

На правах рукописи

Насруллах Мохамад



**ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПУТНИКОВОЙ
СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ
ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЕЙ СПЕЦИАЛЬНОГО
НАЗНАЧЕНИЯ В РЕСПУБЛИКЕ ЛИВАН**

Специальность 1.6.22. Геодезия

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

Санкт-Петербург – 2025

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:

Долгополов Даниил Валентинович

доктор технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта», лаборатория разработки и ведения геоинформационных систем и баз данных центра мониторинга и геоинформационных систем объектов трубопроводного транспорта, ведущий научный сотрудник;

Куприянов Андрей Олегович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии», кафедра прикладной геодезии, заведующий кафедрой;

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **23 сентября 2025 г. в 13:00** на заседании диссертационного совета ГУ.2 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.

Автореферат разослан 23 июля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КУЗИН
Антон Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Геодезическая сеть Ливанской Республики построена много лет назад со значительными ошибками, что не позволяет ее использование в качестве основы для строительства. Это обстоятельство весьма сильно затрудняет развитие строительства в разных сферах народного хозяйства.

Необеспеченность пространственными данными усложняет не только градостроительное планирование, но и в целом развитие инфраструктуры и управление окружающей средой. Проблемой в этой связи является неточность публичной кадастровой карты. В результате возникают многочисленные споры относительно расположения границ объектов недвижимости. Надо заметить, что вопрос о приведении в единую координатную сеть местные координатные системы во многом актуален и для России.

В свете этих вызовов возникает необходимость создания или корректирования существующей геодезической сети. Дело осложняется неблагоприятной обстановкой в Ливанской Республике. Но, несмотря ни на что, надо браться за дело. Бурное развитие технологий спутниковых определений и в целом геодезических средств измерений и результатов их обработки создает предпосылки для этого.

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) позволяют получать достаточно точные плановые координаты. Вместе с тем доступность оборудования, программного обеспечения и наличие специально подготовленного кадрового потенциала пока являются серьезным препятствием. На данном этапе с использованием ГНСС-технологии возможно путем определения координат на локальных участках Ливана и скорректировать существующую геодезическую сеть. Вопрос состоит в определении количества таких участков, разработке

алгоритма обработки данных для повышения точности положения пунктов, корректирующей интерполяции и, в конечном итоге, обеспечения геодезической плановой основы для строительства и единого координирования кадастровых планов территории Ливана. Решение этих вопросов, безусловно, актуально.

Степень разработанности темы исследования

В работах Антоновича К.М., Брыня М.Я., Виноградова А.В., Вдовина В.С., Гиенко Е. Г., Голубева А.Н., Горобеца В.П., Дворкина В.В., Карпика А.П., Кушнир А.А., Мазурова Б.Т., Майорова А. Н., Побединского Г.Г., Сурнина Ю.В., Долгополова Д.В. Куприянова А.О., Амброджио М.М., Паоло Д., Нила Г., Камалья П., Саида Ф., Абдолрезы С., Марии К., Сантьяго Б., Тобиаса Н. и др. проведены результаты исследований по использованию глобальных навигационных спутниковых систем. Показана точность статических и кинематических измерений при решении различных практических задач. Вместе с тем универсальной методики оценки и корректирования существующих сетей с использованием ограниченного покрытия территории спутниковыми определениями повышенной точности пока не разработано.

Объект исследования – геодезическая плановая сеть и ее точностные параметры.

Предмет исследования – методы оценки точности и преобразования координат пунктов геодезических сетей.

Цель работы

Обеспечение точности планового положения пунктов геодезической сети в Ливанской Республике для нужд строительства и кадастра на основе применения спутниковой технологии позиционирования на репрезентативных участках.

