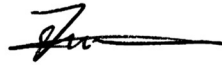


*На правах рукописи*

**Мусса Хиба**



**ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ МОДЕЛИ КВАЗИГЕОИДА  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ  
ОПРЕДЕЛЕНИЙ И МНОГОХОДОВОГО  
НИВЕЛИРОВАНИЯ  
ДЛЯ РЕСПУБЛИКИ ЛИВАН**

*Специальность 1.6.22. Геодезия*

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2024

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, доцент

*Мустафин Мурат Газизович*

**Официальные оппоненты:**

*Мелкий Вячеслав Анатольевич*

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, лаборатория вулканологии и вулканопасности, ведущий научный сотрудник;

*Канахин Николай Владимирович*

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», кафедра «Инженерная геодезия», доцент.

**Ведущая организация** – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», г. Новосибирск.

Защита диссертации состоится **18 сентября 2024 г. в 15:30** на заседании диссертационного совета ГУ.8 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, **аудитория № 1171а.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 18 июля 2024 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

диссертационного совета



КУЗИН

Антон Александрович

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Одной из наиболее важных задач геодезических измерений является получение нормальных высот достаточной точности, обеспечивающей строительство зданий и сооружений. Их определение при наличии развитой планово-высотной сети не представляет особой сложности. Другое дело, когда встает вопрос о ее создании. Такая ситуация сложилась в Ливане. Создание нивелирной сети с использованием традиционного подхода на основе нивелировочных работ связано с большими затратами, как людскими, так и финансовыми. В этой связи широкое распространение получило применение глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Однако точность определения нормальных высот без дополнительных изысканий остается не всегда приемлемой. Существенное развитие этого вопроса получило разработка моделей Земли (EGM), позволяющие определять по данным ГНСС аномалии и далее нормальные высоты. Однако и в этом случае требуется проведение специальных исследований для проверки получаемых результатов и разработки корректирования модели высот и построения локального квазигеоида. К настоящему времени национальные геодезические службы многих стран ведут исследования в этом направлении.

Построение локального квазигеоида актуальная задача для любой страны. Особенно она востребована в странах, где отсутствует высотная геодезическая сеть, и территория Ливана относится к таким регионам. Наличие модели квазигеоида обеспечивает уточнение модели Земли, основной задачи геодезии. Кроме того, сегодня технологии измерений с использованием ГНСС становятся одними из главных, позволяющих посредством компьютерных технологий удобно и эффективно осуществлять основной принцип измерений: их единство.

Главной задачей остается достижение требуемой точности модели квазигеоида.

Диссертация направлена на разработку модели квазигеоида с использованием спутниковых определений и геометрического нивелирования. При этом геометрическому нивелированию уделяется особое внимание: выполнение по нескольким маршрутам позволит более надежные значения нормальных высот для конкретного участка. Важно при этом обеспечение вертикальности нормалей к визирной линии, что также требует разработки дополнений к технологии геометрического нивелирования. Эти вопросы, а также обобщение и обработка результатов измерений, определение характеристических коэффициентов для репрезентативных участков и, в конечном итоге, построение локальной модели квазигеоида для Республики Ливан составляют решение актуальной задачи.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 1.6.22. Геодезия по пунктам 3, 5 и 11.

#### **Степень разработанности темы исследования**

Изучением вопросов определения нормальных высот для инженерных приложений занимались многие специалисты-геодезисты. Следует выделить работы таких ученых, как В.Б. Непоклонов, А.П. Карпик, В.Н. Баландин, М.Я. Брынь, А.Н. Майоров, В.Н. Баранов, И.М. Кравчук, Г.В. Демьянов, Н.И. Рудницкая, В.И. Обиденко, О.А. Опритова, А.П. Решетов, Ву Хонг Куонг, Фунг Чунг Тхань, Мохамед Абделвадод Абделмгед Елшеви, Йессуфу Мукадаму Жослин, O.F. Oduyebo, M.N. Ono, E.S. Okiemute, E.Y. Belay, W. Godah, M. Szelachowska, R. Tenzer, T.A. Herbert, O. Eteje, D.T. Vu, S. Bruinsma, S. Bonvalot, A.J. Aljanbi, H. Dibs, B.H. Alyasery в которых заложены основы использования ГНСС технологий для определения нормальных высот.

Примеры и методики практической реализации спутникового нивелирования рассмотрены в работах Башировой Д.Р.,

Юнес Жад, Чан Тхань Шон, Idoko I.A., Sam A.A., Eboigbe M.A., Raufu I.O., Tata H., Williams S.D.P., Penna N.T., Hoa H.M.

