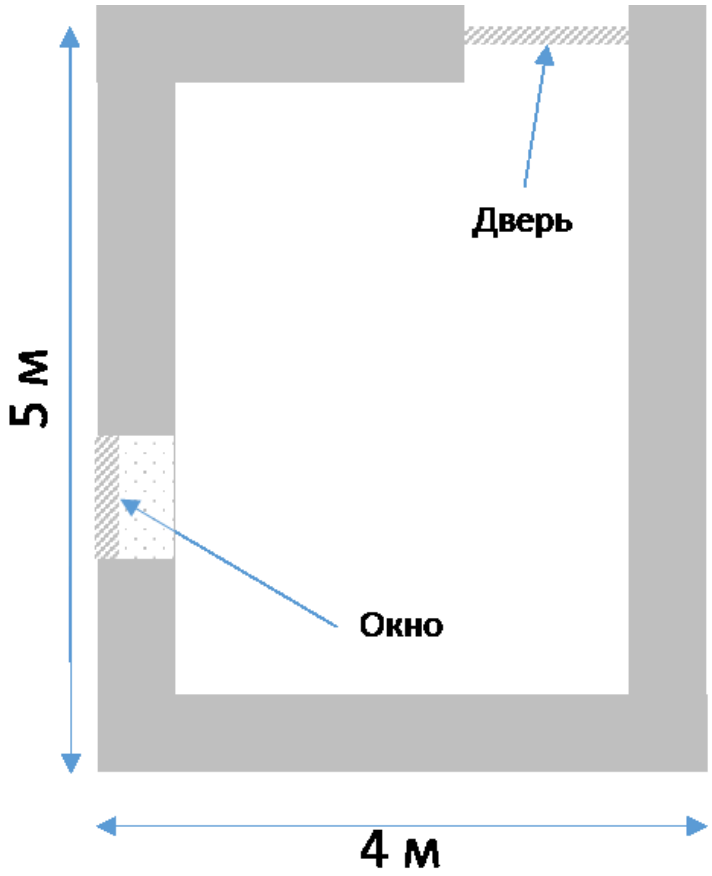
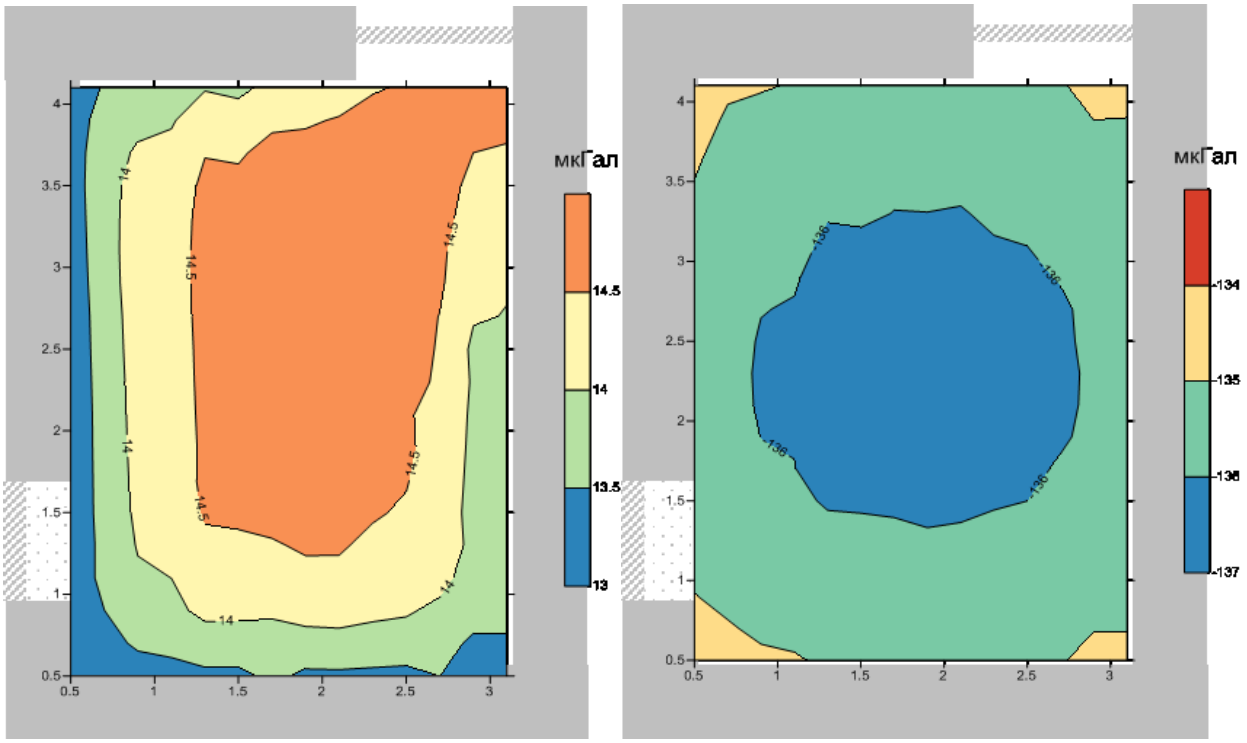


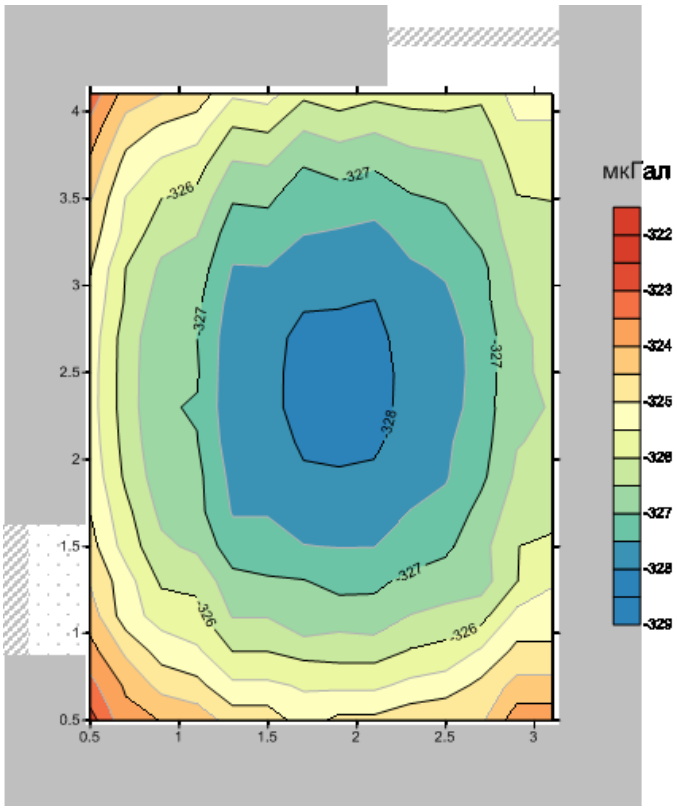
Рисунок 4.1 – Параметры моделируемого помещения.

4.1.1 Результаты моделирования пространственного распределения значений УСП внутри помещения

Результаты моделирования значений УСП в заданном помещении при выбранных условиях на отметках высот т 0.4, 0.9 и 1,45 метра от пола представлены на рисунке 4.2.



а) б)



в)

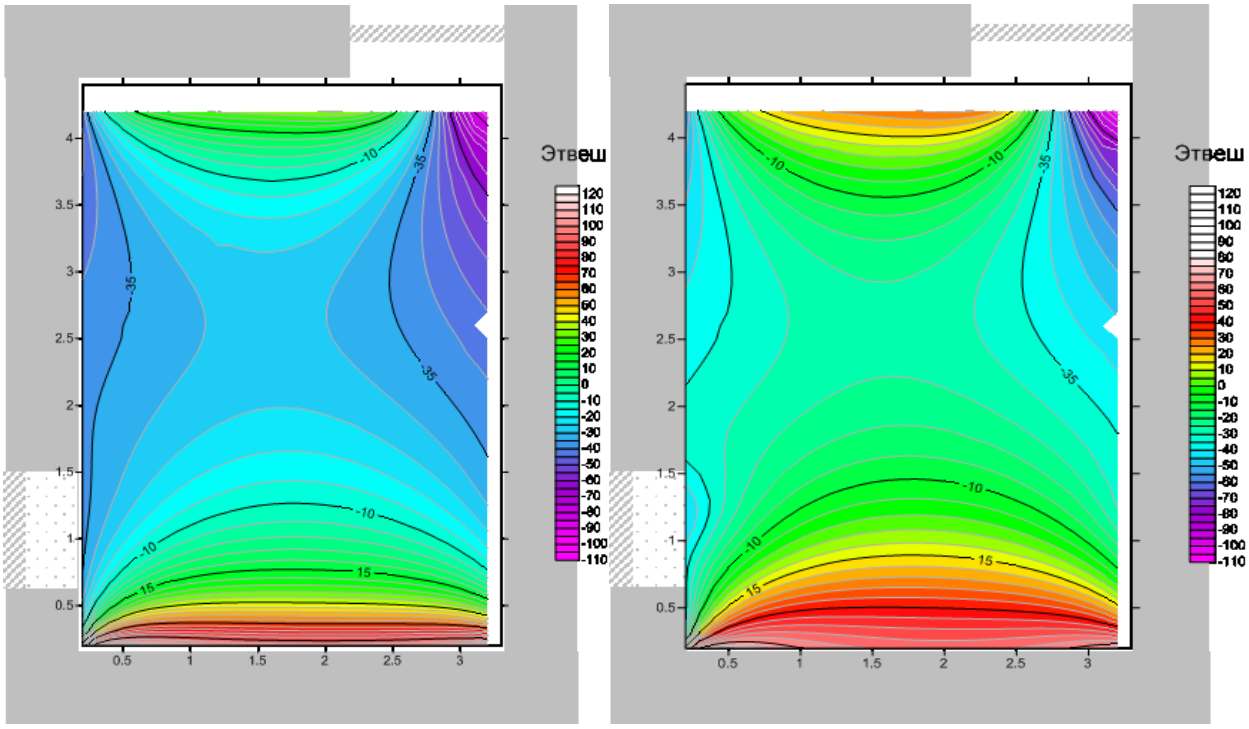
а) - Карта изменения УСП на высоте 0,4 м; б) Карта изменения УСП на высоте 0,9 м; в) - Карта изменения УСП на высоте 1,45 м;

Рисунок 4.2 – Карты изменения УСП внутри лабораторного помещения

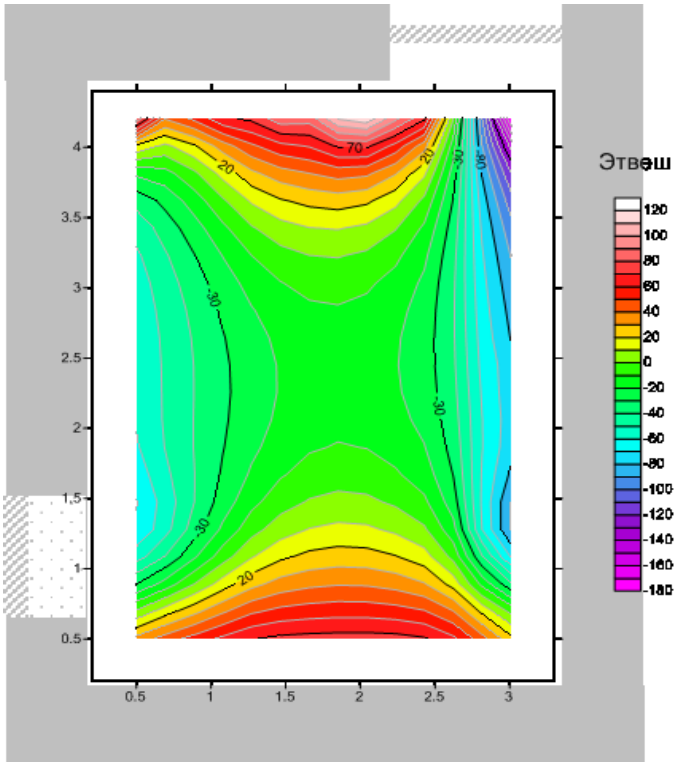
Характер распределения значений УСП в горизонтальной плоскости. Проведенный анализ характера изменения значений УСП в горизонтальной плоскости показывает, что в непосредственной близости от пола помещения наблюдается зона максимально стабильного распределения УСП. По амплитуде значения УСП меняются на 2 мкГал от 13 до 15 мкГал, при этом четко прослеживается тенденция уменьшения УСП по мере приближения к стенам помещения. Исключение составляет зона дверного проема, где уменьшения УСП не происходит. Это можно объяснить тем, что гравитационное влияние фундамента на малом расстоянии намного сильнее влияния стен и потолка помещения. На отметке высоты 0,9 м от пола помещения характер распределения УСП меняется на противоположный: по амплитуде значения УСП меняются на 1,5 мкГал от -134 до -137 мкГал, в центре помещения находится зона наименьших значений УСП, тогда как с приближением к стенам значения УСП возрастают. Влияние дверного проема и окон в явном виде не наблюдается, что можно объяснить симметричным расположением дверной ниши относительно плоскости вычислений и малым гравитационным эффектом, создаваемым окном на фоне стен. На отметке высоты 1,45 м значения УСП по амплитуде меняются на 5 мкГал от -322 до -329 мкГал, в центре помещения находится зона наименьших значений УСП, по мере приближения к стенам значения УСП возрастают. Влияние дверного проема отчетливо видно по увеличившейся зоне наименьших значений УСП, влияние окна не наблюдается.

4.1.2 Результаты моделирования пространственного распределения гравитационных градиентов W_{Δ}

Условия моделирования те же: моделирование выполнялось на отметках высот 0.4, 0.9 и 1.45 м над полом помещения. Результаты моделирования распределения значений W_{Δ} представлены на рисунке 4.3.



а) б)



в)

а) - Карта изменения W_{Δ} на высоте 0,4 м; б) Карта изменения W_{Δ} на высоте 0,9 м; в) - Карта изменения W_{Δ} на высоте 1,45 м;

Рисунок 4.3 – Карты изменения W_{Δ} внутри лабораторного помещения

Характер распределения значений W_{Δ} *в горизонтальной плоскости.*

Проведенный анализ изменения значений W_{Δ} в горизонтальной плоскости

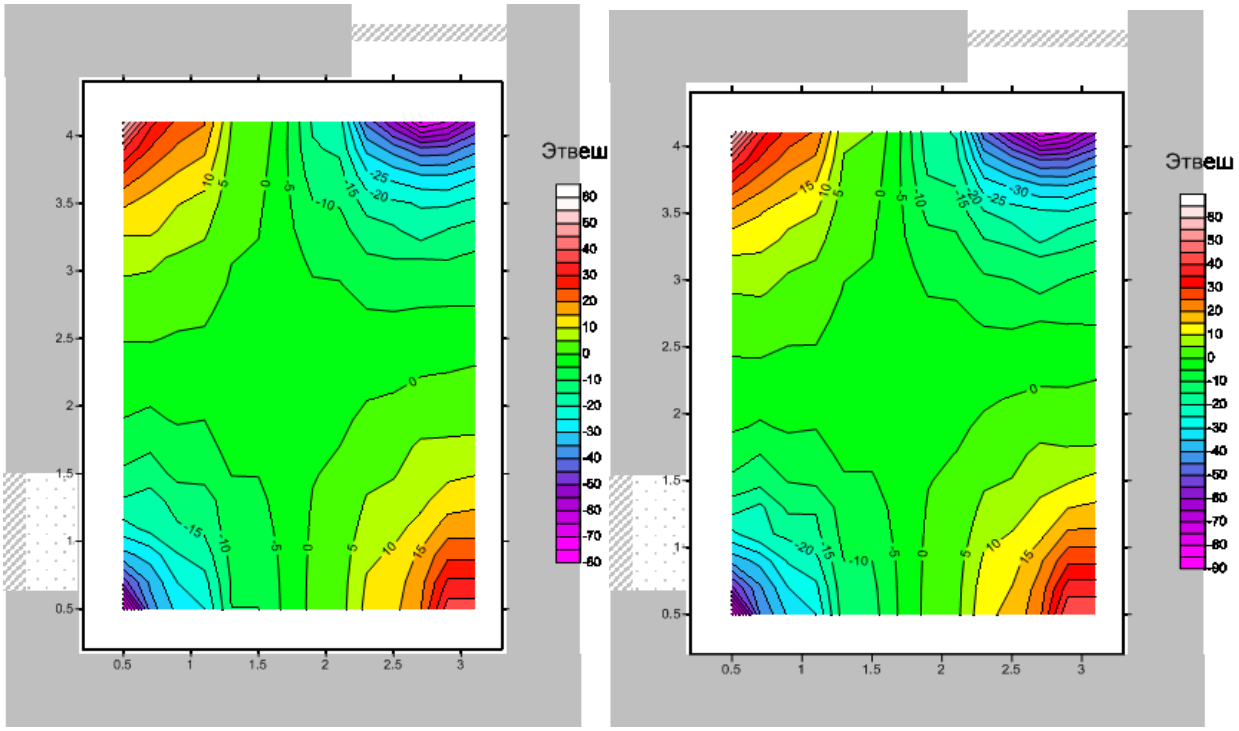
показывает, что центральная зона помещения на всех трех горизонтальных плоскостях характеризуется значениями 0 ±150 Этвеш. Области помещения, находящиеся в непосредственной близости от стен, ориентированных вдоль вертикальной координатной оси, характеризуются отрицательными значениями W_{Δ} от -150 до -30 Этвеш. Области помещения, находящиеся в непосредственной близости от стен, ориентированных вдоль горизонтальной координатной оси, характеризуются положительными значениями W_{Δ} от 0 до 100 Этвеш.

Характер распределения значений W_{Δ} в вертикальной плоскости. Результаты моделирования показывают, что гравитационное влияние структурных элементов помещения на изменение значений W_{Δ} по вертикали крайне незначительно или отсутствует! Исключение составляет область в непосредственной близости от окна, где наблюдается отрицательная аномалия с амплитудой до -20 Этвеш.