Идея заключается в использовании технологии спутникового позиционирования повышенной точности на репрезентативных участках территории Ливанской Республики, расчет их количества, обработку результатов измерений, трансформирование координат с одной системы в другую по параметрам Гельмерта и интерполирование для формирования единой скорректированной геодезической сети.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения следующих задач:

1. Анализ состояния изученности проблемы построения геодезических сетей с использованием технологии спутникового позиционирования;

2. Разработка методики натурных измерений и общей концепции корректирования геодезических сетей;

3. Проведение полевых работ, обработка результатов измерений и построение скорректированной модели геодезической сети;

4. Разработка практических рекомендаций по использованию методики построения и совершенствования геодезической сети в Ливане.

Научная новизна работы:

1. Зависимости точности скорректированного планового положения пунктов существующей геодезической сети от количества и расположение мест проведения сеансов спутниковых определений.

2. Модель плановой геодезической сети для нужд строительства и кадастра для Ливанской Республики.

Соответствие паспорту специальности

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 1.6.22. Геодезия по пунктам:

3. Создание и развитие геодезической координатно-временной основы различного назначения с использованием геоде-

зических, астрономических, гравиметрических и других (космических, наземных, подземных и подводных) методов измерений; оценка их стабильности и характера изменений, вопросы проектирования и оптимизации. Разработка и развитие теорий построения и реализации координатных, высотных и гравиметрических систем отсчета.

4. Геодезические (глобальные) навигационные спутниковые системы (ГНСС) и технологии. Формирование активной координатно-временной инфраструктуры на основе ГНСС. Методы и технологии высокоточного определения местоположения и навигации по сигналам спутниковых навигационных систем. Геодезические системы наземного, морского и космического базирования для определения местоположения и навигации подвижных объектов геопространства. Многосистемные и высокоскоростные (высокочастотные) ГНСС приложения. ГНСС рефлектометрия

9. Геодезический мониторинг напряженно-деформированного состояния земной коры и ее поверхности, вызванного природными и техногенными факторами, в том числе в сейсмоопасных и вулканических районах, в областях разработки полезных ископаемых, на подземных хранилищах газа и др. Исследования атмосферы, ионосферы и космической погоды с использованием спутниковых геодезических наблюдений.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Разработан алгоритм повышения точности пунктов геодезической сети на основе ее частичного покрытия данными спутниковых определений повышенной точности.

Разработана инженерная методика геодезических работ, позволяющая использовать существующую геодезическую сеть Левана для нужд строительства и кадастра. Результаты диссертационной работы используются в производственной деятельности ООО «Экоскан», что подтверждается соответствующим актом внедрения от 16.12.2024.

Методология и методы исследования.

Методология исследования состоит в анализе существующей геодезической плановой сети, создания ее математической модели. Адаптации к решению задачи о повышении точности геодезической сети ГНСС-технологии измерений. Проведение моделирования с вариацией количества и выбора мест проведения сеансов спутниковых определений. Определение параметров трансформирования системы координат и уравнивание всей геодезической сети. Достижение модели геодезической сети, отвечающей 3-4 классу точности. При выполнении исследования применялись следующие методы: МНК, статистического анализа, теории вероятностей, интерполяции, моделирования построения геодезических сетей (САПР).

На защиту выносятся следующие положения:

1. Корректирование существующих плановых геодезических сетей с целью повышения точности относительного положения ее пунктов целесообразно проводить на основе разработанной методики, включающей использование технологии спутникового позиционирования повышенной точности и расчет параметров трансформации Гельмерта, позволяющие формировать поправочные коэффициенты.

2. Обеспечение точности взаимного положения пунктов геодезической плановой сети Ливана, отвечающей 3-4 классам полигонометрии или трилатерации, достигается с применением не менее 5 кустов станций спутниковых определений, расположенных в репрезентативных районах, и проведением сеансов наблюдений в режиме статика с обработкой результатов по методу «точного позиционирования».