Вместе с тем вопросам совершенствования технологии спутникового нивелирования в части разработки технологии определения нормальных высот на основе вариаций метода геометрического нивелирования и алгоритма корректировки данных спутниковых определений для уточнения локальных квазигеоидов пока уделяется недостаточно внимания.

**Объект исследования** – поверхность участка Земли и нормальные высоты ее точек.

**Предмет исследования** – методы определения нормальных высот.

**Цель работы** – повышение точности производства геодезических работ в Республике Ливан за счет разработки методики определения нормальных высот.

**Идея работы** заключается в комплексном использовании современных технологий геодезических измерений и их обработки для создания локального квазигеоида, при котором на основе модели Земли, спутникового позиционирования и геометрического нивелирования, проводимого на репрезентативных участках по маршрутам, обеспечивающим стационарирование на всей рассматриваемой площади, корректируются результаты спутникового нивелирования, определяются зональные коэффициенты, по которым строится высотная модель для территорий Ливана.

**Задачи исследования:**

1. Анализ состояния изученности вопроса о построении высотной основы и разработка методики детальных исследований.

2. Разработка методики натуральных измерений и общей концепции построения модели локального квазигеоида.

3. Проведение геодезических измерений, включая спутниковые определения, геометрическое нивелирование и

разработка поправочного коэффициента для спутникового нивелирования.

4. Разработка технологии построения модели локального квазигеоида и ее демонстрация на конкретном объекте.

**Научная новизна работы:**

1. Разработана методика построения локального квазигеоида на основе спутниковых определений и многоходового геометрического нивелирования с коррекцией его поверхности по отвесной линии.

2. Получены зависимости точности определения нормальных высот от количества ходов и маршрутов геометрического нивелирования.

3. Разработан алгоритм определения поправочного коэффициента, уточняющий метод спутникового нивелирования.

**Теоретическая и практическая значимость.** В диссертации приведено теоретическое обоснование технологии построения локального квазигеоида на основе использования спутниковых определений, которые совместно с оригинальными способами применения геометрического нивелирования создают предпосылки для развития традиционных методов геодезических измерений и их увязывании с технологиями ГНСС-измерений, что весьма значимо в целом для геодезии. Практическая значимость состоит в разработке инженерной методики измерений для построения локального квазигеоида на территории Республики Ливан. Разработанная методика определения нормальных высот по данным спутниковых определений и частичного применения геометрического нивелирования принята к использованию в системе геодезических работ компанией ООО «БЕНТА», что подтверждается актом внедрения от 01.12.2023.

**Методология и методы исследования**

Анализ и обобщение результатов теоретических и практических исследований при обосновании актуальности темы

работы и решаемых задач; полевые исследования, включая экспериментальные геодезические измерения с использованием технологий ГНСС; методы математической статистики и метод наименьших квадратов при обработке измеренных величин; математическое моделирование рельефа местности для сравнения результатов разных территорий и определения поправочного коэффициента.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Использование метода геометрического нивелирования, проведенного по нескольким взаимосвязанным маршрутам, повышает точность определения высот локального квазигеоида в два и более раз в зависимости от рельефа местности.

2. Создание высотной основы для территории с недостаточно развитой геодезической сетью, к которым относится Республика Ливан, для целей строительства зданий и сооружений возможно на основе разработанного алгоритма определения поправочных коэффициентов к нормальным высотам, получаемым по методу спутникового нивелирования.

**Степень достоверности результатов исследования** обеспечена достаточным объемом натурных измерений, проведенных на разных ландшафтных территориях, обоснованностью теоретических расчетов, согласованностью результатов с альтернативными независимыми исследованиями, применением сертифицированного оборудования, приборов и программного обеспечения.

**Апробация результатов исследования.** Основные положения и результаты работы докладывались на следующих конференциях: XVII International Forum-Contest of Students and Young Researchers «Topical Issues of Rational Use of Natural Resources (июнь 2021 г., г. Санкт-Петербург), XIX International Forum-Contest of Students and Young Researchers «Topical Issues of Rational Use of Natural Resources (май 2023 г., г. Санкт-Петербург), The International Conference on Geosyn-

thetics and Environmental Engineering (март 2023 г., г. Южная Корея).

**Личный вклад автора** заключается в: участии формулирования цели диссертации и обоснования задач исследований; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования; проведении полевых работ в трех различных регионах Ливана, анализе и обработке полученных результатов и разработке математической модели; обобщении результатов исследований; разработке программных модулей по оптимизации точности измерения нормальных высот и разработке математической модели высот.