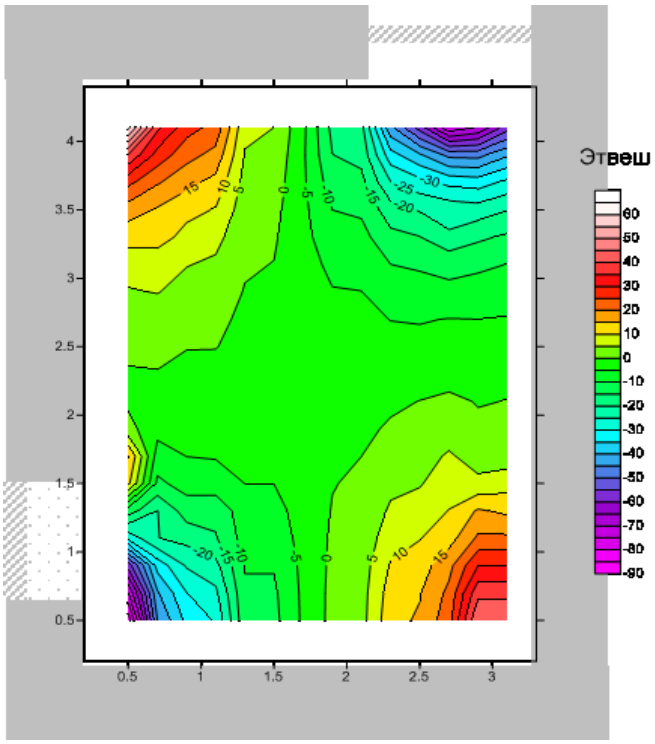
4.1.3 Моделирование пространственного распределения гравитационных градиентов W_{xy}

Условия моделирования те же: моделирование выполнялось на отметках высот 0.4, 0.9 и 1.45 м над полом помещения. Результаты моделирования распределения значений W_{xy} представлены на рисунке 4.4.

Характер распределения значений W_{xy} в горизонтальной плоскости. Проведенный анализ изменения значений W_{xy} в горизонтальной плоскости показывает, что большая часть помещения на всех трех горизонтальных плоскостях характеризуется значениями 0 ±60 Этвеш. Области помещения, находящиеся на расстоянии 1 м от левого нижнего и правого верхнего углов стен характеризуются отрицательными значениями W_{xy} от -80 до -10 Этвеш. Области помещения, находящиеся на расстоянии 1 м от левого верхнего и правого нижнего углов стен характеризуются положительными значениями W_{xy} от 30 до 80 Этвеш.



а) б)



в)

а) - Карта изменения W_{xy} на высоте 0,4 м; б) Карта изменения W_{xy} на высоте 0,9 м; в) - Карта изменения W_{xy} на высоте 1,45 м;
Рисунок 4.4 – Карты изменения W_{xy} внутри лабораторного помещения

Характер распределения значений W_{xy} в вертикальной плоскости. Результаты моделирования показывают, что гравитационное влияние

структурных элементов помещения на изменение значений W_{xy} по вертикали крайне незначительно или отсутствует! Исключение составляет область в непосредственной близости от окна, где наблюдается положительная аномалия с амплитудой +12 Этвеш.

Характер распределения значений W_{zz}.

Результаты моделирования распределения вертикального градиента УСП показаны на рисунке 4.5.

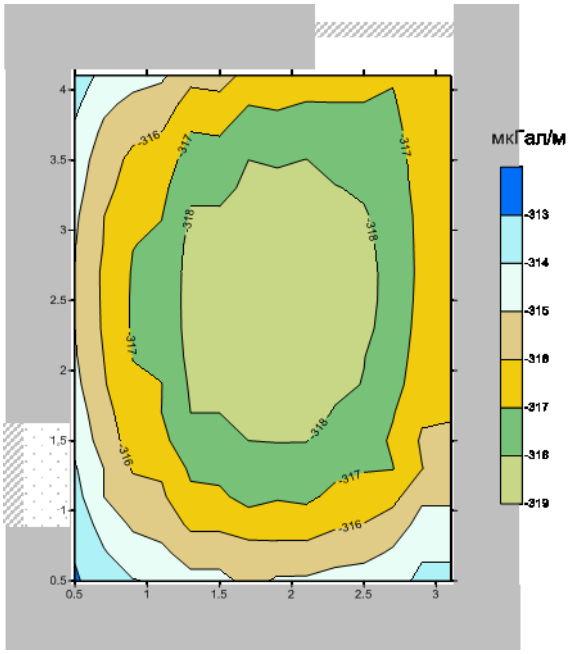


Рисунок 4.5 – Карта распределения вертикального градиента УСП на высоте 0,9 м

Результаты моделирования показывают, что гравитационное влияние структурных элементов помещения на изменение УСП по вертикали имеет следующие особенности:

– диапазон изменения от -319 до -313 мкГал/м;

– в непосредственной близости от стен помещения наблюдается уменьшение W_{zz} по амплитуде на 6 мкГал/м;

– в центре помещения наблюдается зона стабильных значений W_{zz}.

Предварительный анализ навигационной информативности параметров ГПЗ внутри закрытых помещений простой конструкции показывает, что задача определения местоположения в плане с погрешностью 1-2 м осуществима только по результатам измерений гравитационных градиентов

W_{xy} и W_{Δ}. Для этого необходим гравитационных градиентометр с погрешностью измерений не более 10 Этвеш. Определение высоты с погрешностью не более 1 м возможно только по результатам измерений гравиметра. Для этого необходим гравиметр с погрешностью измерений не более 150 мкГал.

4.2 Моделирование параметров ГП внутри здания

4.2.1 Условия и результаты моделирования

Оценку характера распределения параметров ГП внутри зданий выполним на примере модели трехэтажного здания, план этажа которого представлен на рисунке 4.6. Исходные параметры стен, и перекрытий для моделирования аналогичны параметрам, использовавшимся в разделе 3.1. Отличие заключается в увеличении размеров фундамента для создания фоновых значений УСП. Гравитационное влияние Земли не учитывалось.

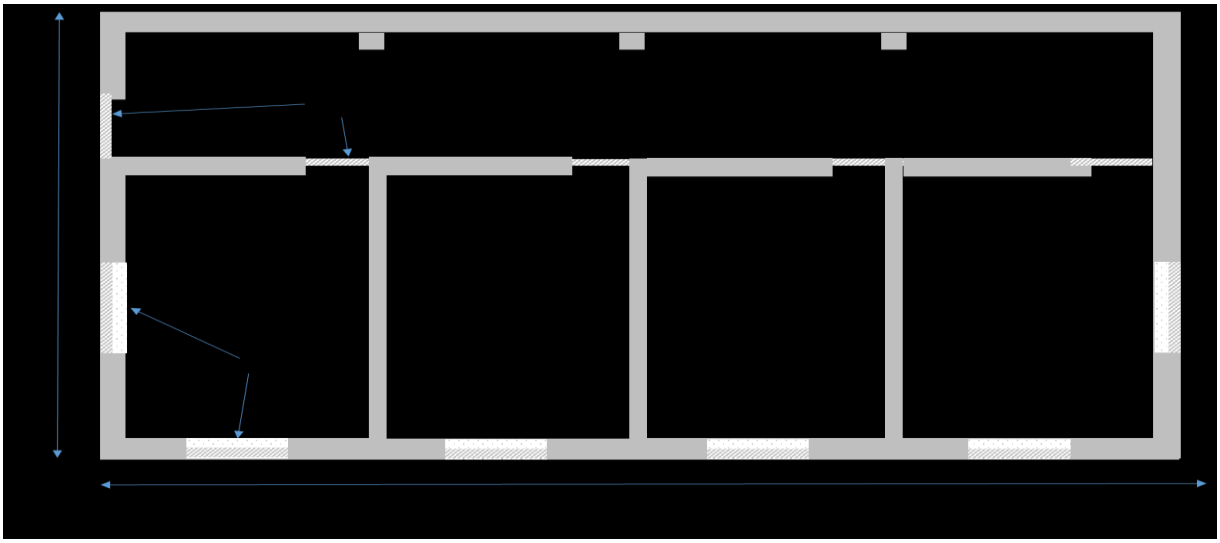


Рисунок 4.6 – Модель этажа здания

Для каждого этажа аналогичным образом выполнены вычисления значений УСП, W_{Δ} и W_{xy} на высоте 1,65 м над уровнем пола. На рисунках 4.7, 4.8 и 4.9 представлены карты распределения значений УСП, W_{Δ} и W_{xy} для этажа 1, 2 и 3 соответственно.

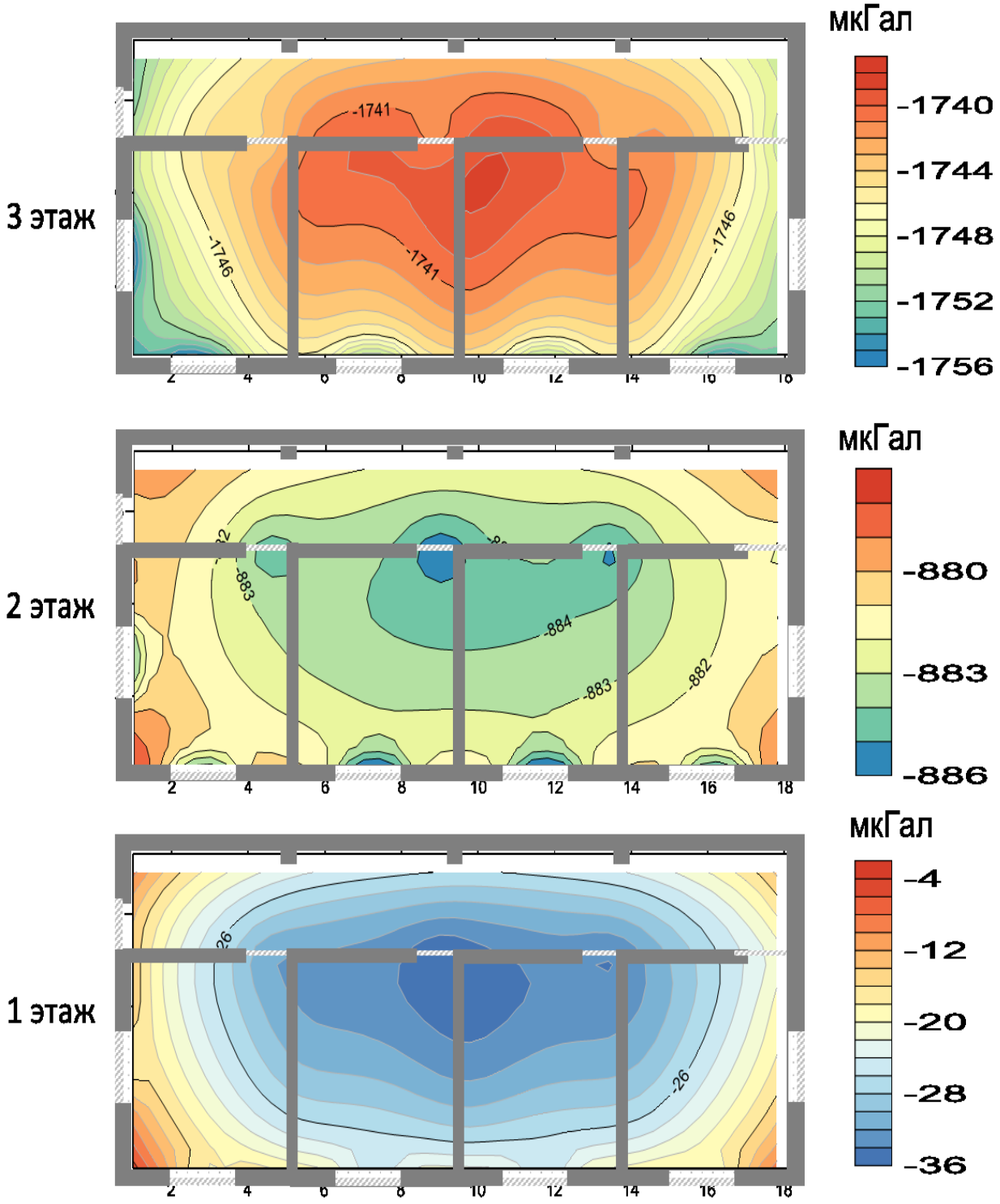


Рисунок 4.7 – Поэтажная карта изменения УСП внутри здания

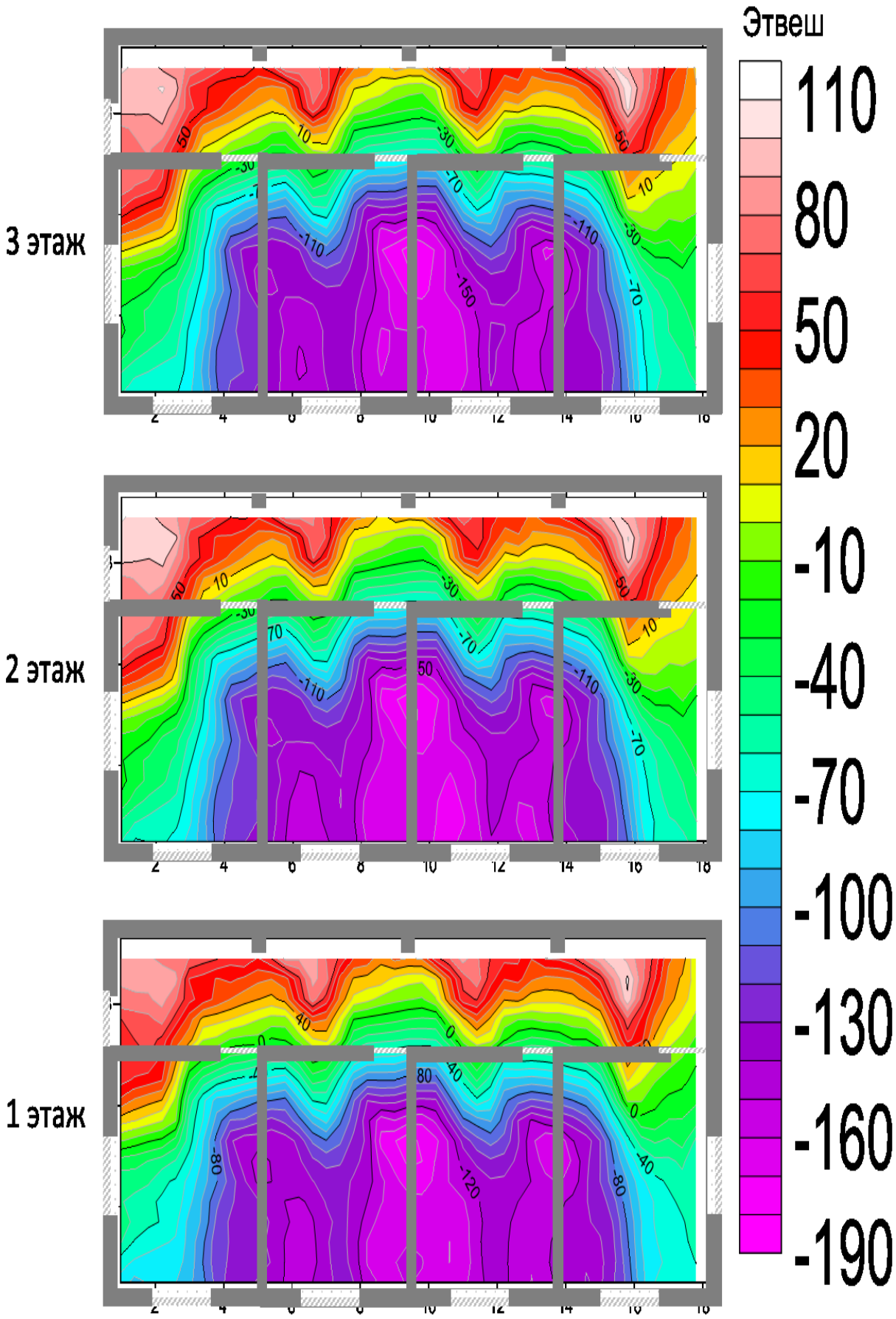


Рисунок 4.8 – Поэтажная карта изменения W_{Δ} внутри здания

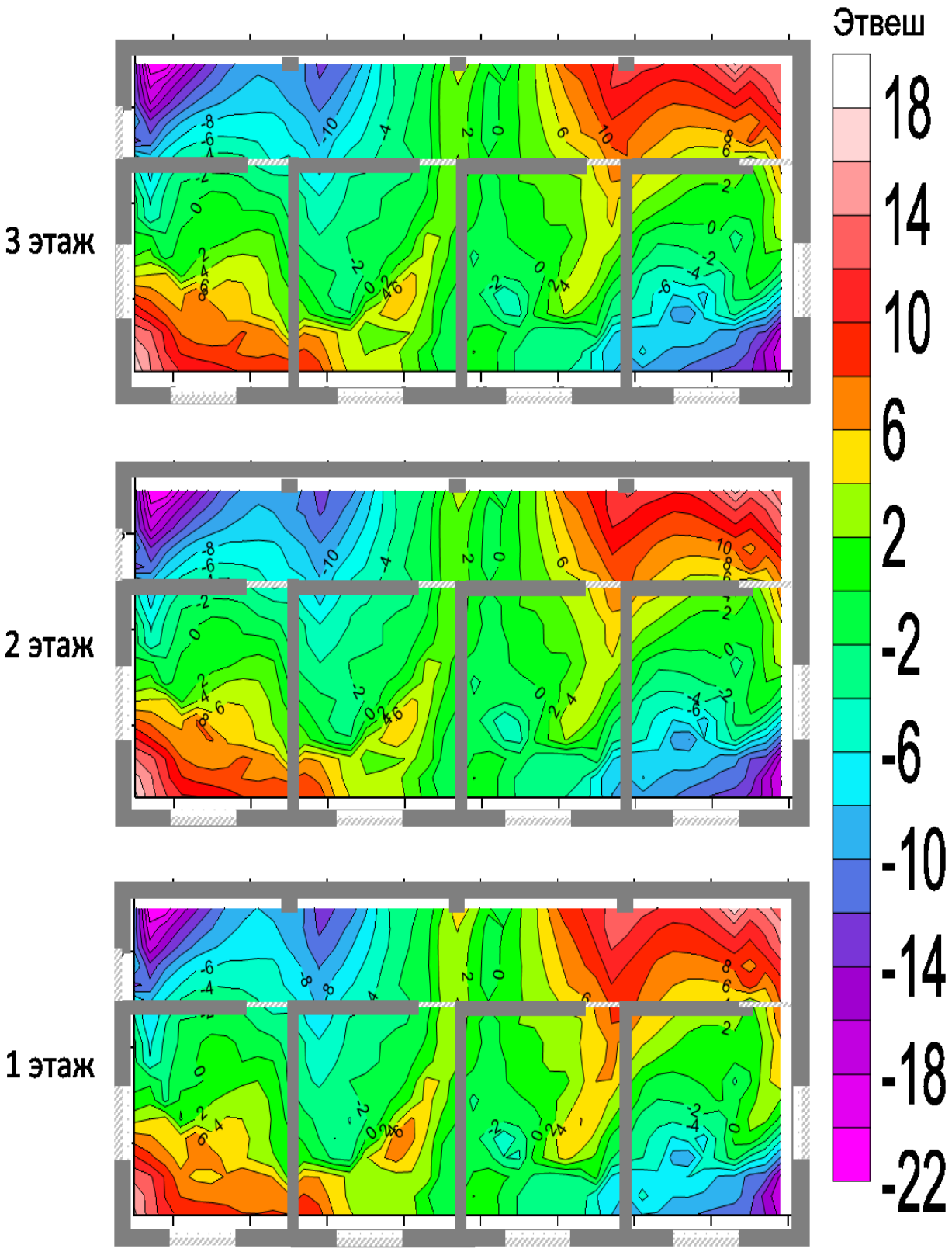


Рисунок 4.9 – Поэтажная карта изменения W_{xy} внутри здания

4.2.2 Оценка особенностей распределения параметров ГП внутри здания

4.2.2.1 Распределение значений УСП в горизонтальной плоскости

Проведенный поэтажный анализ характера изменения значений УСП в горизонтальной плоскости показывает, что на первом этаже значения УСП уменьшаются на величину от -4 до -34 мкГал по мере приближения к геометрическому центру. На втором этаже здания значения УСП уменьшаются на величину от -877 до -886 мкГал по мере приближения к геометрическому центру. В непосредственной близости от дверных проемов наблюдаются локальные минимумы амплитудой до 1-2 мкГал. На третьем этаже здания значения УСП уменьшаются на величину от -1740 до -1756 мкГал по мере приближения к геометрическому центру. В непосредственной близости от дверных проемов наблюдаются локальные минимумы амплитудой до 1-2 мкГал.