Степень достоверности результатов исследования подтверждается корректной постановкой цели и задач диссертационной работы, обсуждением основных результатов исследования на научных конференциях, согласованностью экспериментальных данных на реальных объектах с теоретическими

исследованиями с использованием современных методов сбора и обработки геопространственной информации. Достигнутые результаты согласуются с выводами, полученными другими отечественными и зарубежными исследователями.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: "Актуальные проблемы геодезии, картографии, кадастра, геоинформационных технологий, рационального земле- и природопользования" (Новополоцк-Беларусь, 2022 г.), XIX Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2023 г.), V всероссийская научно-практическая конференция "Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. Инновации в науке, образовании и производстве" (г. Санкт-Петербург, 2024 г.), Научная конференция студентов и аспирантов «Полезные ископаемые России и их освоение» (г. Санкт-Петербург, 2024 г.), XX Всероссийская конференция-конкурс студентов выпускного и аспирантов «актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2024 г.), IV Всероссийская научно-практическая конференция, посвященная ученому, заслуженному работнику геодезии и картографии, профессору В.И. Павлову «Управление объектами недвижимости и комплексное развитие территорий» (г. Санкт-Петербург, 2025 г.).

Личный вклад автора заключается в: участии в формулировании цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования; проведении геодезических съемок и инструментальных наблюдений в Ливанской Республике; расчете плановых координат и анализе позиционных ошибок и различий в геодезических сетях; анализе и систематизации полученных экспериментальных данных ГНСС; создании новых параметров преобразования координат на основе зонального подхода и раз-

деления на зоны; разработке алгоритмов для корреляции параметров на границах соседних зон с целью избегания несоответствий; анализе и обобщении результатов экспериментальных исследований; представлении результатов исследования на научных конференциях; написании научных публикаций по теме диссертации.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 6 печатных работах, в том числе в 2 статьях, опубликованных в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть представлены основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и доктора наук (далее – Перечень ВАК), а также в 3 статьях, опубликованных в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырёх глав с выводами по каждой из них, заключения и библиографического списка. Работа изложена на 143 страниц машинописного текста, содержит 33 рисунка, 22 таблицы, список литературы из 140 наименований и 2 приложения.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность научному руководителю д.т.н., доценту Мустафину М.Г. за ценные советы и наставления; преподавателям и сотрудникам кафедр инженерной геодезии и маркшейдерского дела Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II за всестороннюю помощь на каждом этапе исследования. Также автор благодарит руководство Ливанского международного университета за доверие и поддержку и, особенно, за предоставление специального геодезического оборудования и лаборатории для проведения и обработки всех необходимых измерений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи и научная новизна исследования, раскрыты теоретическая и практическая значимости, а также сформулированы основные показатели, характеризующие диссертацию.

В первой главе представлен анализ состояния изученности вопроса о построении плановых геодезических сетей. Выполнен детальный обзор истории их создания в Ливанской Республике. Обозначены причины их недостаточной позиционной точности. Также проведён обзор нормативной и технической документации, а также результатов разработок, на основе которых обосновывается актуальность диссертации. Определяются подходы к улучшению существующих методов создания геодезических сетей. Описываются характеристики и преимущества использования технологий ГНСС при создании и обновлении геодезических сетей. Приводятся способы улучшения и обновления существующих геодезических сетей в Ливанской Республике. На основе результатов анализа формулируются цель и задачи научного исследования.

Во второй главе разрабатывается методика применения спутниковых определений для уточнения существующих геодезических сетей. Проводится анализ ошибок положений пунктов геодезических сетей по результатам локальной проверки с использованием программного обеспечения TOPCON Magnet Tools и метода наименьших квадратов. Получило подтверждение наличие существенных ошибок в координатах пунктов существующих сетей, достигающих до 75 см. Предложено при обработке данных ГНСС измерений применение метода точного позиционирования (PPP). При этом подключается глобальный центр: Международная земная система отсчета (ITRF), где координаты определяются на эпоху измерений в общеземной системе отсчета. Далее тестируются три основных сервиса

обработки по PPP и принимается онлайн-сервис AUSPOS как наиболее эффективный. После разработки методики обработки результатов ГНСС измерений проведено моделирование для определения количества зон для территории Ливана, обеспечивающих уточнение плановых координат пунктов существующих сетей. В результате показано, что пять зон, распределенных по Ливанской Республике, в которых будут проведены сеансы ГНСС измерений обеспечат получение приемлемой точности для производства строительных и кадастровых работ.