#### **Публикации**

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 7 печатных работах, в том числе в 3 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 1 статья - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus). Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

#### **Структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех, заключения и библиографического списка, содержит 146 страниц машинописного текста, 38 рисунков, 24 таблицы, список литературы из 132 наименований и 4 приложения на 19 страницах.

#### **Благодарности**

Выражаю благодарность своему научному руководителю – доктору технических наук Мустафину М.Г. за помощь, оказанную при работе над диссертацией, преподавателям и сотрудникам кафедры инженерной геодезии Санкт-Петербургского горного университета императрицы



Екатерины II, коллегам, друзьям и своей семье за бесценную поддержку на протяжении всего периода работы над диссертацией.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** приведено описание основных показателей диссертации: актуальности темы, цели задачи исследований, научной новизны, теоретической и практической значимости работы и положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен обзор традиционных и современных методов определения высот, в том числе геодезической, ортометрической, нормальной и динамической. Описаны стандарты и нормативные документы, действующие в Ливане, России и других странах. Подробно описываются существующие разработки и методы по определению нормальных высот, их преимущества и недостатки. Показана целесообразность системного использования ГНСС технологий и наиболее точного метода определения превышений: геометрического нивелирования. Анализ состояния исследуемого вопроса показал обоснованность темы диссертации. Сформулирована цель и задачи исследований.

**Во второй главе** разработана методика определения нормальных высот с использованием геометрического нивелирования, спутниковых определений и моделей Земли. Разработана методика натурных экспериментальных работ. Проведено моделирование на тестовых примерах. Численно продемонстрирована эффективность методики.

**В третьей главе** поведен выбор репрезентативных участков для проведения натурных экспериментов (полигонов). Приведено описание проведения всего комплекса полевых и камеральных работ. Разработана математическая модель для получения поправочных коэффициентов к методу спутникового нивелирования для каждого полигона.

**В четвертой главе** разработана модель нормальных высот посредством зонирования территории Ливана. Приведены методические аспекты для органичного встраивания в существующую нормативную базу. Показаны примеры практического внедрения разработанной методики на различных участках Республики Ливан.

**В заключении** представлены основные результаты диссертационного исследования.

Выполненная диссертационная работа, позволяет вынести на защиту, следующие положения:

**1. Использование метода геометрического нивелирования, проведенного по нескольким взаимосвязанным маршрутам, повышает точность определения высот локального квазигеоида в два и более раз в зависимости от рельефа местности.**

Совершенствование модели геоида (квазигеоида) - вопрос, который обсуждается в геодезической и смежных областях, уже много лет. С появлением ГНСС технологий точность измерений точек на земной поверхности существенно возросла и дискуссия об определении нормальных высот возобновилась с новой силой. Считается, что при отсутствии гравиметрических данных невозможно определение нормальных высот, особенно на больших расстояниях. Вместе с тем достаточно точное определение плановых координат точек спутниковыми определениями в сочетании с весьма точными данными о превышениях, полученными геометрическим нивелированием, создают новые возможности для определения нормальных высот.

Неравномерное распределение массы внутри Земли, вызванное разной плотностью горных пород и рельефом местности, приводит к неравномерной силе гравитационного притяжения, что влияет на точность измерений при нивелировании. Устранение этих погрешностей проводится за счет поправок

для чего выполняют гравиметрические измерения. Вместе с тем, известно, что при геометрическом нивелировании по разным маршрутам зачастую получают разные конечные отметки. Вызвано это как раз неравномерностью гравитационного поля. В то же время точки стоянки нивелира приурочены к отдельным уровенным поверхностям со своим гравитационным потенциалом. Если в результате разных маршрутов получают одни и те же отметки, то гравитационное поле однородно и выражается одним значением потенциала сил. Соответственно, все точки стояния нивелира принадлежат одной уровенной поверхности. Однако, при неоднородном гравитационном поле имеем разные значения отметок.

Разработана схема полевых наблюдений (Рисунок 1), включающая полигон, в данном случае представляющий собой прямоугольник, в котором высоты точек определяются по технологии трехмаршрутного нивелирования. Процесс нивелирования выполнен по 1-му прямому маршруту (классический метод) и 2-м криволинейным маршрутам. При этом последние всегда будут проходить через промежуточную точку, которая как бы связывает два маршрута. Таким образом, превышения на конечные точки  $PT_1$  и  $CP$  (первая зона) определяются три раза. Нивелирование выполнялось по схеме III класса нивелирования, при котором ход проводился в прямом и обратном направлениях. 1-й маршрут (прямой: линия В), 2-й маршрут (криволинейный: линии 2 и 5) проходит через промежуточную точку  $IP_1$ , и 3-й маршрут (криволинейный: линии 21 и 24), проходит через промежуточную точку  $IP_4$ . В результате определяют нормальные высоты пяти контрольных точек. Тот же процесс повторяется и для других контрольных точек. Разработанная схема наиболее эффективно позволила оценить неравномерность гравитационного поля.