4.2.2.2 Распределение значений УСП по вертикали

Результаты моделирования показывают, что гравитационное влияние структурных элементов здания на изменение УСП по вертикали имеет следующие закономерные особенности:

– по мере перемещения в плане по этажам 1 и 2 значения УСП уменьшаются при приближении к геометрическому центру здания, при перемещении в плане по этажу 3 значения УСП увеличиваются при приближении к геометрическому центру здания. Это связано с перераспределением масс структурных элементов здания, сначала находящихся над наблюдателем, затем под ним;

– средний уровень значений УСП для каждого этажа здания уникален, пересечений диапазонов УСП между этажами нет.

4.2.2.3 Распределение значений W_Δ в горизонтальной плоскости

Как и в случае с результатами моделирования, изложенными в разделе

4.1.2, изменения значений W_{Δ} в горизонтальной плоскости коррелируют с вертикальными структурными элементами здания. За счет наличия оконных и дверных проемов в южной и центральной стенах значения W_{Δ} внутри помещений отрицательные. При этом область коридора характеризуется положительными значениями только в непосредственной близости от северной стены.

4.2.2.4 Распределение значений W_{Δ} по вертикали

Как и в случае с результатами моделирования в разделе 4.1.2 изменения значений W_{Δ} по вертикали практически идентичны. Разница значений W_{Δ} между этажами находится в диапазоне ±2 Этвеш.

4.2.2.5 Распределение значений W_{xy} в горизонтальной плоскости

Изменения значений W_{xy} в горизонтальной плоскости находятся в диапазоне от -20 до 20 Этвеш. Зоны, расположенные в левом нижнем и правом верхнем углах стен, характеризуются положительными значениями W_{xy} от 5 до 20 Этвеш. Зоны, расположенные в левом верхнем и правом нижнем углах стен, характеризуются отрицательными значениями W_{xy} от -5 до -20 Этвеш.

4.2.2.6 Распределение значений W_{xy} по вертикали

Как и в случае с результатами моделирования в разделе 4.1.2 изменения значений W_{xy} по вертикали практически идентичны. Разница значений W_{xy} между этажами находится в диапазоне ±2 Этвеш.

4.2.3 Оценка навигационной информативности параметров ГПЗ внутри зданий и помещений

Используя средние характеристики изменчивости параметров ГП внутри зданий, выполним приближенную оценку навигационной информативности параметров ГП выполним в общем виде по формуле чувствительности (3.11).

Для вычислений последовательно используем типовые погрешности гравитационных измерителей. Результаты вычислений представлены в

таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Оценка навигационной информативности параметров ГП 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	**0.03**
50		500		**0.2**
100		1000		**0.4**
200		2000		**0.7**

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	**0.1**	0.1	10
5		**0.5**		50
10		**1**		100
20		**2**		200

Из представленных вычислений можно сделать следующий вывод:

– наилучшей комбинацией измерителей в составе навигационной системы для обеспечения навигации внутри здания будет любой 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_{Δ} и W_{xy}.

4.3 Теоретическая оценка погрешности моделирования

Оценку вклада составляющих погрешности при моделировании параметров ГПЗ внутри здания выполним на примере УСП и составляющей W_{Δ}. Для вычисления бюджета погрешностей используем характеристики вертикальной стены помещения с параметрами, представленными в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Исходные параметры вертикальной стены

Координаты углов в местной системе координат	
Угол параллелепипеда	**Значение, м**
x1	-0.2
x2	0.01
y1	0
y2	10
z1	3
z2	0.01
Плотность параллелепипеда	**Значение, кг/м^3**
δ	2300
Погрешность определения параметров	**Значение**
σX	0.001, м
σY	0.001, м
σZ	0.001, м
σp	50, кг/м^3
σR	0.002, м

Оценку вклада составляющих погрешности при вычислении значений УСП выполним по формуле (2.13). Результат вычислений представлен в таблице 4.3.

Таблица 4.3 - Бюджет погрешностей при определении значений УСП

Расстояние **R** до объекта моделирования, м	Вклад составляющих в бюджет погрешности					Погрешность моделирования УСП, мкГал
	σXi, мкГал	σYi, мкГал	σZi, мкГал	σδ, мкГал	σR, мкГал	
0.1	23.01	0.92	1.53	100.05	-159.43	189.63
0.15	10.23	0.41	0.68	44.47	-47.24	65.68
0.2	5.75	0.23	0.38	25.01	-19.93	32.50
0.25	3.68	0.15	0.25	16.01	-10.20	19.34
0.3	2.56	0.10	0.17	11.12	-5.90	12.85
0.35	1.88	0.08	0.13	8.17	-3.72	9.17
0.4	1.44	0.06	0.10	6.25	-2.49	6.88
0.45	1.14	0.05	0.08	4.94	-1.75	5.36
0.5	0.92	0.04	0.06	4.00	-1.28	4.30
0.55	0.76	0.03	0.05	3.31	-0.96	3.53
0.6	0.64	0.03	0.04	2.78	-0.74	2.95
0.65	0.54	0.02	0.04	2.37	-0.58	2.50
0.7	0.47	0.02	0.03	2.04	-0.46	2.15
0.75	0.41	0.02	0.03	1.78	-0.38	1.86
0.8	0.36	0.01	0.02	1.56	-0.31	1.63
0.85	0.32	0.01	0.02	1.38	-0.26	1.44
0.9	0.28	0.01	0.02	1.24	-0.22	1.29
0.95	0.25	0.01	0.02	1.11	-0.19	1.15
1	0.23	0.01	0.02	1.00	-0.16	1.04
1.05	0.21	0.01	0.01	0.91	-0.14	0.94

Оценка влияния каждой из составляющих на общую погрешность вычисления значений УСП показывает, что погрешность значения расстояния ***R*** и плотности ***δ*** являются превалирующими. При этом в ближней зоне больший вклад вносят погрешности определения расстояния, а при удалении на 0,2 м максимальное влияние оказывает плотность. На расстоянии 1 м от стен помещения погрешность модельных значений УСП составляет менее 1 мкГал.

Оценку вклада составляющих погрешности при вычислении значений W_{Δ} выполним по формулам (3.9), (3.6). Значения W_{xx} вычислялись на оси OX, проходящей через геометрический центр параллелепипеда. В таблице 4.4 представлен вклад каждого элемента формулы и общая погрешность вычисления составляющей W_{xx}. Погрешность определения W_{Δ} вычислялась умножением на √2, график изменения погрешности представлен на рисунке 4.10.

Таблица 4.4 – Бюджет погрешностей при определении составляющей W_{xx}

Расстояние R до объекта моделирования, м	Вклад составляющих в бюджет погрешности						Погрешность моделирования W_{Δ}, Этвеш
	σXi, Этвеш	σYi, Этвеш	σZi, Этвеш	σR, Этвеш	σX, Этвеш	σδ, Этвеш	
0.1	-0.67	0.01	0.02	-0.04	-0.35	4.36	4.46
0.2	-0.53	0.01	0.03	-0.05	-0.22	4.09	4.16
0.3	-0.41	0.01	0.03	-0.05	-0.15	3.83	3.88
0.4	-0.33	0.01	0.04	-0.05	-0.11	3.59	3.62
0.5	-0.26	0.01	0.04	-0.05	-0.09	3.36	3.39
0.6	-0.21	0.01	0.05	-0.05	-0.07	3.16	3.17
0.7	-0.18	0.01	0.05	-0.04	-0.05	2.96	2.98
0.8	-0.15	0.01	0.05	-0.04	-0.04	2.79	2.80
0.9	-0.12	0.02	0.05	-0.04	-0.03	2.63	2.63
1	-0.11	0.02	0.05	-0.03	-0.03	2.48	2.48
1.1	-0.09	0.02	0.05	-0.03	-0.02	2.34	2.35
…	…	…	…	…	…	…	…
1.9	-0.04	0.01	0.04	-0.02	0.00	1.57	1.57
2	-0.03	0.01	0.04	-0.02	0.01	1.50	1.51
2.1	-0.03	0.01	0.04	-0.02	0.01	1.44	1.44
…	…	…	…	…	…	…	…
2.9	-0.02	0.01	0.03	-0.01	0.02	1.06	1.06
3	-0.02	0.01	0.03	-0.01	0.02	1.02	1.02

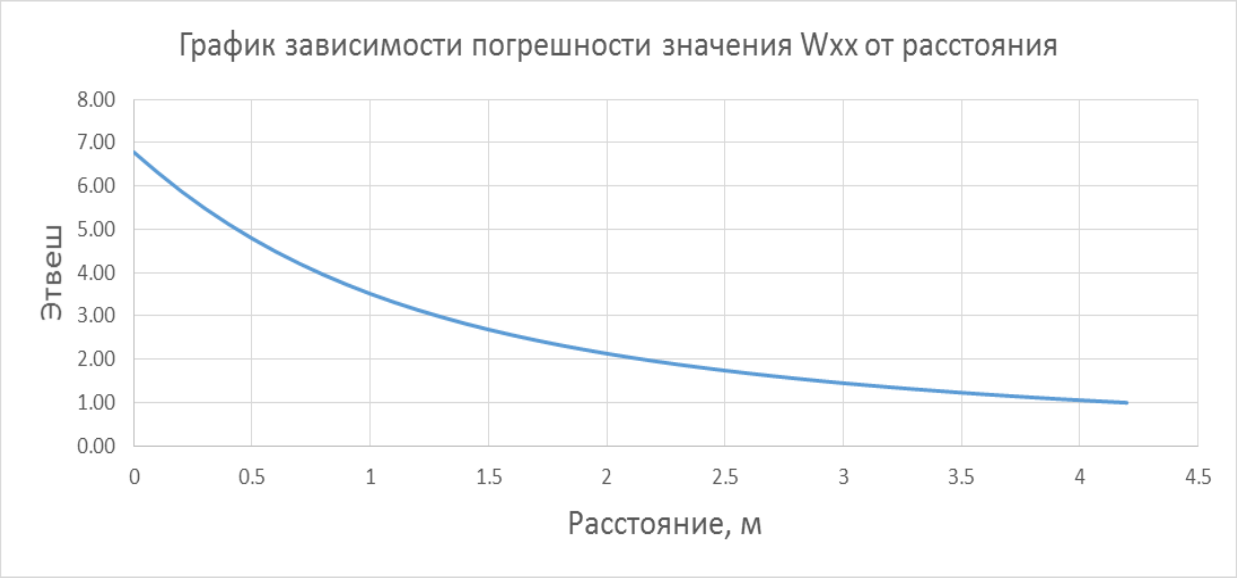


Рисунок 4.10 – График зависимости погрешности определения W_{Δ} от расстояния до стены

Оценка влияния каждой из составляющих на общую погрешность вычисления значений гравитационных градиентов показывает, что погрешность значения расстояния и плотности являются превалирующими. При этом в ближней зоне больший вклад вносят погрешности определения расстояния, а при удалении на 0,2 м максимальное влияние оказывает плотность. Тем не менее, на расстоянии 1 м от стен помещения погрешность модельных значений гравитационных градиентов менее 2,5 Этвеш.

4.4 Карты пространственного распределения значений параметров ГП внутри помещения на основе реальных измерений

Вышеуказанный метод подготовки навигационных гравитационных карт внутри закрытых помещений применим только в случае знания детальной информации об объекте моделирования: геометрических размеров всех элементов помещений, значений плотности материалов конструктивных элементов и т.д. В случае, если такая информация недоступна, единственной возможностью создания навигационных гравитационных карт ГП является метод на основе реальных измерений при помощи гравиметров и градиентометров.

Опробование метода было выполнено в начале 2017 года [111, 112] в

объеме одного из помещений корпуса 28 ФГУП «ВНИИФТРИ» с использованием ВОГ и вариометра Е-60. Измерения ВОГ CG-5 Autograv выполнялись на трех уровнях над постаментом и вокруг него (рисунок 4.11). Расстояние между пунктами измерений составило 0,3 м в плане и 0,5 м по высоте.

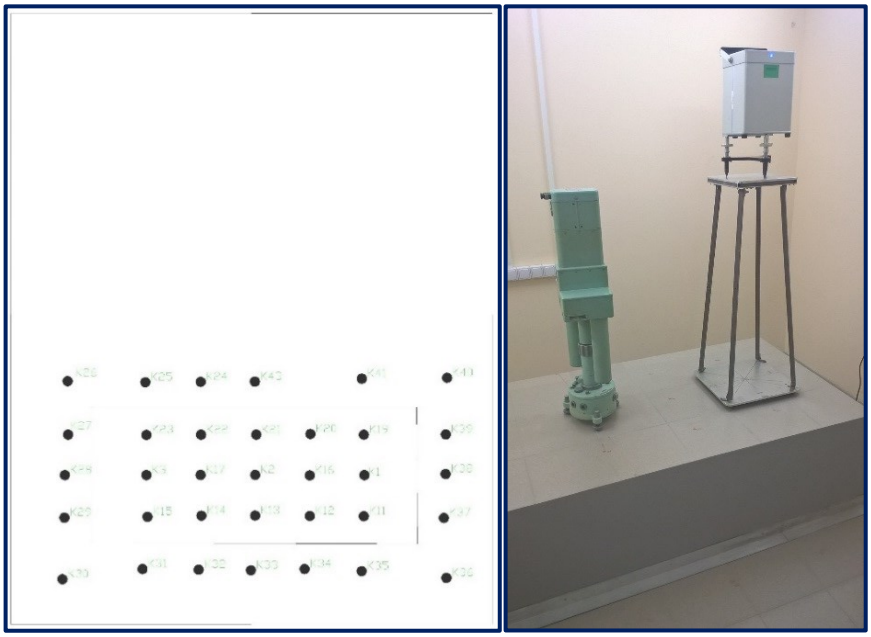
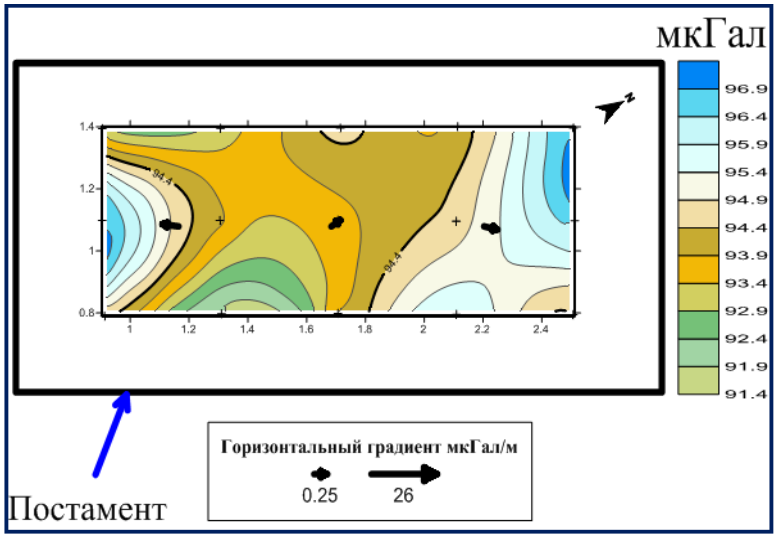


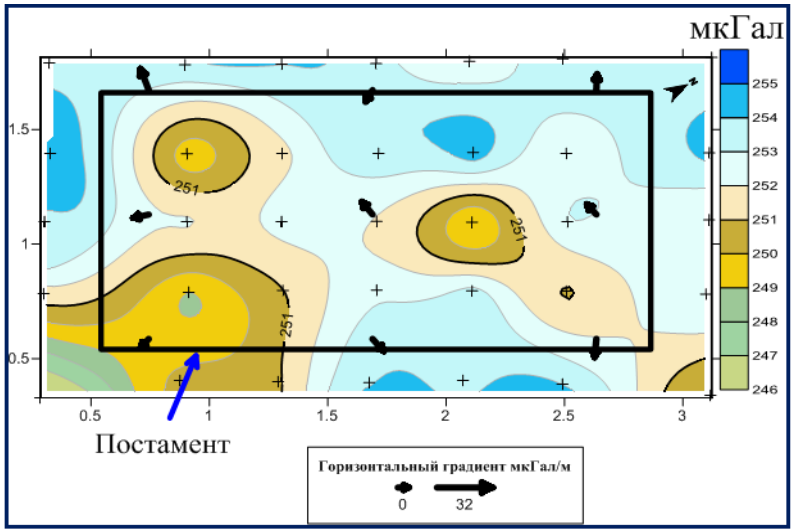
Рисунок 4.11 - Схема пунктов наблюдения ВОГ Scintrex CG-5 в помещении №013.