В третьей главе выполнен выбор репрезентативных участков Ливанской Республики. В пяти принятых зонах проведены наблюдения по технологии ГНСС измерений. При этом обоснование получило время проведения сеансов в режиме статика: приблизительно три часа. Результаты измерений обработаны по разработанной методике с использованием сервисов точного позиционирования. Далее для каждой зоны определены параметры трансформации Гельмерта. Приведены результаты позиционных ошибок, которые существенно уточнили геодезическую сеть.

В четвертой главе разработана методика практического применения результатов исследования. Решен вопрос об однозначности плановых координат на границах зон. Эта проблема была решена с использованием метода интерполяции (IDW - обратных взвешенных расстояний). Разработаны практические рекомендации по применению созданной модели геодезической сети. Показаны примеры использования модели для нужд строительства и кадастра

В заключении сформулированы основные научные и практические выводы по работе.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Корректирование существующих плановых геодезических сетей с целью повышения точности относительного положения ее пунктов целесообразно проводить на основе разработанной методики, включающей использование технологии спутникового позиционирования повышенной точности и расчет параметров трансформации Гельмерта, позволяющие формировать поправочные коэффициенты.

С появлением технологий ГНСС точность определения координат точек на земной поверхности значительно возросла. В этой связи возобновились разработки методов создания и корректирования существующих геодезических сетей. При этом акцент придается алгоритмам преобразования координат из одной системы в другую.

На этом пути возникает много известных проблем. Главная из которых, это перевод геоцентрических координат на плоскую картографическую проекцию с минимизацией ошибок преобразования. Технология спутникового позиционирования является мощным инструментом создания и уточнения локальных систем координат, применяемых на национальном уровне. В то же время корректирование коэффициентов преобразования на региональном уровне довольно трудоемкая задача, требующая государственного участия и соответственно больших средств. В этих обстоятельствах возможно применение частного, выборочного корректирования района региональной области. Определения его эффективности и обобщения этой методики для всей территории.

В настоящем исследовании проведена оценка текущего состояния геодезических сетей в Ливане. Выполнен анализ геодезических работ и точечное тестирование: оценка точности существующей сети. Обнаружено, что позиционные различия пунктов сети существенны, особенно в сетях первого и второго уровня (Рисунок 1). Кроме того, показано, что применение кор-

ректирующих параметров в различных регионах приводит к сокращению позиционной ошибки пунктов существующей сети (Рисунок 2). Разработана методика для генерации параметров преобразования Гельмерта для Республики Ливан на основе подхода, состоящего в зональном делении, который позволит существенно уменьшить позиционные ошибки, существующие в действующих сетях (используются единые параметры преобразования для всей страны).

Суть разработанной методики состоит в следующем. Для генерирования параметров преобразования в каждой определенной зоне по технологии ГНСС определяются координаты четырех контрольных точек (Рисунок 3). При этом рассчитано использование приемников ГНСС в течение примерно трех часов в статическом режиме. Результаты наблюдений загружались в сервис точного позиционирования PPP (AUSPOS - это бесплатный онлайн-сервис обработки глобальной навигационной спутниковой системы Геонаучного агентства Австралии, который был выбран, так как обеспечивает высокую стабильность и точность результатов в системе ITRF). Статический режим является самым точным методом ГНСС, позволяя достичь точности в единицы миллиметров при хороших условиях. Метод PPP корректирует наблюдения ГНСС на основе Международной службы ГНСС (IGS), что повышает точность технологии GPS, предоставляя точные данные о орбитах спутников и временах их работы, которые собираются с глобальной сети отслеживающих станций. С использованием метода точного позиционирования получаются точные геоцентрические координаты контрольных точек в системе ITRF 2014.