Приведенная схема геометрического нивелирования была реализована еще на двух полигонах. При этом выбраны

участки, имеющие отличный друг от друга рельеф. Если первый полигон можно отнести к равнинному рельефу (угол наклона менее 2 градусов), то другие принадлежат к горным (2 – более 6 градусов) и предгорным (3).

В диссертации разработан алгоритм на основе МНК (Рисунок 2) моделирования результатов геометрического нивелирования и их уравнивания. Алгоритм применялся после уточнения измеренных данных и введения поправок (угол  $i$ , кривизна Земли и атмосферная рефракцию).

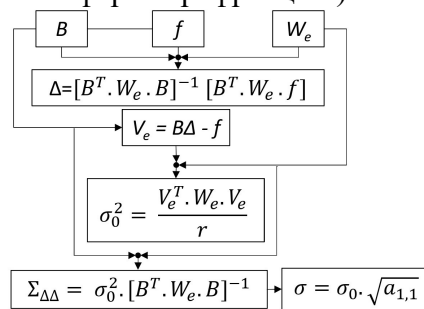


Рисунок 2 – Схема разработанного алгоритма уравнивания результатов измерений и определения нормальных высот ( $B$  – матрица коэффициентов параметрических уравнений,  $f$  – вектор разницы расчетных и измеренных величин,  $W_e$  – весовая матрица,  $\Delta$  – поправки к превышениям,  $V_e$  – поправки к высотам,  $\sigma_0^2$  – ошибка единицы веса,  $\Sigma_{\Delta\Delta}$  – Матрица ошибок,  $\sigma$  – среднеквадратическая погрешность)

По приведенному алгоритму смоделированы разные ситуации: проведено геометрическое нивелирование по прямолинейному маршруту (классический метод) и по схеме трехмаршрутного нивелирования. Для сравнения на рисунке 3 приведены СКО ( $\sigma$ ) для линии СР-РТ<sub>2</sub> (Рисунок 3, зона 2).

В отличие от классического метода, при нивелировании по трем маршрутам значения стандартного отклонения полу-

чилились в 2-3 раза меньше, причем это отмечено во всех трех зонах, что говорит об эффективности метода.

**2. Создание высотной основы для территории с недостаточно развитой геодезической сетью, к которым относится Республика Ливан, для целей строительства зданий и сооружений возможно на основе разработанного алгоритма определения поправочных коэффициентов к нормальным высотам, получаемым по методу спутникового нивелирования.**

Полученные результаты геометрического нивелирования по трехмаршрутной схеме сравнили с данными спутникового нивелирования. При этом использовалась модель Земли EGM2008. Результаты (Рисунок 4) показали, что спутниковое нивелирование (на основе EGM2008) требует уточнения и недостаточно, причем это относится к зонам в Ливане с различным рельефом и равнинного (а), предгорный (б) и горного (в). Видно, по графикам, что на равнинном рельефе аномалии  $\xi$  меньше, определенных по модели EGM2008, в предгорных районах они становятся близкими и в горных меняются по величинам. Эта установленная зависимость может быть использована при расчете поправочного коэффициента с целью его применения для других территорий Ливана.

При решении вопроса об определении нормальных высот необходим контроль уклонения отвесной линии (УОЛ). Предварительная оценка для района полигона показала высокие значения отклонения отвеса. Особенно оно велико в компоненте восток-запад ( $\eta$ ), по сравнению с другими похожими исследованиями в разных странах. Это говорит о наличии гравитационного влияния и необходимости контроля вертикальности при расчетах высот.

Результаты расчетов компонентов уклонений отвесной линии (таблица 1) показали небольшое различие при сравнении точек полигонов (зон А, Б, В) на поверхности эллипсоида и

модели Земли EGM2008. Однако разница оказалось еще более меньшей для компонент уклонений отвесной линии нормальных высот на квазигеоиде, что указывает на большую их согласованность и надежность.