По результатам измерений созданы навигационные гравитационные карты УСП на трех уровнях, вычислено значение вертикальных градиентов W_{zz} , (рисунок 4.12). Погрешность измерений УСП составила не более 1 мкГал, вертикальных градиентов не более 10 Этвеш.

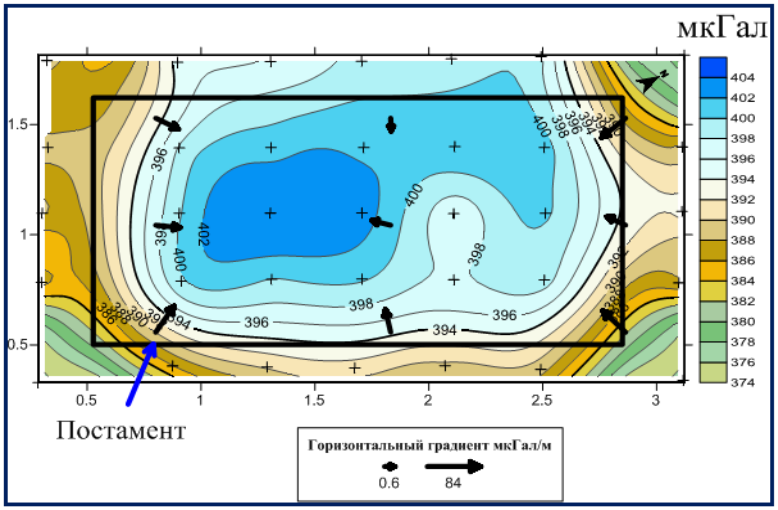
Измерения вариометром Е-60 выполнялись напротив углов постамента, перед постаментом и в его геометрическом центре (рисунок 4.13). Погрешность измерений горизонтальных градиентов составила 4 Этвеш.



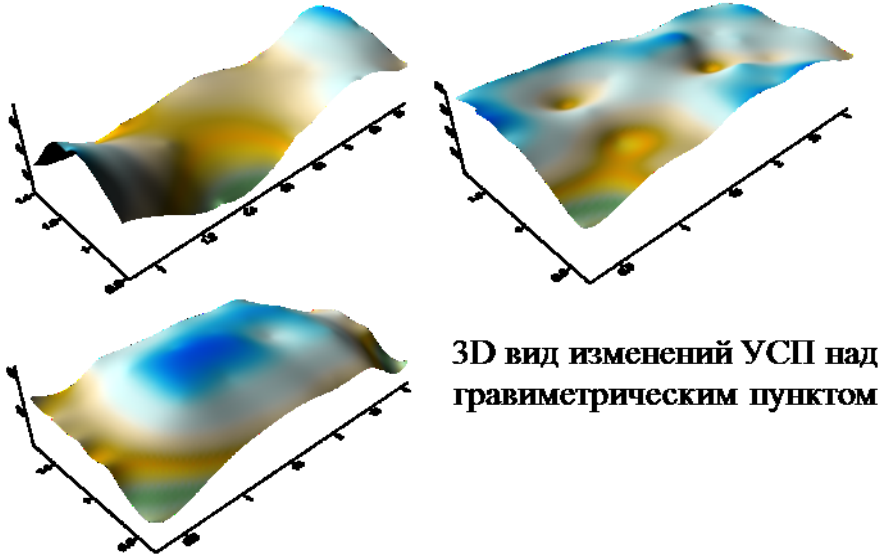
Изменения УСП на уровне 1.4 м над стендом



Изменения УСП на уровне 0,9 м над стендом



Изменения УСП на уровне 0,4 м над стендом



3D вид изменений УСП над гравиметрическим пунктом

Рисунок 4.12 – Навигационные гравитационные карты УСП над стендом в помещении №013

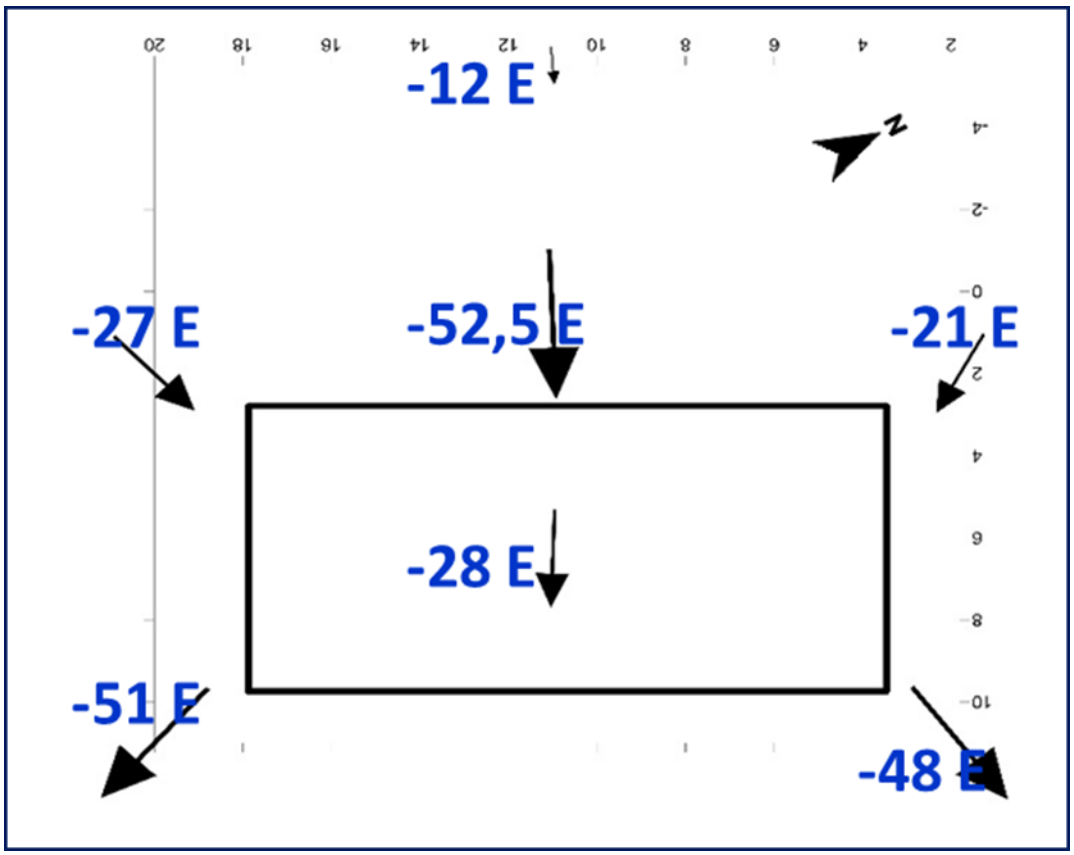
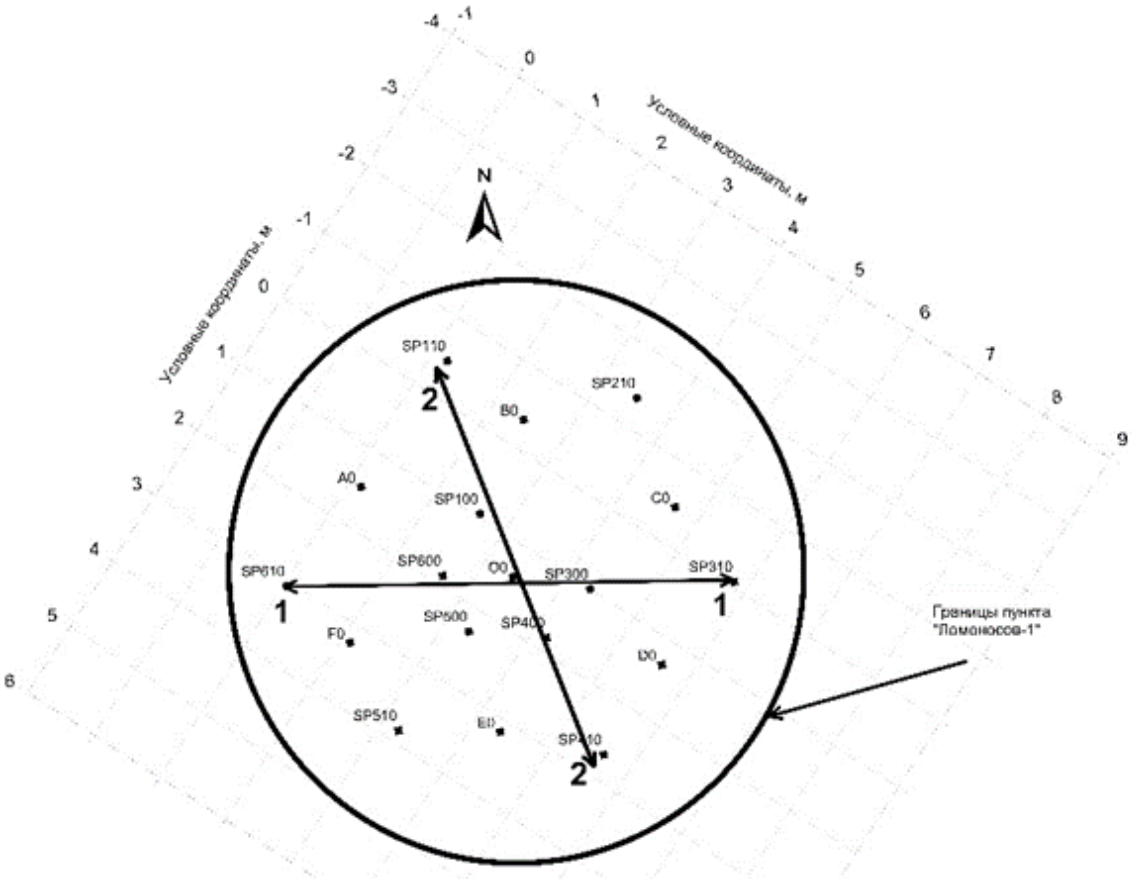
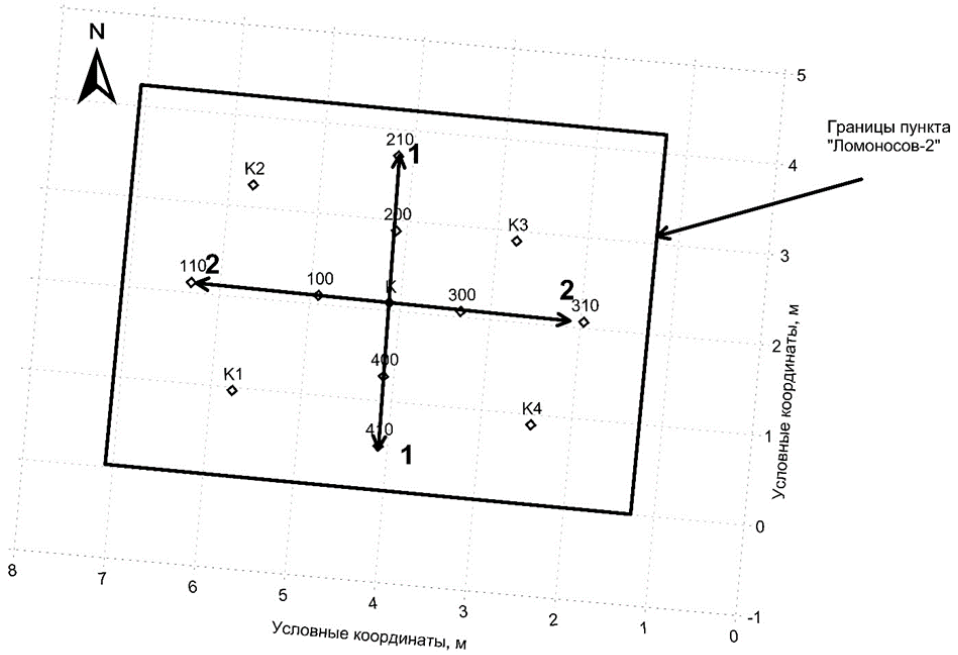


Рисунок 4.13 - Схема постамента. Величина составляющей градиента W_{Δ} над постаментом.

Другим примером отработки метода реальных измерений являются работы, выполненные в 2019 году в помещениях стендов гравиметрических «Ломоносов-1» и «Ломоносов-2» из состава Государственного первичного специального эталона единицы ускорения в области гравиметрии ГЭТ 190-2011 (рисунок 4.14). Расстояние между пунктами измерений в плане составило 1 м, по высоте – 0,5 м. На рисунках 4.15 и 4.16 представлены карты распределения УСП над стендами гравиметрическими для помещений «Ломоносов-1» и «Ломоносов-2». В таблице 4.5 представлены результаты оценки погрешностей измерений УСП и вертикальных градиентов. Достигнутые погрешности измерений УСП составили менее 0,6 мкГал, вертикальных градиентов – менее 7 Этвеш.



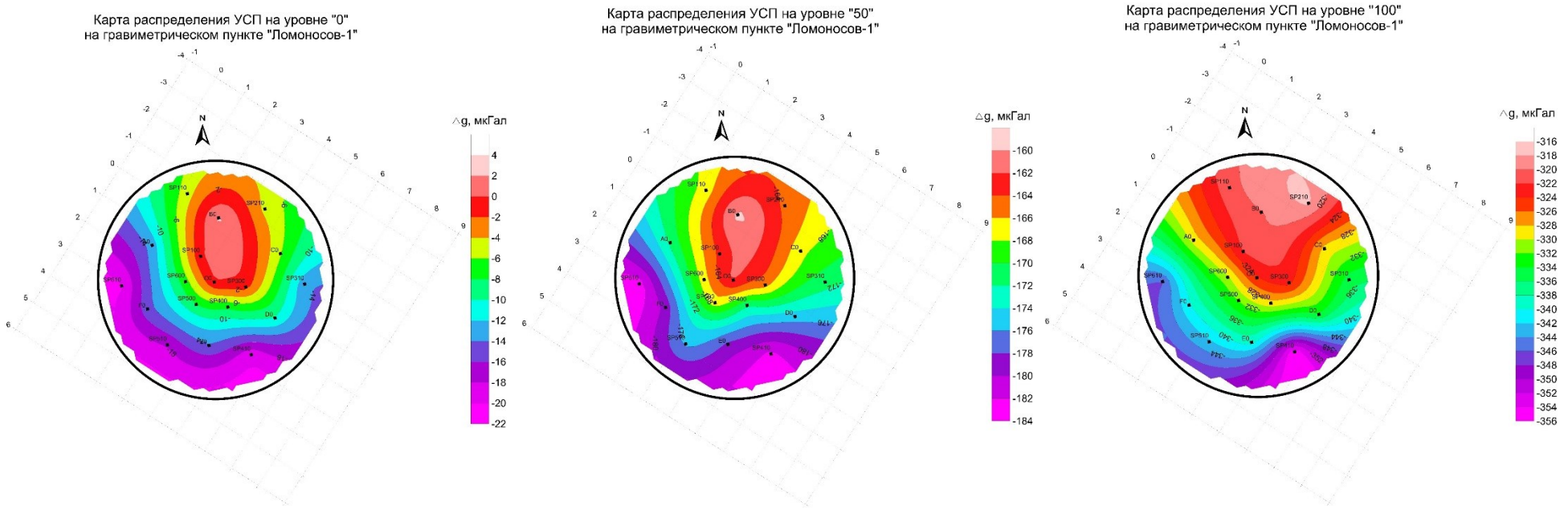
а)



б)

а) – измерительная схема в помещении «Ломоносов-1»; б) – измерительная схема в помещении «Ломоносов-2»;

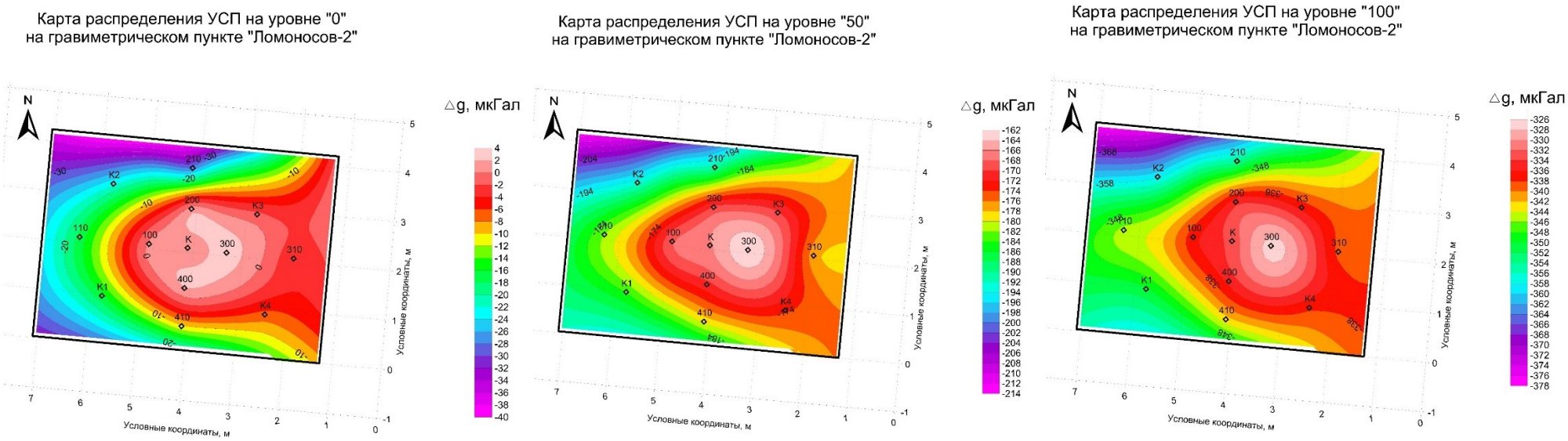
Рисунок 4.14 – Схема расположения пунктов измерений



а) б) в)

а) карта УСП на высоте 0,4 м над стендом; б) – карта УСП на высоте 0,9 м над стендом; в) – карта УСП на высоте 1,4 м над стендом

Рисунок 4.15 – Карты распределения УСП над гравиметрическим стендом «Ломоносов-1»



а) б) в)