Таблица 1 – Результаты расчетов УОЛ: компоненты уклонения север-юг ( $\xi$ ) и восток-запад ( $\eta$ ) в секундах

Зоны		Эллипсоид	EGM2008	$H^N$
А	$\xi$	$-3,1945 \pm 0,1518$	$-3,1949 \pm 0,1517$	$-2,4453 \pm 0,1107$
	$\eta$	$-12,1908 \pm 0,0617$	$-12,1922 \pm 0,0617$	$-12,4847 \pm 0,0449$
Б	$\xi$	$7,8072 \pm 0,0026$	$7,8075 \pm 0,0027$	$6,2326 \pm 0,0026$
	$\eta$	$-26,3472 \pm 0,0028$	$-26,3482 \pm 0,0028$	$-23,8877 \pm 0,0016$
В	$\xi$	$9,4059 \pm 0,0018$	$9,4062 \pm 0,0038$	$8,4206 \pm 0,0017$
	$\eta$	$-12,2856 \pm 0,0159$	$-12,2860 \pm 0,0159$	$-12,4414 \pm 0,0086$

Проведен расчет поправочного коэффициента для его последующего практического применения в инженерных расчетах при определении нормальной высоты. Коэффициент определяется как отношение аномалии высоты точки на квазигеоиде к аномалии, определенной по технологии спутникового нивелирования (с применением модели EGM2008). Затем эти коэффициенты используются при вычислении нормальных высот и интерполяции при выявлении высот неизвестных точек в соответствующей зоне. При этом используется метод интерполяции IDW – метод обратных взвешенных расстояний.

Значения высот неизвестных точек рассчитывались по формуле (1):

$$H_p = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{H_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}}, \quad (1)$$

где  $H_p$  – неизвестная высота любой точки,

$H_i$  – известная высота,

$d_i$  – расстояние между известной и неизвестной точками.

Методика интерполирования по IDW методу состоит в следующем. Вся рассматриваемая область (поле точек с известными высотами) разбивается на четырехугольники. Для определения высоты произвольной точки в пределах рассматриваемой области необходимо определить четырехугольник, которому принадлежит точка. Идентификация выполняется путем сравнения его площади (Рисунок 5). Для дополнительной проверки рассчитываются еще и площади треугольников, его образующих.

Разработана программа (получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024618642, 15.04.2024. Заявка от 27.03.2024), позволяющая определять адрес каждого четырехугольника. При этом его площадь автоматически рассчитывается по формуле (2):

$$A = \frac{1}{2} |M - N|, \quad (2)$$

где

$$M = X_1Y_2 + X_2Y_3 + X_3Y_4 + \dots + X_nY_1, \quad (3)$$

$$N = Y_1X_2 + Y_2X_3 + Y_3X_4 + \dots + Y_nX_1, \quad (4)$$

Площадь четырех образовавшихся треугольников автоматически рассчитывается по формуле (5):

$$A = \frac{1}{2} |X_1(Y_2 - Y_3) + X_2(Y_3 - Y_1) + X_3(Y_1 - Y_2)|, \quad (5)$$

После нахождения искомого четырехугольника для искомой точки рассчитывается поправочный коэффициент (уравнение 1).

В результате проведенной интерполяции для трех зон созданы пространственные графики. На рисунке 6 приведен график для зоны Б. Созданная численная поверхность (номограмма) позволяет пользователям по результатам ГНСС определений плановых координат найти для любой точки поправочный коэффициент для определения нормальной высоты этой точки. IDW метод позволяет также определить веса

определяемым отметкам на основе расстояний до исходных точек.

Выполнена проверка точности определения нормальных высот с помощью полученного объемного графика (номограммы, Рисунок 6). В пределах упомянутых трех зон выбраны 12 контрольных точек с известными нормальными и геодезическими высотами, для которых определены нормальные высоты по разработанной методике. На рисунке 7 показаны результаты сравнения, где  $\Delta 1$  соответствует разнице высот, которая может получиться по данным спутникового нивелирования (как разница геодезической высоты и аномалии высоты по модели Земли EGM2008), а  $\Delta 2$  соответствует разнице после применения разработанных поправочных коэффициентов. Можно увидеть, что полученные с помощью разработанных коэффициентов нормальные высоты имеют более высокую точность, что говорит об эффективности предлагаемой методики.

В диссертации показано, что методику интерполяции можно провести и для любых точек в Ливане. При этом исходными будут точки, принадлежащие зонам А, Б и В, а искомыми точки, находящиеся между этими зонами.

Проведена реализация разработанной методики на промышленных объектах в Ливане, показавшая перспективность предложенной методики.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертации на основе проведенных автором исследований решена научная задача разработки методики определения нормальных высот, представляющая собой актуальную, завершённую квалификационную работу.

По результатам выполненной диссертационной работы сделаны следующие основные выводы и рекомендации:

1. Разработана технология создания модели квазигеоида для Республики Ливан, основанная на использовании ГНСС



измерений и многоходового нивелирования, и позволяющая определять нормальные высоты методом спутникового нивелирования, дополненного поправочными коэффициентами.

2. Использование метода геометрического нивелирования, проведенного по нескольким взаимосвязанным маршрутам, повышает точность определения высот локального квазигеоида в два и более раз в зависимости от рельефа местности.

3. Создание высотной основы для территории с недостаточно развитой геодезической сетью, к которым относится Республика Ливан, для целей строительства зданий и сооружений возможно на основе разработанного алгоритма определения поправочных коэффициентов к нормальным высотам, получаемым по методу спутникового нивелирования.

4. Разработанные методика расчетов поправочного коэффициента, схема технологии многоходового геометрического нивелирования и рекомендации по их применению прошли тестирование на практике. Получен акт внедрения практических рекомендаций.

5. Предложения по дальнейшим исследованиям включают расширение применения разработанной методологии для охвата дополнительных регионов Ливана с использованием метода интерполяции IDW. Распространив методологию на большее количество регионов, исследователи смогут повысить ее надежность и точность, обеспечивая более полное применение в Ливане.

#### **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. Мустафин, М.Г. Использование методики спутникового нивелирования при создании высотной сети на территории Ливана / М.Г. Мустафин, Х.И. Мусса, М.Р. Аббуд, А.Х.

Джаллул // Вестник СГУГиТ. – 2023. – Т. 28. – № 3. – С. 23–32.  
DOI: 10.33764/2411-1759-2023-28-3-23-32.

2. Мустафин, М.Г. Методика построения модели локального квазигеоида на территории Ливана / М.Г. Мустафин, Х.И. Мусса // Вестник СГУГиТ. – 2024. – Т. 29. – № 2. – С. 5–16.  
DOI: 10.33764/2411-1759-2024-29-2-5-16.

3. Мустафин, М.Г. Результаты применения методики создания высотной основы с использованием локальной модели квазигеоида / М.Г. Мустафин, Х.И. Мусса // Геодезия и картография. – 2024. – № 3. – С. 6–13. DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1005-3-6-13.

*Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:*

4. Mustafin, M.G. Accurate Height Determination in Uneven Terrains with Integration of Global Navigation Satellite System Technology and Geometric Levelling: A Case Study in Lebanon / M.G. Mustafin, H. Moussa // Computation. – 2024. – Т. 12. – № 3. – P. 58. DOI: 10.3390/computation12030058.

*Публикации в прочих изданиях:*

5. Mustafin M.G. The Determination of Plumb Line Deviation Using Satellite/Levelling Technique / M.G. Mustafin, H. Moussa // Proceedings of the International Conference on Geosynthetics and Environmental Engineering. South Korea. – 2023. – Vol. 374. – pp. 37–47. DOI: 10.1007/978-981-99-4229-9\_4.

6. Moussa, H. Establishing a 3D model and digital documentation of Beaufort castle by using GPS, 3D laser scanning and digital photogrammetry / H. Moussa, M. Abboud // XVI International forum-contest of students and young researchers. St. Petersburg. – 2020. – Vol. 1. – pp. 360-362. eLIBRARY ID: 44607270.

7. Moussa, H. Detection of forest fire in El Meshref area and its surrounding / H. Moussa, M. Abboud, M. Nasrullah // XVII International Forum-Contest of Students and Young Researchers. St.

Petersburg. – 2021. – Vol. 1. – pp. 237-238. eLIBRARY ID: 7716889.

*Свидетельство на объект интеллектуальной собственности:*

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024618642. Программа для получения аномалий высот методом ГНСС/нивелирования и EGM2008. Заявка № 2024616117: заявл. 27.03.2024, опубл. 15.04.2024 / М.Г. Мустафин, Х.И. Мусса; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