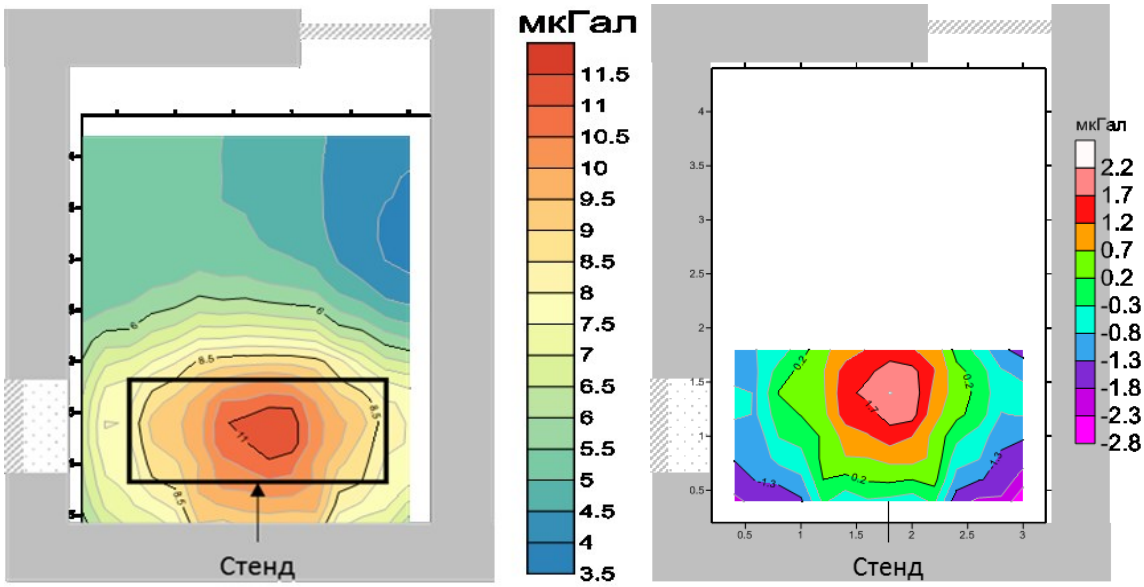
а) карта УСП на высоте 0,4 м над стендом; б) – карта УСП на высоте 0,9 м над стендом; в) – карта УСП на высоте 1,4 м над стендом

Рисунок 4.16 – Карты распределения УСП над гравиметрическим стендом «Ломоносов-2»

Таблица 4.5. Оценка погрешности измерений

Имя станции	Среднее значение УСП, мГал	Время	Погрешность определения среднего значения УСП, мкГал	Гравиметрический эквивалент погрешности измерения высоты гравиметра, мГал	Погрешность измерения верт. градиента УСП "0-50" Этвеш	Погрешность измерения верт. градиента УСП "50-100" Этвеш	Погрешность измерения верт. градиента УСП "0-100", Этвеш
O0	6928.718	6:25:59	0,4	0,2	6	7	6
O1	6928.554	6:44:29	0,6	0,2			
O2	6928.388	7:01:32	0,3	0,2			
A0	6928.691	8:13:10	0,2	0,2	5	5	5
A1	6928.529	8:31:06	0,3	0,2			
A2	6928.368	8:49:34	0,3	0,2			
B0	6928.654	13:13:54	0,6	0,2	7	5	7
B1	6928.489	13:30:14	0,3	0,2			
B2	6928.326	13:47:20	0,3	0,2			
C0	6928.683	9:16:45	0,3	0,2	5	5	5
C1	6928.513	10:06:42	0,3	0,2			
C2	6928.348	10:23:49	0,3	0,2			
D0	6928.631	14:04:33	0,4	0,2	6	5	6
D1	6928.462	14:20:56	0,3	0,2			
D2	6928.301	14:37:50	0,4	0,2			
E0	6928.621	14:54:54	0,5	0,2	6	5	7
E1	6928.454	15:11:33	0,2	0,2			
E2	6928.291	15:29:17	0,3	0,2			
F0	6928.698	7:21:00	0,5	0,2	6	5	7
F1	6928.531	7:38:27	0,3	0,2			
F2	6928.366	7:56:24	0,3	0,2			

Используем результаты измерений УСП и составляющей W_{Δ} для оценки погрешности моделирования, выполненного в разделе 4.2.1. Для этого дополним условия моделирования, указанные в 4.1, расположив в помещении бетонный стенд с размерами 3x1x0,5 м, тем самым приблизив условия моделирования к конструкции исследуемого помещения (рисунок 4.17а). На рисунке 4.17б представлена карта разности между измеренными и смоделированными значениями УСП. Для оценки погрешности смоделированных значений УСП будем считать измеренные значения эталонными, полученными с погрешностью 1 мкГал, поэтому СКО разности будет оценкой погрешности модельных значений УСП. Вычисления показали, что СКО разности составило 1,5 мкГал.



а) б)

а) - смоделированные значения УСП, б) – реально измеренные значения УСП

Рисунок 4.17 – Оценка погрешности моделирования УСП над стендом

Оценку погрешности моделирования составляющей гравитационного градиента W_{Δ} выполним на примере результатов измерений Е-60 в исследуемом помещении. Результаты вычислений представлены в таблице 4.6, СКО разности составило 8 Этвеш, что больше величины, полученной при обосновании теоретической погрешности метода (раздел 4.3). Это подтверждает ранее сделанный вывод о том, что моделирование применимо лишь для закрытых помещений простой конструкции.

Таблица 4.6 Оценка погрешности вычислений W_{Δ}

№ п/п	W_{Δ}, Измеренный, Е	W_{Δ}, Вычисленный, Е
1	-52,5	-45
2	-12	-10
3	-48	-40
4	-51	-45
5	-27	-35
6	-21	-31
СКО разности, Е		**8**

4.5 Метод калибровки гравитационных градиентометров

Рассмотренный выше метод можно применять для создания карты калибровочных значений гравитационных градиентов в помещениях, предназначенных для юстировки и калибровки градиентометров. Для этого необходимо в помещении задать локальную систему координат, оси которой направлены вдоль стен помещения. Выполнить вычисление составляющих $W_{\Delta_выч}$ и $W_{ху_выч}$, определить области внутри помещения с максимальными изменениями $W_{\Delta_выч}$ и $W_{ху_выч}$, наметить точки установки калибруемого градиентометра. Принять погрешность значений $W_{\Delta_выч}$ и $W_{ху_выч}$ равной 8 Этвеш. Перемещением калибруемого градиентометра между точками выполнить калибровку градиентометра.

Преимуществом метода является доступность применения и отсутствие необходимости в изготовлении дорогостоящих калибровочных стендов.

Недостатком метода является высокая погрешность калибровки.

Метод применим для оперативной калибровки градиентометров на стадии разработки и изготовления.

4.6 Выводы по главе 4

1) Впервые разработана навигационная гравитационная карта УСП для

навигации внутри простых помещений на основе метода моделирования гравитационного поля. Теоретическая погрешность метода при вычислениях значений УСП составляет менее 1 мкГал для точек пространства, удаленных на расстояние более 1 м от стен и пола помещений.

2) Экспериментально подтверждена погрешность метода при вычислении значений УСП на расстоянии 0,3 м над стендом гравиметрическим.

3) Впервые разработана навигационная гравитационная карта гравитационных градиентов для навигации внутри простых помещений на основе метода моделирования гравитационного поля. Теоретическая погрешность метода при вычислении значений гравитационных градиентов W_{Δ} и W_{xy} составляет менее 2,5 Этвеш для точек пространства, удаленных на расстояние более 1 м от стен помещений.

4) Выполнена экспериментальная оценка погрешности метода при вычислении значений W_{Δ} вокруг стенда гравиметрического. Погрешность составила 8 Этвеш.

5) Впервые предложен метод создания калибровочного объема по значениям гравитационных градиентов для юстировки и калибровки создаваемых гравитационных градиентометров. Метод исключает необходимость в изготовлении дорогостоящих калибровочных масс, как это традиционно делалось ранее.

6) Для осуществления навигации внутри зданий навигационная система потребителя должна состоять из гравиметра (погрешность измерений не более 200 мкГал для определения этажа здания), градиентометра (погрешность измерений не более 20 Этвеш для плановой привязки по этажу здания) и магнитометра (для поддержания ориентировки Север-Юг, чтобы по характеру изменения гравитационных градиентов от – к + или наоборот определить к какому углу/стене приближается потребитель).

Таким образом, современные методы и средства подготовки навигационных гравитационных карт для решения задачи навигации по ГПЗ

внутри помещений обеспечивают следующие характеристики: по погрешности УСП – менее 1 мкГал, по погрешности гравитационных градиентов W_{Δ} и W_{xy} – менее 8 Этвеш.; по пространственной детальности менее 1 м. Эти характеристики обеспечивают СКО определения координат не более 2 м в плане и не более 1 м по высоте.

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

Современное развитие автономных средств навигации требует совершенствования методов оперативной подготовки навигационных гравитационных карт параметров ГПЗ. Как было показано в главе 1, к настоящему моменту времени единые требования к комплексам подготовки навигационных гравитационных карт не сформированы. Такие комплексы должны решать не только непосредственно задачу по выполнению гравиметрических измерений для подготовки навигационных гравитационных карт на маршруте передвижения, но также и координатную привязку результатов измерений, первичную обработку результатов измерений и создание навигационных гравитационных карт требуемого параметра (слоя).

Сформулируем перечень требований к комплексу подготовки навигационных гравитационных карт на основании личного опыта автора [113] и результатов последних международных экспериментов [114].

5.1 Назначение и состав комплекса подготовки навигационных гравитационных карт

Комплекс подготовки навигационных гравитационных карт (КНГК) должен обеспечивать решение следующих основных задач:

– 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 (БАРМ);

– подготовка навигационных гравитационных карт с помощью стационарного автоматизированного рабочего места.

Кроме того, на данный комплекс возлагаются следующие частные задачи:

– контроль стабильности параметров ГПЗ во времени;

– 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 навигационно-гравиметрической карты.

5.2 Предлагаемый состав средств измерений наземного КНГК

В соответствии с решаемыми задачами в состав комплекса подготовки навигационных гравитационных карт предлагается включить (рисунок 5.1):

1) перебазируемый комплекс гравитационных измерителей;

2) стационарный комплекс контроля стабильности параметров ГПЗ во времени.

В состав перебазируемого автомобильного комплекса гравитационных измерителей КНГК необходимо включить:

1) шасси автомобильного типа с бортовой электрической сетью и рабочими местами операторов;

2) горизонтальный гравитационный градиентометр типа Е-60 для измерения составляющих W_{Δ} и W_{xy} с погрешностью измерений не более 4 Этвеш;

3) высокоточный относительный гравиметр типа CG-6 Autorav для измерения профиля УСП с погрешностью измерений не более 5 мкГал;

4) астрогеодезический измеритель уклонения отвесной линии (УОЛ) для измерения составляющих УОЛ с погрешностью не более 0,3";

5) бортовое автоматизированное рабочее место (БАРМ) предварительной обработки первичной измерительной информации и формирования баз данных измерений;

6) комплекс координатной привязки на основе навигационных приемников типа ГЛОНАСС/GPS/GALILEO, включающий:

– геодезические средства опорной базовой станции;

– геодезические средства мобильного комплекта;

– геодезические средства общего назначения;

– источник вторичного электропитания;

– тахеометр для геодезической привязки результатов гравитационных измерений.

Рисунок 5.1 – Структура КНГК

В составе стационарного наземного комплекса контроля стабильности параметров ГПЗ во времени необходимо иметь:

1) автоматизированное рабочее место со специальным программным обеспечением для обработки первичной измерительной гравитационной информации и формирования гравитационных навигационных карт;

2) высокоточный криогенный гравиметр, как ключевое средство измерений вариаций УСП с погрешностью измерений не более 0,1 мкГал;

3) высокоточный абсолютный баллистический гравиметр с погрешностью не более 10 мкГал, как средство контроля стабильности измерений криогенного гравиметра во времени;

4) цифровую метеостанцию, как средство регистрации вариаций атмосферного давления и количества выпавших осадков;

5) систему гидрологических скважин в количестве не менее 3 шт. с погрешностью измерений уровня грунтовых вод не более 1 см, как средство контроля уровня грунтовых вод;

6) сейсмическую станцию с диапазоном частот регистрируемого сигнала от 1 до 400 Гц для контроля сейсмической обстановки в районе применения КНГК.

На рисунке 5.2 представлена структурная схема КНГК:

Рисунок 5.2 – Структурная схема КНК

5.3 Экспериментальное опробование прототипа КНГК

В ходе выполнения инициативной НИР «Гравиградиентометр» был создан прототип КГКН на базе автомобильного шасси FIAT Ducato. В состав

КНГК были включены:

– абсолютный баллистический гравиметр FG-L (погрешность измерений 10 мкГал);

– высокоточный относительный гравиметр CG-5 Autograv (погрешность измерений 5 мкГал);

– макет астроизмерителя УОЛ (погрешность измерений 0,3");

– комплекс координатной привязки Javad Sigma;

– тахеометр Leica TS06Plus;

– БАРМ;

– макет автоматизированного рабочего места со специализированным программным обеспечением;

– метеостанция Vaisala W535.

Экспериментальное опробование прототипа КНГК выполнялось в летний период 2018 г [115]. Для этого в районе г. Зеленоград были выбраны места размещения 17 пунктов гравиметрического полигона (рисунок 5.3).

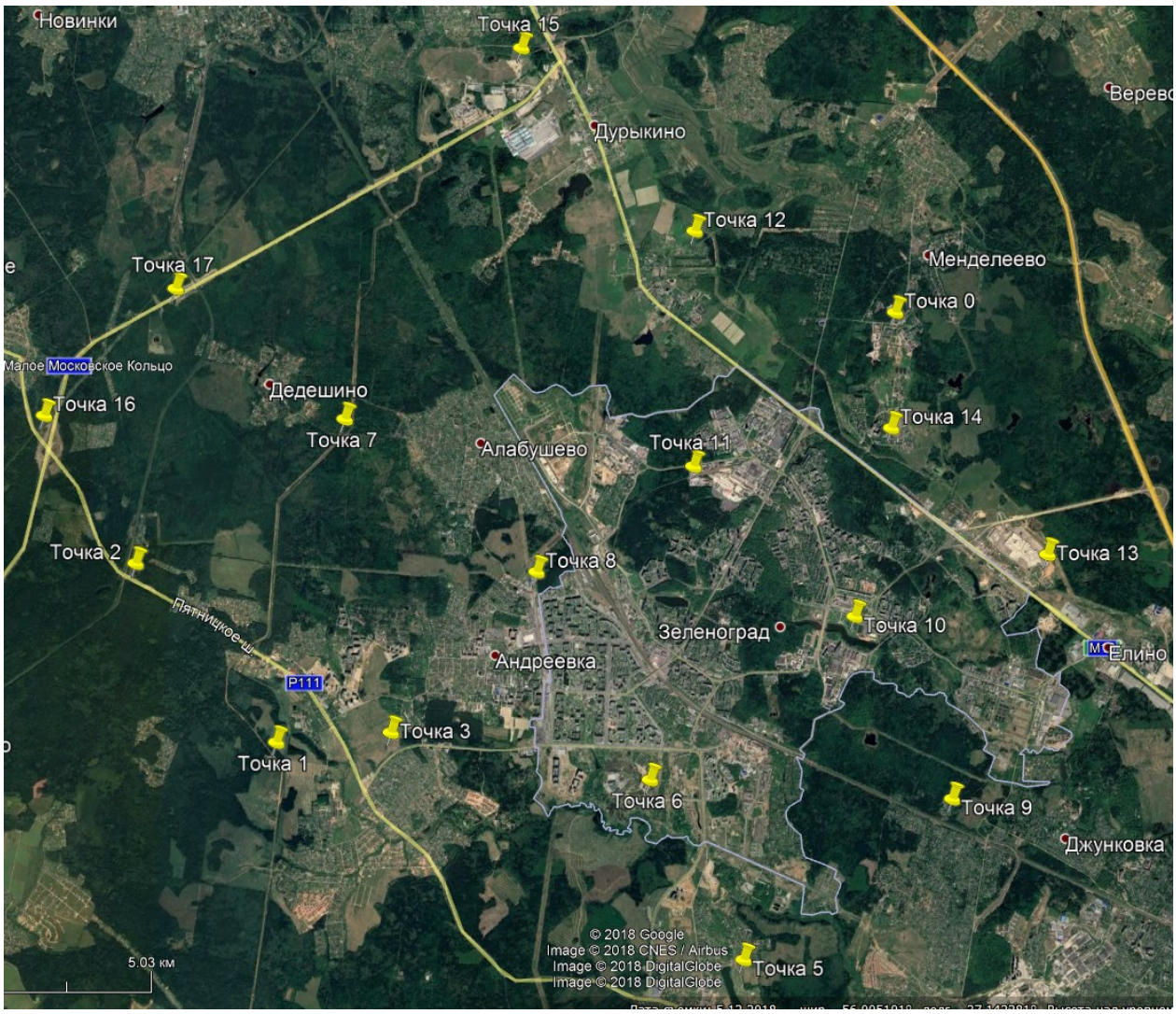


Рисунок 5.3 – Схема размещения пунктов гравиметрического полигона

5.3.1 Особенности методики полигонных измерений параметров ГПЗ с помощью КНГК, как основы для создания навигационной гравитационной карты

5.3.1.1 Методическое обеспечение гравиметрических работ

Измерение УСП на пунктах гравиметрических выполнялись дифференциальным методом измерения с использованием исходного значения УСП на опорном пункте гравиметрическом.

При выполнении работ руководствовались следующими нормативно – техническими документами:

– методика измерений ускорения свободного падения с использованием гравиметра CG-5 Autograv, свидетельство об аттестации №284-RA.RU.311243-2016;

– инструкция по развитию высокоточной государственной гравиметрической сети России. ГКИНП(ГНТА)-04-122-03. -М., ЦНИИГАиК, 2004;

– инструкция о порядке контроля и приемки геодезических, топографических и картографических работ (ГКИНП 17-004-99) /ЦНИИГАиК -М.,1999;

– ГОСТ 32453-2013 Глобальная навигационная спутниковая система. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек.

– Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.11). Справочный документ /ВТУ ГШ -М., 2014. - 52 с.

– гравиметр CG-5 Autograv. Руководство по эксплуатации;

– абсолютный баллистический гравиметр FG-L. Руководство пользователя.

5.3.1.2 Особенности методики измерений для создания слоя карты УСП

Измерения УСП на гравиметрических пунктах выполнялись по одноступенчатой системе, согласно «Методики измерений ускорения свободного падения с использованием гравиметра CG-5 Autograv»:

$$g_{ряд} = g_{оп} + \Delta g_{ряд},$$

где $g_{оп}$ - значение УСП на гравиметрическом пункте опорном, $g_{ряд}$ - значение УСП на гравиметрическом пункте рядовом, $\Delta g_{ряд}$ - измеренное значение разности УСП между гравиметрическим пунктом опорным и гравиметрическим пунктом рядовым.

В качестве исходного пункта с известным значением УСП был взят опорный пункт гравиметрический №004. В качестве гравиметрических пунктов рядовых были приняты 17 пунктов основных и 34 вспомогательных пункта.

Измерения разности УСП между гравиметрическим пунктом опорным и гравиметрическими пунктами рядовыми выполнялись в период времени с 20 по 24 августа 2018 г.

Значение УСП на опорном пункте гравиметрическом №004 получено по результатам прямых измерений АБГ FG-L.

При определении УСП на пунктах гравиметрических рядовых использовался высокоточный относительный гравиметр типа CG-5 AutoGrav № 438 утвержденного типа с действенными свидетельствами о поверке.

Определение параметров гравиметрической съемки устанавливалось в камеральных условиях непосредственно при подготовке к полевым измерениям. Основными параметрами являются время измерений и время осреднения отсчета. При выполнении измерений на гравиметрических пунктах время измерений составляло от 30 до 40 минут с тридцатисекундным периодом осреднения отсчетов. Для проведения полевых измерений на гравиметрическом пункте гравиметр устанавливается на штатив, поставляемый в комплекте, выставляется вертикальность гравиметра и включается запись измерений. На рисунке 5.4 представлен пример выполнения измерений на пункте гравиметрического полигона.

Рисунок 5.4 – Измерение параметров ГПЗ на пункте гравиметрического полигона

На рисунке 5.5 представлен результат измерений в виде слоя карты УСП на пунктах гравиметрического полигона.

5.3.1.3 Особенности методики измерений для создания слоя карты горизонтальных градиентов W_{zx}, W_{zy} и азимута направления на аномалию

Типовой методики измерений градиентов W_{zx}, W_{zy} и W_{zz} не разработано. Градиенты W_{zx}, W_{zy} и W_{zz} вычисляются по результатам измерений разности УСП в выбранных точках маршрута при помощи относительного гравиметра CG-5 Autograv.

Типовая последовательность действий на каждом гравиметрическом пункте для измерений градиентов W_{zx}, W_{zy} и W_{zz}:

– выполнить определение направлений «С – Ю» и «З – В» относительно гравиметрического пункта;

– определить места расположения вспомогательных гравиметрических пунктов по выделенным направлениям для измерения градиентов W_{zx} и W_{zy};

– вспомогательные гравиметрические пункты должны располагаться на удалении не менее 20 м от гравиметрического пункта;

– установить гравиметр CG-5 Autograv на гравиметрический пункт и выполнить гравиметрические измерения;

– установить электронный тахеометр Leica TS06plus между гравиметрическим пунктом и вспомогательными пунктами;

– при помощи тахеометра Leica TS06plus выполнить измерения в условном уровне координат гравиметра, используя пленочный отражатель, наклеенный на стенку гравиметра;

– переместить гравиметр на первый вспомогательный гравиметрический пункт и выполнить гравиметрические измерения;

– при помощи тахеометра Leica TS06plus выполнить измерения координат гравиметра на первом вспомогательном гравиметрическом пункте;

– переместить гравиметр на второй вспомогательный гравиметрический пункт и выполнить гравиметрические измерения;

– при помощи тахеометра Leica TS06plus выполнить измерения координат гравиметра на втором вспомогательном гравиметрическом пункте;

– установить штатив геодезический над гравиметрическим пунктом, высота центрира штатива должна быть на 1 м выше основания штатива гравиметра CG-5 Autograv;

– переместить гравиметр на штатив геодезический, зафиксировать центриром и выполнить гравиметрические измерения;

– при помощи тахеометра Leica TS06plus выполнить измерения координат гравиметра на штативе геодезическом;

– завершить выполнение измерений гравиметром и тахеометром;

– перевести измерители в транспортировочное положение.

Вычисление градиентов УСП W_{zx}, W_{zy} и W_{zz} выполняется по формулам:

$$W_{zx} = \frac{\Delta g_2 + 0.3086 \cdot \Delta h_{2-1} - \Delta g_1}{l_x},$$
$$W_{zy} = \frac{\Delta g_3 + 0.3086 \cdot \Delta h_{3-1} - \Delta g_1}{l_y}, , \quad (5.1)$$
$$W_{zz} = \frac{\Delta g}{\Delta h}$$

где Δg_1, Δg_2, Δg_3 - значения УСП на пункте центральном, вспомогательным в широтной плоскости и в плоскости меридиана, Δh_{2-1}, Δh_{3-1} - разность значений высот между вспомогательными и центральным пунктом, l_x, l_y - расстояние между вспомогательными и центральным пунктом, Δg - разность значений УСП между пунктом гравиметрическим и центриром штатива геодезического, Δh - измеренная разность высот между пунктом гравиметрическим и центриром штатива геодезического.

5.3.1.4 Методика измерений для формирования слоя карты составляющих УОЛ

Значения составляющих УОЛ η и ξ получают по результатам прямых измерений при помощи макета астроизмерителя УОЛ в соответствии с руководством по эксплуатации макета. Для этого на выбранном пункте

выполняют *n* серий измерений при помощи макета астроизмерителя УОЛ.

Условия проведения измерений составляющих УОЛ:

– ясное звездное небо;

– скорость ветра не более 1-2 м/с;

– без осадков.

Среднее арифметическое значение составляющих УОЛ для *n* серий по формулам:

$$\overline{\xi}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\xi_i}{n}, \qquad \overline{\eta}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\eta_i}{n}.$$

Значение СКО результатов измерения составляющих УОЛ *n* серий S_ξ и S_η, вычисляют по формулам:

$$S_\xi=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\xi_i-\overline{\xi})^2}{(n-1)}}; S_\eta=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\eta_i-\overline{\eta})^2}{(n-1)}}.$$

Итоговое СКО измерений УОЛ вычисляют по формуле:

$$S=\sqrt{S_\xi{}^2+S_\eta{}^2}.$$

5.3.2 Методика создания навигационных карт по результатам измерений КНГК

Подготовка навигационных гравитационных карт выполнялась на макете АРМ на основании измеренных данных параметров ГПЗ, цифровой модели рельефа на территорию съемки и цифровой модели плотности пород литосферы.

На примере результатов измерений УСП покажем последовательность действий, необходимую для создания навигационной гравитационной карты слоя УСП:

1) сформировать итоговый файл результатов измерений УСП вида X, Y, H, $g_i^{изм}$;

2) используя цифровые модели рельефа и плотности TopoDensT по формулам (2.9), (2.10) и (2.13) вычислить в каждой точке составляющие ГПЗ γ_{0i}, $\delta g^{выч}_{h_i}$, $\Delta g^{выч}_{\Delta H_i}$;

3) по формуле (2.12) в каждой точке вычислить составляющую ГПЗ $\Delta g^{выч}_{\Delta\rho_i}$;

4) выполнить интерполирование значений $\Delta g^{выч}_{\Delta\rho_i}$ в узлы регулярной сетки с шагом 1 км;

5) использовать полученный слой $\Delta g^{инт}_{\Delta\rho}$ как основу навигационной гравитационной карты УСП. Для вычисления УСП в любую точку полученной карты воспользоваться формулой (2.15).

По результатам опробования методики применения КНГК была создана многослойная навигационная гравитационная карта параметров ГПЗ. На рисунках 5.5 – 5.7 последовательно представлены слои значений УСП, W_{zx}, W_{zy}, W_{zz} и составляющих УОЛ.

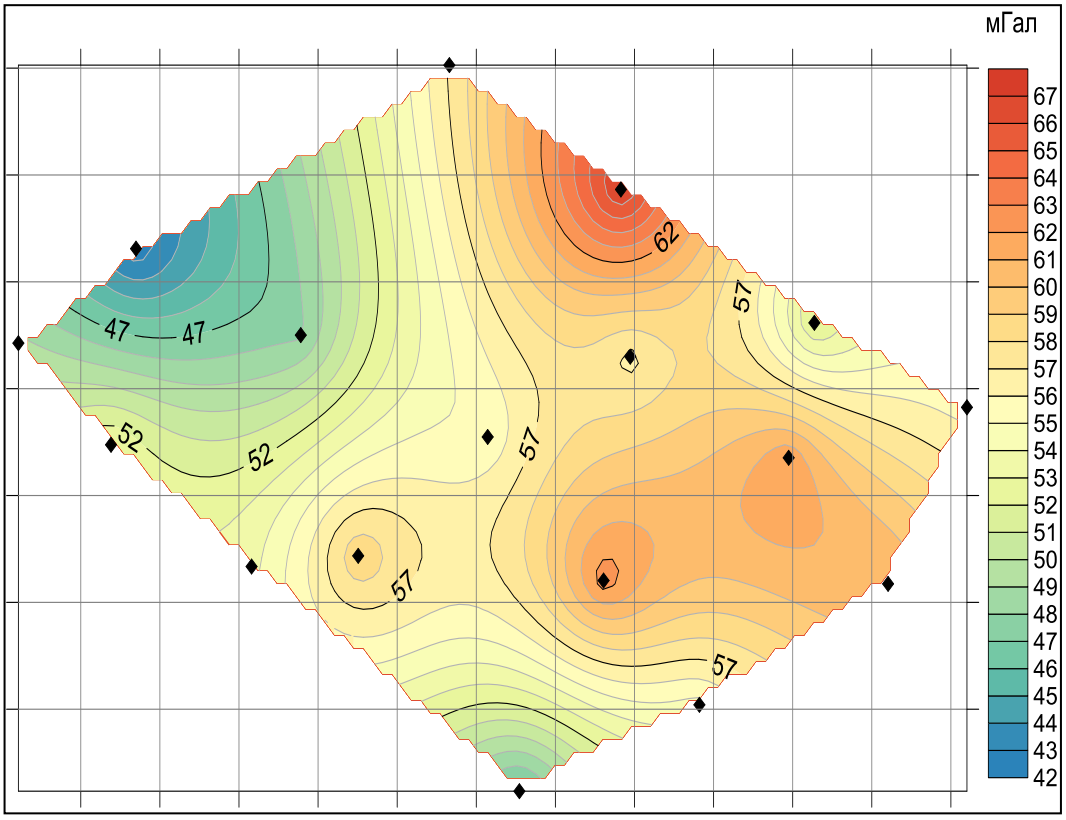
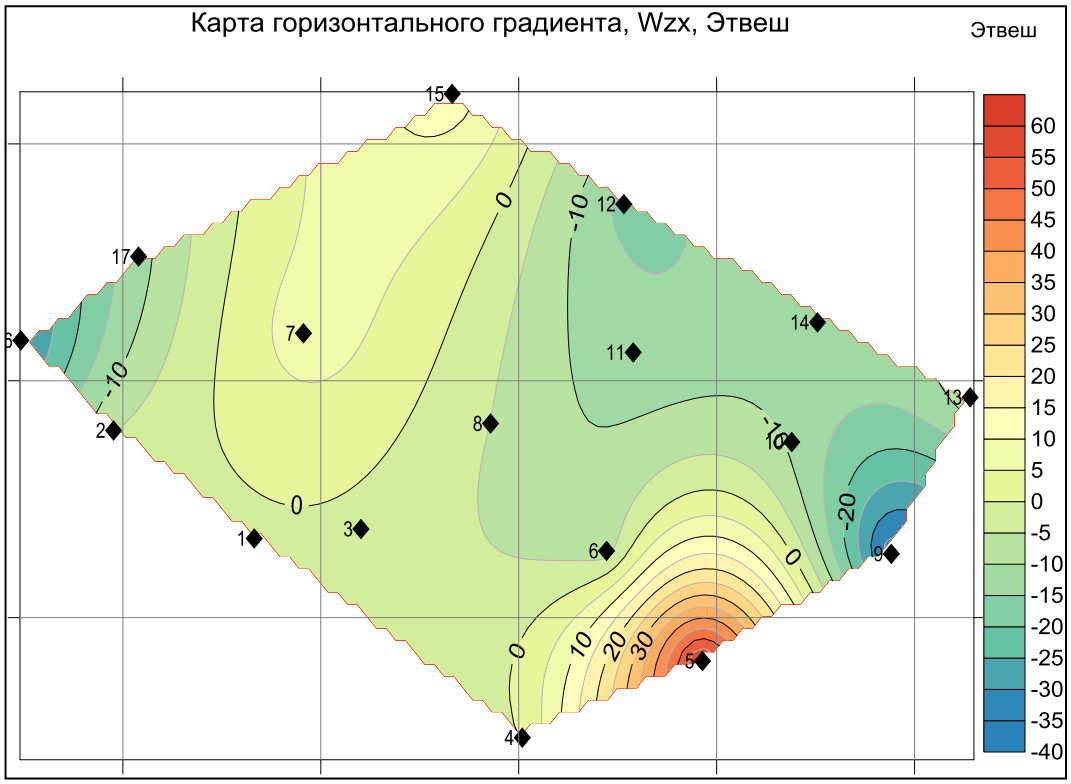
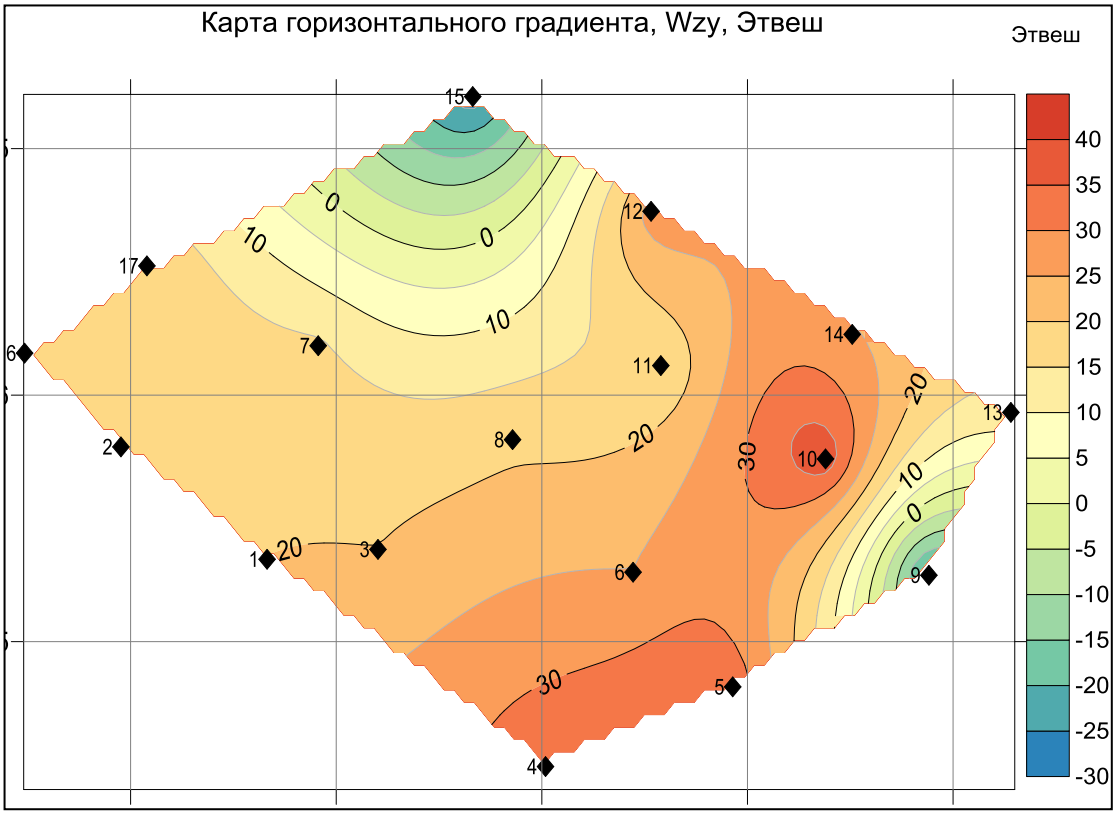


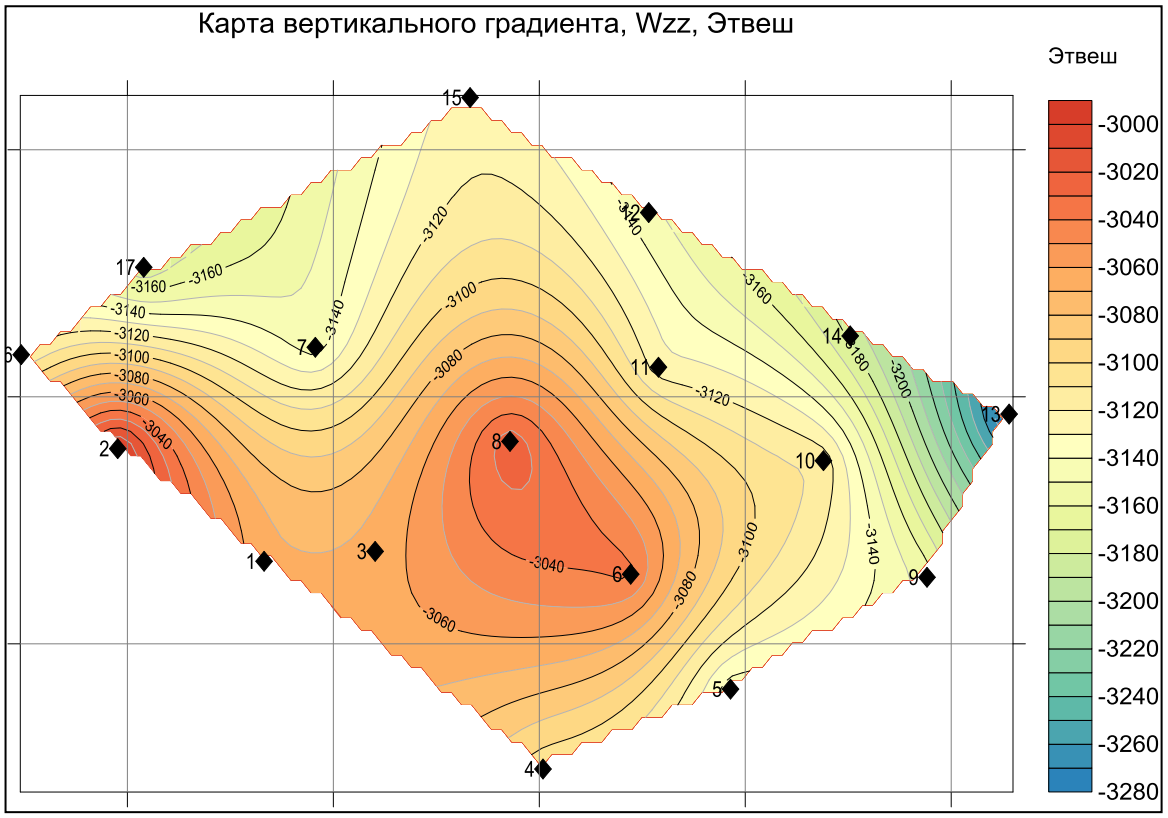
Рисунок 5.5 – Созданная карта $\Delta g_{\Delta\rho}$ в условном уровне