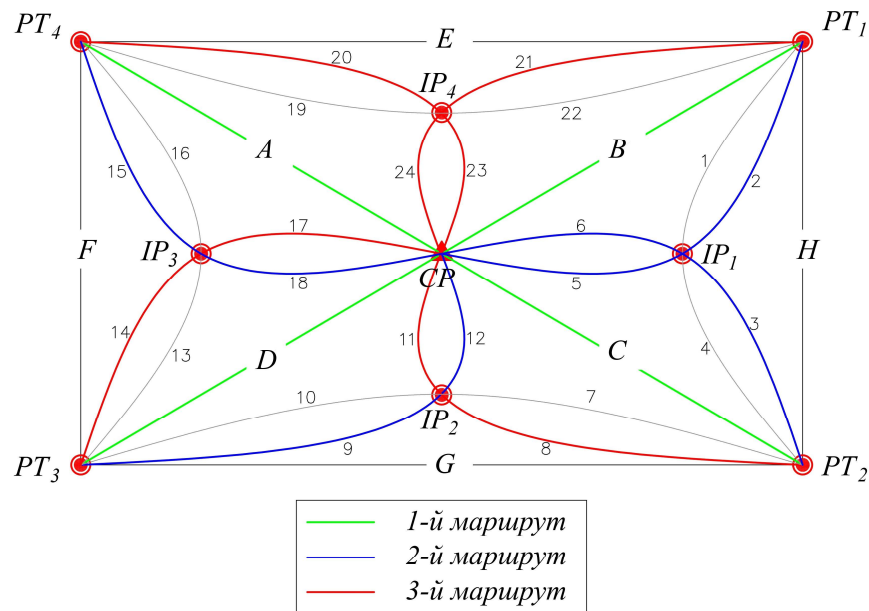


Рисунок 1 – Схема нивелирного полигона

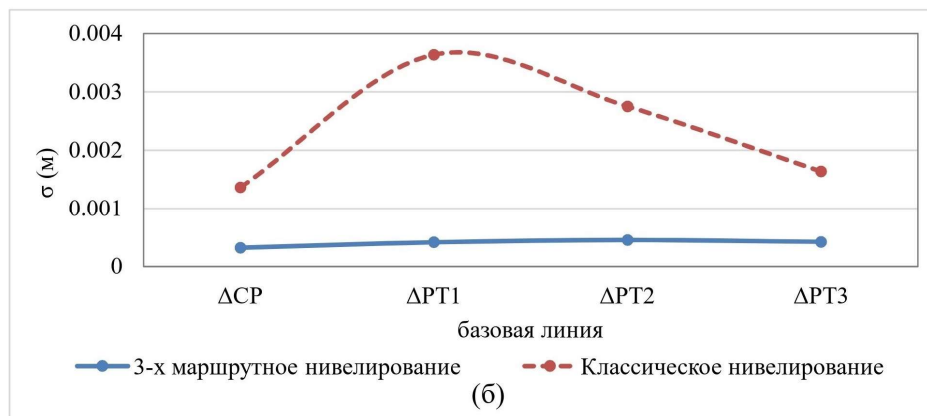


Рисунок 3 – График, показывающий рассчитанное стандартное отклонение для обоих методов: классического нивелирования и трехмаршрутного нивелирования во второй зоне (б)

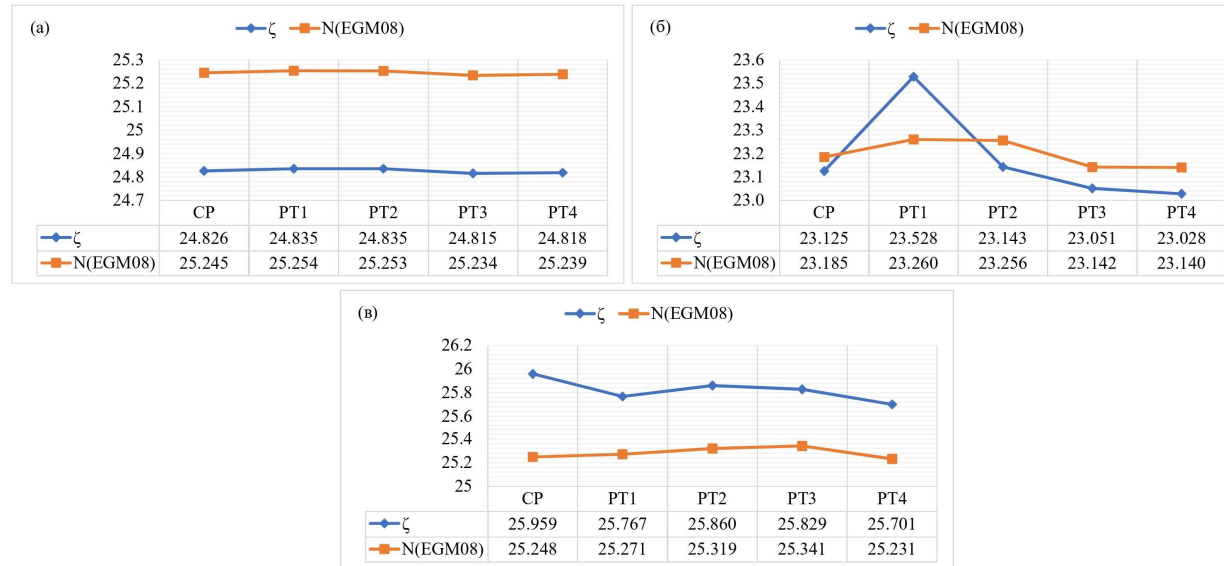


Рисунок 4 – Графики аномалий высоты для трех зон Ливана, определенные на основе спутникового нивелирования (модель EGM2008) и геометрического нивелирования ( $\zeta$ )

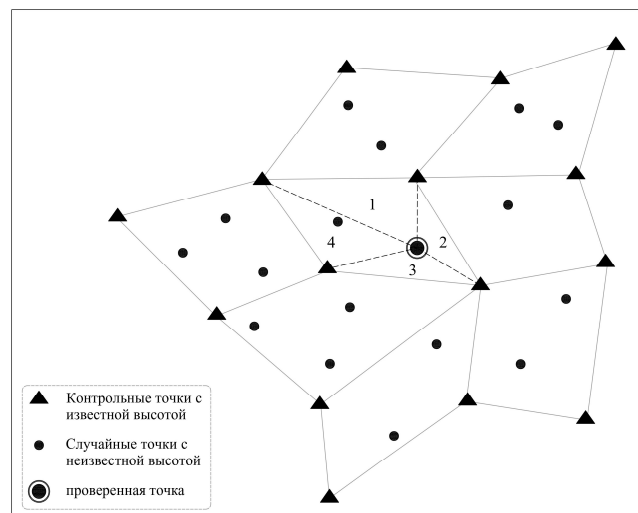


Рисунок 5 – Схема к использованию метода IDW

Поверхность корректора для зоны (Б)

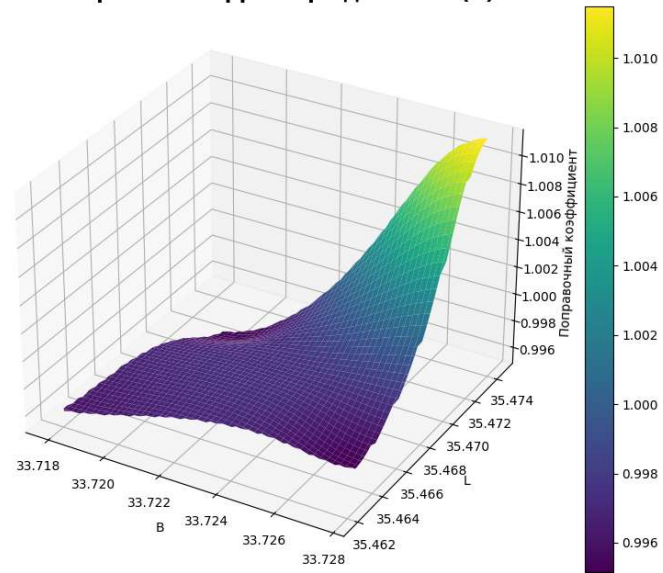
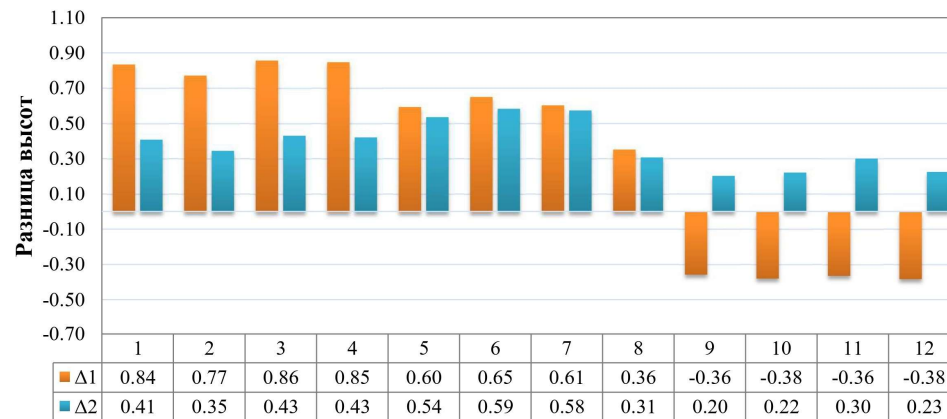


Рисунок 6 – Интерполяционная поверхность зоны Б



Контрольные точки

Рисунок 7 – Гистограмма нормальных высот (Δ1 - разница высот до применения разработанного коэффициента, Δ2 - после применения)