Карта горизонтального градиента, Wzx, Этвеш
Этвеш
60
55
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
-30
-35
-40

а)


Карта горизонтального градиента, Wzy, Этвеш
Этвеш
40
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
-30

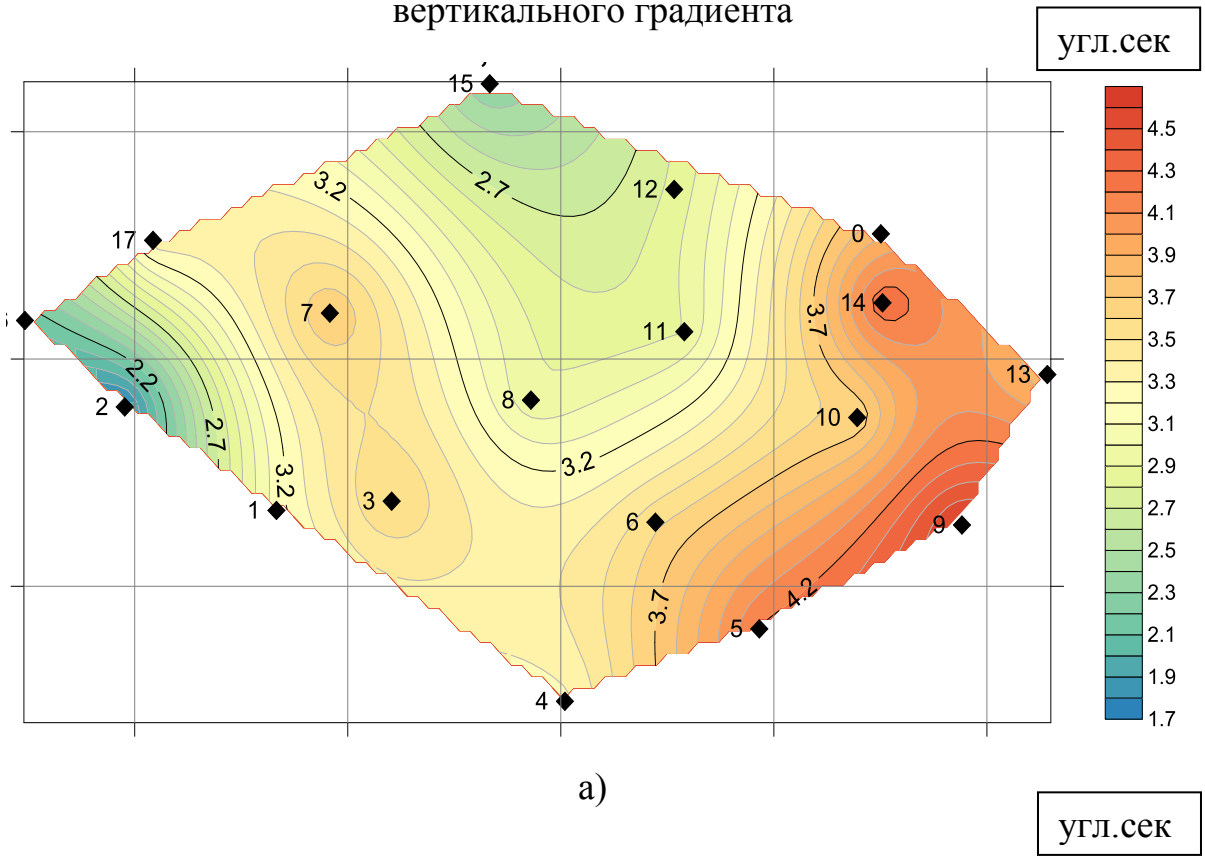
б)



в)

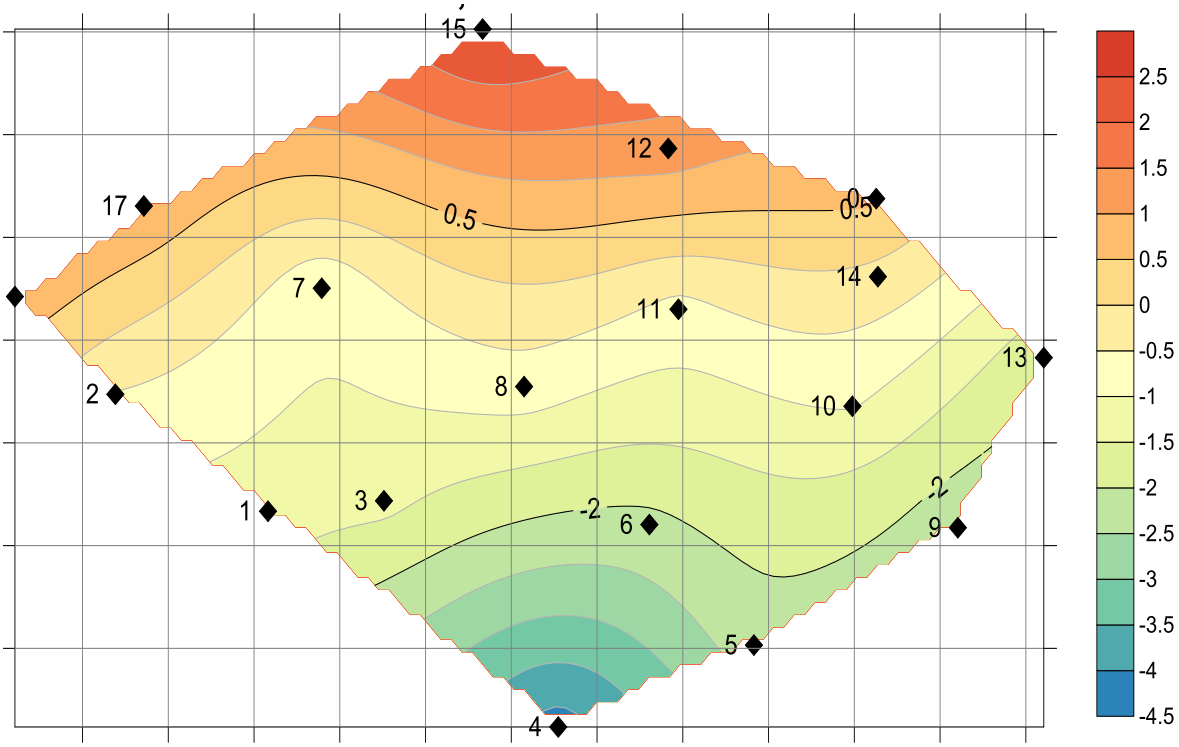
а) составляющей W_{zx}, б) - составляющей W_{zy} , составляющей W_{zz}

Рисунок 5.6 – Результаты формирования слоев карт горизонтальных и вертикального градиента



а)

угл.сек



б)

а) – составляющая ξ, б) –составляющая η

Рисунок 5.7 - Результаты формирования слоев карты составляющих УОЛ

5.3.3 Специальное программное обеспечение (СПО)

5.3.3.1 Описание СПО

Реализация вышеуказанной последовательности действий осуществлялась в программном обеспечении, созданном автором на языке программирования C++.

Основные функции СПО:

– подготовка данных ЦКР для вычислений $\Delta g_{\Delta Hi}$, гравитационных градиентов W_{xx}, W_{yy}, W_{Δ}, W_{xy};

– загрузка данных модели плотности TopoDensT;

– подготовка данных параметров закрытых помещений для вычислений карт распределения УСП, гравитационных градиентов W_{xx}, W_{yy}, W_{Δ}, W_{xy};

– вычисление составляющей УСП $\Delta g^{выч}_{\Delta H_i}$ в заданной области по формуле (2.13);

– вычисление гравитационных градиентов по формулам (3.4), (3.6 – 3.9);

– создание выходных файлов формата X, Y, H, $\Delta g_{\Delta Hi}$, W_{Δ}, W_{xy}.

Расширение функционала СПО

Как было указано в разделе 1.3.2.4, в настоящее время существует только одна фирма-разработчик бортовых гравитационных градиентометров, в других странах разработки таких измерителей находятся на разной стадии готовности [98].

Дополнительно СПО было снабжено блоком, моделирующим работу гравитационного градиентометра. Это необходимо для реализации возможности предварительной оценки макетов бортовых градиентометров акселерометрического типа. Это позволит использовать создаваемые навигационные гравитационные карты W_{Δ}, W_{xy} не только для систем автономной навигации, но и как средство первичной оценки правильности выбранных технических решений при разработке бортовых градиентометров.

5.3.4 Алгоритм работы СПО

5.3.4.1 Гравиметрические входные данные

В качестве исходной информации на чтение подаются *.txt файлы вида:

L	B	H	G, мГал
39.0000	45.0000	201	979652.138
39.0100	45.0000	202	979652.374
39.0200	45.0000	203	979652.628

5.3.4.2 Высоты рельефа

Для подготовки к вычислениям используются файлы ЦКР на заданную территорию вида:

B	L	H, м
42 31 42.00	41 44 11.00	51.00
42 31 42.00	41 44 14.00	49.00
42 31 42.00	41 44 17.00	50.00
42 31 42.00	41 44 20.00	50.00
42 31 42.00	41 44 23.00	49.00
42 31 42.00	41 44 26.00	49.00
42 31 42.00	41 44 29.00	51.00
42 31 42.00	41 44 32.00	49.00

5.3.4.3 Значения плотности пород

Для подготовки к вычислениям используется файл модели TopoDensT вида:

	L_1	…	L_M
B_1	δ_{11}	…	δ_{11}
…	…	…	…
B_N	δ_{N1}	δ_{11}	δ_{NM}

5.3.4.4 Подготовка к вычислениям

Данные из файлов ЦКР и модели TopoDensT построчно считываются в массивы равного размера вида:

0	L_1	L_2	L_3	……..	L_N
B_1	G_{11}	G_{12}	G_{13}	$G_{1....}$	G_{1N}
B_2	G_{21}	G_{22}	G_{23}	$G_{2....}$	G_{2N}
B_3	G_{31}	G_{32}	G_{33}	$G_{3....}$	G_{3N}
…..	$G_{...1}$	$G_{...2}$	$G_{...3}$	$G_{.....}$	$G_{...N}$
B_N	G_{N1}	G_{N2}	G_{N3}	$G_{N....}$	G_{NN}

где первая строка содержит данные по долготе, первый столбец содержит данные по широте и каждая ячейка содержит значение высот рельефа, либо плотности пород.

5.3.4.5 Вычисление составляющих γ_0, δg_h, Δg_H, W_Δ, W_{xy}

Вычисление составляющих γ_0, δg_h, Δg_H, W_Δ, W_{xy} выполняется по формулам (2.9), (2.10), (2.13) и (3.6-3.9). Радиус зоны учета ЦКР и модели TopoDensT задается вручную.

5.3.4.6 Вычисление и интерполирование значений $\Delta g_{\Delta\rho}$

В зависимости от поставленной задачи, возможно выполнить вычисление $\Delta g_{\Delta\rho}$ по формуле (2.12) и её интерполирование по формуле (2.14).

5.3.4.7 Выходные данные

Выходными данными работы СПО являются файлы типа *.csv значений

$\Delta g_{\Delta\rho}$ в узлах сетки 1x1 км и файлы *.csv значений W_{Δ}, W_{xy} в узлах сетки 1x1 км.

5.3.5 Блок градиентометра.

Исходными параметрами гравитационного градиентометра являются:

– файлы *.csv опорных значений W_{Δ}, W_{xy} в узлах сетки 1x1 км;

– К1, К2, К3 добротность чувствительной системы градиентометра в плоскостях XY, ZY и ZX соответственно;

– K_1_SD, K_2_SD, K_3_SD погрешности определения коэффициентов К1, К2, К3 соответственно, в процентах;

– U_0 и U_0_SD величина опорного напряжения и его погрешность в процентах;

– A_{1z} и A_{2z}, A_{1x} и A_{2x}, A_{1y} и A_{2y} сигналы с гантелей чувствительной системы в плоскостях XY, ZY и ZX соответственно.

5.3.5.1 Модель градиентометра

За основу бортового градиентометра был выбран горизонтальный гравитационный градиентометр гантельного типа.

Уравнение гантельного градиентометра

Сигнал на выходе 2-х гантельного градиентометра, вращение которого осуществляется вокруг оси OZ, в состоянии резонанса определяется соотношением [101, 116]:

$$M_z = k \cdot \left[\frac{1}{2} T_{\Delta} \sin 2\omega t + T_{xy} \cos 2\omega t \right], \qquad (5.1)$$

где k – постоянный коэффициент определяемый инерции колебательной системы чувствительного элемента; $T_{\Delta z} = T_{yy} - T_{xx}$.

Перемножая переменный выходной сигнал (5.1) с опорными квадратурными сигналами $U_1 = U_0 \sin 2\omega t$ и $U_2 = U_0 \cos 2\omega t$, снимаемыми с приводного двигателя градиентометра, получаем:

$$A_{1z} = M_z \cdot U_1 = kU_0 \cdot \left[\frac{1}{2} T_\Delta \sin^2 2\omega t + T_{xy} \sin 2\omega \mathrm{t} \cos 2\omega t \right] = \\ = \frac{kU_0 T_\Delta}{4} \cdot (1 - \cos 4\omega t) + \frac{kU_0 T_{xy}}{2} \sin 4\omega \mathrm{t}\,, \tag{5.2}$$

$$A_{2z} = M_z \cdot U_2 = kU_0 \cdot \left[\frac{1}{2} T_\Delta \sin 2\omega \mathrm{t} \cos 2\omega t + T_{xy} \cos^2 2\omega t \right] = \\ = \frac{kU_0 T_\Delta}{4} \cdot \sin 4\omega \mathrm{t} + \frac{kU_0 T_{xy}}{2} \cdot (1 + \cos 4\omega t)\,. \tag{5.3}$$

Отфильтровывая переменную составляющую с частотой 4ω, имеем следующие величины постоянных напряжений на выходе каждого перемножителя:

$$A_{1z} = \frac{kU_0 T_\Delta}{4} = \frac{A_0}{4} \left(T_{yy} - T_{xx} \right), \tag{5.4}$$

$$A_{2z} = \frac{kU_0 T_{xy}}{2} = \frac{A_0}{2} T_{xy}\,. \tag{5.5}$$

Характеристики гравитационного поля $T_\Delta = T_{yy} - T_{xx}$ и T_{xy} находятся путем измерения напряжений на A_{1z} и A_{2z}.

5.3.5.2 Выходные данные

Результатом работы модели градиентометра является *.csv файл, содержащий N строк вида B_i, L_i, T_{Δ_i}, T_{xy_i}. Результаты моделирования используются для оценки погрешности измерений градиентометра с заложенными параметрами.

На рисунке 5.8 представлен алгоритм работы СПО в виде структурной схемы.

5.3.6 Выводы по результатам опробования прототипа КНГК

В ходе экспериментального опробования прототипа КНГК были сформулированы следующие требования по доработке прототипа для повышения эффективности его использования:

1) дополнить состав измерительных средств перебазируемого КНГК системой активной виброизоляции для проведения измерений гравиметром внутри передвижной лаборатории во время остановок;

2) доработать конструкцию передвижной лаборатории для установки геодезической антенны на крыше лаборатории для непрерывных измерений пути передвижения;

3) дополнить состав стационарной части КНГК скважиной параметрической для контроля гидрологической обстановки вокруг гравиметрического опорного пункта;

4) дополнить состав стационарной части КНГК комплектом виброметров для контроля сейсмической обстановки вокруг гравиметрического опорного пункта.

5) доработать СПО до состояния самостоятельного программного продукта в целях повышения оперативности применения и удобства использования.

0	B_1	B_2	B_3	.....	B_M
L_1	H_{11}	H_{12}	H_{13}	$H_{1_}$	H_{1M}
L_2	H_{21}	H_{22}	H_{23}	$H_{2_}$	H_{2M}
L_3	H_{31}	H_{32}	H_{33}	$H_{3_}$	H_{3M}
.....	$H_{_1}$	$H_{_2}$	$H_{_3}$	$H_{__}$	$H_{_M}$
L_N	H_{N1}	H_{N2}	H_{N3}	$H_{N_}$	H_{NM}

Рисунок 5.8 – Структура СПО и алгоритм вычислений

5.4 Вывод по главе 5

1) Впервые сформированы требования к типовому составу средств измерений и контроля стабильности параметров ГПЗ наземного комплекса подготовки навигационных гравитационных карт.

2) Впервые выполнены экспериментальные исследования прототипа КНГК, в ходе которых была сформирована многослойная навигационная гравитационная карта, включающая:

– слой данных по аномалиям УСП $\Delta g_{\Delta\rho}$;

– три слоя по вторым производным W_{xz}, W_{yz}, W_{zz};

– два слоя составляющих УОЛ.

3) Сформулированы и внедрены требования по доработке прототипа наземного базирования для повышения эффективности его использования.

4) Впервые разработано СПО, позволяющее выполнять подготовку слоя навигационной карты УСП $\Delta g_{\Delta\rho i}$, а также слоёв навигационной гравитационной карты градиентов W_{Δ}, W_{xy}. Дополнительно СПО позволяет проводить предварительную оценку технических решений при разработке бортовых гравитационных градиентометров гантельного типа.

Таким образом задача по обоснованию требований, формированию облика и методики применения КНГК выполнена.

6 Заключение

В процессе проведенных исследований получены следующие основные результаты:

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) Впервые показана возможность применения и выполнена оценка навигационной информативности карт W_{xy} и W_{Δ} для объекта, летящего вдоль русла каньона как на постоянной высоте, так и с переменной высотой;

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

5) Обоснованы требования, сформирован облик и методика применения комплекса подготовки 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.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АБГ	Абсолютный баллистический гравиметр
БИНС	Бесплатформенная инерциальная навигационная система
ГНСС	Глобальная навигационная спутниковая система
ГП	Гравитационное поле
ГПЗ	Гравитационное поле Земли
КНГК	Комплекс подготовки навигационных гравитационных карт
КЭНС	Корреляционно-экстремальная навигационная система
МГБ	Международное Гравиметрическое Бюро
НАП	Навигационная аппаратура потребителя
СКО	Среднее квадратическое отклонение
СПО	Специальное программное обеспечение
УОЛ	Уклонение отвесной линии
УСП	Ускорение свободного падения
ЦКР	Цифровые карты рельефа

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Белоглазов И.Н., Джанджгава Г.И., Чигин Г.П. Основы навигации по геофизическим полям.-М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985.- 328 с.

2. Огородова Л.В., Шимбирев Б.П., Юзефович А.П. Гравиметрия. М.:, «Недра», 1978, 325 с.;

3. DARPA: Adaptable Navigation Systems (ANS) [online: http://www.darpa.mil/program/adaptable-navigation-systems].

4. Красовский А. А. Динамика непрерывных самонастраивающихся систем. — М.: Физматгиз, 1963. — 468 с.

5. Сырямкин В.И., Шидловский В.С. Корреляционно-экстремальные радионавигационные системы. − Томск: Изд-во Том. ун-та, 2010. − 316 с.

6. Красовский А.А., Белоглазов И.Н., Чигин Г.П. Теория корреляционно-экстремальных систем. М.: Наука, 1979.

7. Джанджгава Г. И., Герасимов Г. И., Августов Л.И. Навигация и наведение по пространственным геофизическим полям // «Известия Южного федерального университета. Технические науки». 2013. №3(140). С. 74–84.;

8. Навигация летательных аппаратов в околоземном пространстве. Августов Л.И., Бабиченко А.В., Орехов М.И., Сухоруков С.Я., Шкред В.К. Под редакцией доктора технических наук, Заслуженного деятеля науки Российской Федерации, профессора Джанджгавы Гиви Ивлиановича. М.: ООО «Научиздатлит», 2015, 592 с.

9. Фатеев В.Ф. , Рыбаков Е.А. Оценка точности комплексной аппаратуры потребителя с использованием измерений характеристик гравитационного поля. Труды НТК «Навигация по гравитационному полю Земли и ее метрологическое обеспечение. Меделеево, 14-15 февраля 2017 г., Изд. «ВНИИФТРИ», 2017.;

10. Hajime Ozu Missile 2000: Reference Guide to World Missile Systems. — Shinkigensha, 2000. — 619 p.

11. Степанов О.А. Применение теории нелинейной фильтрации в

задачах обработки навигационной информации. СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 1998. 370 с.

12. Денисенко О.В., Фатеев В.Ф., Рыбаков Е.А. Ассистирующая технология глобальной навигации на основе геофизических полей земли и оценка ее точности Мир измерений. 2018. № 1. С. 24-27.

13. Кривицкий Г. Е., Михин А. Я. Учет вариаций эффекта Этвеша при гравиметрических съемках масштаба 1 : 200 000/Изв. вузов. Сер. Геодезия и аэрофотосъемка.— 1983.-№ 4.-С. 58-61.

14. Jordan S. K., C enter J. Z. Establishing requirements for gravity surveys, for very accurate inertial navigation//Journal of the Institute of Navigation.-1986.-Vol. 33, N 2., Wells W. C. editor. Space born Gravity Gradiometers, NASA Conference Publication.-1984, 2305.

15. Джанджгава Г.И. Навигация и наведение по пространственным геофизическим полям /Г.И. Джанджгава, Г.И. Герасимов, Л.И. Августов// Известия ЮФУ. Технические науки - 2013 г - № 3 (40). - С. 74-84.

16. DeGregoria A. M. Gravity Gradiometry and Map Matching: An Aid to Aircraft Inertial Navigation Systems. Master’s thesis, Air Force Institute of Technology, 2010.;

17. Air-FTG for Regional Scale Mapping. [Online]. Available: http://www.dmec.ca/ex07-dvd/E07/pdfs/63P.pdf;

18. Lee, J. B., 2001, FALCON gravity gradiometer technology: Exploration Geophysics, 32, 247-250.;

19. Christensen A.N., Dransfield M.H., Van Galder C. Noise and repeatability of airborne gravity gradiometry. First break, 2015, vol. 33, no. 4, pp. 55–63.;

20. Dransfield M. Airborne gravity gradiometry in the search for mineral deposits. Proceedings of exploration, 2007, vol. 7, pp. 341–354.;

21. Misner, C.W., Thorne, K.S., Wheeler, J.A., Gravitation, W.H. Freeman and Company, 1973, 1279 p

22. Фатеев В.Ф., Рыбаков Е.А. Оценка точности комплексной аппаратуры потребителя с использованием измерений характеристик

гравитационного поля. В сборнике: Навигация по гравитационному полю Земли и ее метрологическое обеспечение. Доклады научно-технической конференции. 2017. С. 110-114.

23. https://ngmdb.usgs.gov/ngm-bin/ngm_compsearch.pl

24. https://open.canada.ca/data/dataset/5a4e46fe-3e52-57ce-9335-832b5e79fecc

25. Nikolaos K. Pavlis Simon A. Holmes Steve C. Kenyon John K. Factor The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). Geodesy and Gravity/Tectonophysics. 2012.

26. Методические рекомендации по геологической, геофизической, геохимической изученности и обеспеченности дистанционными материалами для обоснования постановки РГР, С.-П.: ВСЕГЕИ, 2014 г.

27. «Разъяснениями по порядку предоставления геологической информации, содержащей сведения, составляющие государственную тайну» (Письмо Федерального Агентства по Недропользованию от 28.11.2013).

28. ГКИНП (ГНТА) 17-267-02 «Инструкция о порядке предоставления в пользование и использования материалов и данных Федерального Картографо – Геодезического Фонда»

29. http://bgi.obs-mip.fr/data-products/Gravity-Databases/Land-Gravity-data

30. Инструкция по гравиразведке, М.: Недра, 1980 г.

31. Airborne Gravity 2004, Geoscience Australia Record 2004/18

32. https://www.iers.org/IERS/EN/Home/home_node.html

33. Longman I. M., Formulas for computing the tidal accelerations due to the Moon and the Sun. Journal of Geophysical Research, V.64, №12, 1959.

34. Ляв А., Математическая теория упругости, М., 1935.

35. Молоденский М.С., Гравитационное поле. Фигура и строение Земли, М., Наука, 2001.

36. Двулит П.Д. Влияние атмосферных масс на гравитационное поле Земли, М.: МИИГАиК, 1969.

37. O.Gitlein, L.Timmen, J.Muller, Modeling of atmospheric gravity effects

for high-precision observations. International Journal of Geosciences, 2013

38. M. Karbon, J. Böhm, E. Fagiolini, F. Flechtner, H Schuhmpact of NumericalWeather Models on Gravity Field Analysis. International Association of Geodesy Symposia, © Springer International Publishing Switzerland 2015

39. Вихирев Б.В. Влияние изменения во времени гидрологических факторов на силу тяжести // Повтор. гравиметр. наблюдения. – М., 1976. – С. 4 –23.

40. Каленицкий А.И. Канушин В.Ф., Кузьмин В.И. Многоцикловые гравиметровые измерения для выявления неприливных изменений силы тяжести в районе Саяно-Шушенской ГЭС, Н., Вестник СГГА, 2003.

41. M.Van Camp, B.Meurers, T.Van Dam, A.Dassargues, Hydrological investigations at the Membach station, Belgum, and application to correct long periodic gravity variations. Journal of Geodynamics 2006.

42. Д. В. Абрамов, М. Н. Дробышев, В. Н. Конешов, Оценка влияния сейсмических и метеорологических факторов на точность измерений относительными гравиметром, Физика Земли. 2013. № 4. С. 105.

43. Котов Н.И., Шолохов А.В., Чернышев С.Е., Беркович С.Б. Подготовка навигационных гравитационных карт на основе первичных гравитационных измерений В сборнике: Навигация по гравитационному полю Земли и ее метрологическое обеспечение. Доклады научно-технической конференции. 2017. С. 71-90.

44. Рекомендации по выполнению аэрогравиметрической съемки для создания современной геофизической основы Госгеолкарты 1000/3 и Госнеолкарты 200/2. Протокол №4/2014 заседания геофизической секции НРС Роснедра от 26.06.2014. Москва. 2014

45. Могилевский В.Е., Бровкин Г.И., Контарович О.Р. Достижения, особенности и проблемы аэрогравиметрии. «Разведка и охрана недр». №12. 2015

46. Могилевский В.Е., Бровкин Г.И., Смирнов А.С., Прозорова Г.В. Оценка погрешности аэрогравиметрической съемки. «Мониторинг. Наука и

технологии» №3(36) 2018

47. Бабаянц П.С., Буш В.А., Керцман В.М., Контарович Р.С., Лёвин Ф.Д., Могилевский В.Е., Каплун Д.В., Павлов С.А., Тарарухина Н.М. Возможности комплексных аэрогеофизических съемок при создании геофизического обеспечения регионально-геологических и прогнозно-поисковых работ. Сборник статей. ЗАО «ГНПП «Аэрогеофизика».

48. Евстифеев М.И. Состояние разработок бортовых гравитационных градиентометров. «Гироскопия и навигация». №3(94). С. 96-114. 2016

49. https://www.hydro-international.com/content/article/marine-3d-full-tensor-gravity-gradiometry

50. Nigel Brady A Turnkey Airborne Gravity System – Concept to reality, Airborne Gravity, 2010

51. Theo Aravanis, Jon Chen VK1 – A next-generation Airborne Gravity Gradiometer, ASEG-PESA-AIG 2016

52. в сборнике «Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли» под общ. ред. В.Г. Пешехонова, С.-Петербург 2017 г. с.23

53. Vitouchkine A.L., Faller J.E. Measurement results with a small cam driven absolute gravimeter, Metrologia 2002, Vol. 39, №2, P. 465-469

54. A.A. Krasnov, M.I. Evstiffev, L.P. Starosel'tsev, A.N. Dzyba Development of a system for gyrostabilization of a marine absolute gravimeter and determination of its motion parameters, 4th IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements, 2016, P. 217-219

55. Bauman H. Absolute airborne gravimetry: a feasibility study, Article in Geophusical Prospecting, March 2012

56. Контарович Р. С., Бабаянц П. С., Овчарук В. П. Современные тенденции развития аэрогеофизических методов и технологий // Геофизический вестник, 2007, № 6. С. 10–15

57. http://geoget.ru/content/view/140/383/

58. Железняк Л.К., Конешов В.Н., Краснов А.А., Соколов А.В., Элинсон

З.Л. Результаты испытаний гравиметра «Чекан» на ленинградском гравиметрическом полигоне. «Физика земли». 2015. №2. С. 165-170

59. http://aerogeo.ru/resursy/oborudovanie/aerogravimetr-gt-2a/

60. http://www.elektropribor.spb.ru/katalog/oborudovanie-dlya-neftegazovogo-kompleksa/chekan-am-model-shelf-mobilnyy-gravimetr/

61. Murphy C.A., Brewster J., Robinson J. Evaluating Air-FTG survey data: bringing value to the full picture. Preview, 2007, vol. 126, pp. 24–28.

62. Annecchione M., Moody M., Carroll K., Dickson D., Main B. Benefits of a high performance airborne gravity gradiometer for resource exploration. Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration, 2007, pp. 889–893.;

63. Murphy C.A. Exploring prospects with FTG Gravity. 9-th Biennial International Conference &Exposition on Petroleum Geophysics. Hyderabad, 2012, p. 141.

64. NEOS and Lockheed Martin to Develop ‘New Generation’ Sensor. NEOS press release, July 6,

65. Forward, R.L. Review of artificial satellite gravity gradiometer techniques for geodesy. The Use of Artificial Satellites for Geodesy and Geodynamics, 1974, vol. 1, pp. 157–192.;

66. Forward R.L., Lemmen R.M., Lowe R.W., Peterson R.W., Tonai I., Williams W.E. Rotating gravity gradiometer study. Hughes research laboratories. Malibu,1976, p. 174.;

67. Paik H.J., Leung J.S., Morgan S.H., Parker J. Global gravity survey by an orbiting gravity gradiometer. Eos, Transactions American Geophysical Union. 1988, vol. 69, no. 48, pp. 1601–1611.

68. Пешехонов В.Г., Несенюк Л.П., Старосельцев Л.П., Элинсон Л.С. Судовые средства измерения параметров гравитационного поля Земли. Л.: ЦНИИ «Румб», 1989. 90 с.

69. Ruihang Yu, Meiping Wu, Kaidong Zhang, Shaokun Cai, A new method for land vehicle gravimetry using SINS/VEL. Sensors 17(4):766. 2017

70. Kai-Wei Chiang, Cheng-An Lin, Chung-Yen Kuo. A Feasibility Analysis of Land-Based SINS/GNSS Gravimetry for Groundwater Resource Detection in Taiwan. Sensors 15(10). 2015

71. http://www.teh-lib.ru/koe/profilometr.html

72. Roland P. CHAMP-, GRACE-, GOCE-Satellite Projects. Encyclopedia of Geodesy. Springer. 2014 (https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-319-02370-0_29-1.pdf)

73. http://icgem.gfz-potsdam.de/tom_longtime;

74. «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90.11). Справочный документ. Москва 2018.

75. https://www.ga.gov.au/about/projects/resources/kauring#:~:text=References-,Overview,and%20other%20airborne%20sensing%20systems.

76. https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/16/items/302572

77. 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 4th IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM 2016) С. 143-148.

78. Короновский Н.В. Общая геология. МГУ. Москва. 2003. 405 с.

79. https://www.ga.gov.au/about/projects/resources/kauring#heading-3

80. Valencio A., Grebogi C., Baptista M. Methods for removal of unwanted signals from gravity time-series: comparison using linear techniques complemented with analysis of system dynamics// Chaos, v. 27 , № 10 , pp. 1-12

81. Дементьев Ю.В., Каленицкий А.И., Мареев А.В. Влияние атмосферного давления и температуры воздуха на значение силы тяжести // Вестник СГУГиТ. 2016. № 1. С. 62-69.

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

83. http://www.ifz.ru/applied/prognoz-parametrov-zemnykh-prilivov/?jumpurl=uploads%2Fmedia%2FATLANTIDA31_HELP_RUS.pdf&juSe

cure=1&mimeType=application%2Fpdf&locationData=1334%3Att_content%3A2596&juHash=fc08408ad890f60fbfc5afc4c8e2666dc4c007f7

84. Бобров Д.С. Классификация гравиметрических поправок за различные геодинамические явления по степени значимости при проведении высокоточных исследований. Материалы 71-ой научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК, посвященной Международному году карт. 5-6 апреля 2016 г.

85. http://o-pogode.ru/dnem-31-august-2018/zelenograd;

86. http://russia.pogoda360.ru/-532977/august

87. Юзефович А.П., Огородова Л.В. Гравиметрия. - М.: Недра. 1980. 281 с.

88. Гравиразведка. Справочник геофизика. под ред. Е.А. Мудрецовой, К.Е. Веселова. М. Недра. 1990

89. Чугунов И.П., Галактионов И.Е., Рентель А.В. Современные подходы к представлению рельефа в цифровых приложениях // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2019. Т. 63. № 1. С. 105–111. DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-1-105-111.

90. Sheng M.B., Shaw C. et all. Formulation and Validation of a Global Laterally Varying Topographical Density Model. Tectonophysics. Vol.762. 2019

91. https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-1-arc?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects

92. Бычков С.Г., Долгаль А.С., Симанов А.А., Вычисление аномалий силы тяжести при высокоточных гравиметрических съемках. Пермь, УрО РАН, 2015 – 142 с.

93. https://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust1.html

94. https://www.unb.ca/fredericton/engineering/depts/gge/resources.html

95. Nettleton L.L. Determination of density for reduction of gravimeter observations. Geology. 1939

96. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика:

Учебное пособие для вузов. Москва: Высшая школа, 2004. 479 с.

97. GEOPHYSICAL SURVEY REPORT Helifalcon™ AIRBORNE GRAVITY GRADIOMETER AND MAGNETIC STINGER SURVEY SULLIVAN NORTH, MISSOURI PROJECT 14012 USGS. 2014

98. Джилавдари И.З., Ризноокая Н.Н. Этапы развития и состояние разработок гравитационных градиентометров для подвижных объектов (Обзор) // Приборы и методы измерений. 2016. Т. 7. № 3. С. 235–246.

99. Огородова Л. В. Нормальное поле и определение аномального потенциала. — М: Изд-во МИИГАиК, 2010. — 106 с.

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

101. Юзефович А. П. Поле силы тяжести и его изучение. — М: Изд-во МИИГАиК, 2014. — 192 с.

102. Сорокин Л.В. Гравиметрия и гравиметрическая разведка. - М.: Гостоптехиздат. 1953. 484 с.

103. Nagy D., Papp G., Benedek J., The gravitational potential and its derivatives for the prism. Juornal of Geodesy (2000) 74. 2000

104. Marshall M. Rogers, An investigation into the Feasibility of using a modern gravity gradient instrument for passive aircraft navigation and terrain avoidance. Thesis. Air Force Institute of Technology. Ohio. 2009

105. Difrancesco D. Advances and Challenges in the Development and Deployment of Gravity Gradiometer Systems [Electronic resource] // EGM.2007.International Workshop «Innovation in EM, Grav and Mag methods: a new perspective for exploration». Capri, April 15–18, 2007. URL: https://eageseg.org/data/ egm2007/Sessione%20C/Oral% 20papers/C_OP_02.pdf.

106. Dransfield M., Zeng Yi, Airborne gravity gradiometry: Terrain corrections and elevation error. Geophysics, vol. 74, №5. 2009

107. Остапчук А.А. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Режимы межблокового скольжения:

условия формирования и трансформации». Институт динамики геосфер РАН. Москва 2016.

108. Белоглазов И. Н., Тарасенко В. П. Корреляционно-экстремальные системы. – М.: Советское радио, 1974. – 392 с.

109. Глушков В.М., Амосов Н.М., Артеменко И.А. Энциклопедия кибернетики. Том 1. Киев, 1974 г.

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

111. 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.

112. 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.

113. 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.

114. D. Van Westrum. Field Observation Results from the 2017 Geoid Slope Validation Survey in Colorado, USA, NOAA, National Geodetic Survey, Boulder, USA. Abstract: IUGG19-2013

115. 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.

116. Евстифеев М.И. Динамика бортовых гравитационных градиентометров. Гироскопия и навигация. Том 27. №4 (107), 2019.