Определен временной период статических измерений. Период в три часа выбран на основе результатов наблюдений. При нем погрешность координат для исследуемых контрольных точек не превышала 1,3 см по восточной координате, 1 см по северной координате и 3,7 см по эллипсоидальной высоте,

что является приемлемыми значениями для данного исследования. Подробная информация об измерениях приведена в таблице 1.

Для генерации семи параметров 3D-преобразования Гельмерта использовалась модель Бурсы-Вольфа в каждой зоне. Эта модель особенно подходит для преобразования координат при согласовании различных геодезических сетей или интеграции данных из различных наблюдений ГНСС. Модель Бурсы-Вольфа может строить различные сдвиги данных и адаптируется к широкому спектру геодезических сетей. Эта гибкость делает её подходящей для многих приложений в геодезии, включая специальные сети, которые могли подвергаться различным историческим изменениям, что делает её удобной для данного исследования.

Примененная в диссертации модель Бурсы-Вольфа поясняется выражением 1:

$$\begin{bmatrix} X_{ITRF2014} \\ Y_{ITRF2014} \\ Z_{ITRF2014} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{bmatrix} + m * R(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) * \begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где T_X , T_Y and T_Z - перемещения по осям X, Y и Z соответственно, m - масштабный коэффициент, X_L , Y_L и Z_L - локальные координаты точек эллипсоида Кларка 1880, R - матрица вращения, где α_1 , α_2 и α_3 соответствующие углы вращения вокруг осей X, Y и Z.

Выражение (1) можно представить в матричном виде: матрице проектирования «A», матрице наблюдений «L» и вектору неизвестных параметров «X»; матрица «A» записывается следующим образом (2):

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -Z_L & Y_L & X_L \\ 0 & 1 & 0 & Z_L & 0 & -X_L & Y_L \\ 0 & 0 & 1 & -Y_L & X_L & 0 & Z_L \end{bmatrix} \quad (2)$$

Тогда матрица «L» записывается как (3):

$$L = \begin{bmatrix} X_{ITRF2014} - X_L \\ Y_{ITRF2014} - Y_L \\ Z_{ITRF2014} - Z_L \end{bmatrix} \quad (3)$$

И матрица «X» таким образом записывается как (4):

$$X = \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \\ R_X \\ R_Y \\ R_Z \\ m \end{bmatrix} \quad (4)$$

Затем задача решается с помощью метода наименьших квадратов, который принимает известный вид (5):

$$AX = L + V_L, \quad (5)$$

где V_L - вектор ошибок.

Тогда неизвестные 7 параметров преобразования можно оценить, решив уравнение (6):

$$X = (A^T A)^{-1} (A^T L) \quad (6)$$

Вектор ошибок вычисляется с помощью уравнения (7):

$$V_L = AX - L \quad (7)$$

Сгенерированные параметры в каждой зоне приведены в таблице 2.

На основе приведенных выкладок доказано, что для Ливанской Республики достаточно для обеспечения точности, требуемой для строительства (геодезические сети третьего и четвертого класса), использования пяти зон, где должны быть проведены спутниковые определения с обработкой результатов наблюдений по приведенной методике обработки их результатов.

2. Обеспечение точности взаимного положения пунктов геодезической плановой сети Ливана, отвечающей 3-4 классам полигонометрии или трилатерации, достигается с

применением не менее 5 кустов станций спутниковых определений, расположенных в репрезентативных районах, и проведением сеансов наблюдений в режиме статика с обработкой результатов по методу «точного позиционирования».

Для реализации выявленного количества зон для Ливана, обеспечивающие покрытие для повышения точности геодезической сети, проведен выбор репрезентативных участков (Рисунок 3). Сгенерированные параметры Гельмерта для каждой зоны были протестированы с использованием контрольных точек, которые определены по описанной выше технологии ГНСС в статическом режиме на основе референсной системы ITRF 2014. После чего координаты были преобразованы в стереографическую систему (применяемая в Ливане плоская проекция геоцентрических координат) двумя способами: сначала по предлагаемой методике с использованием сгенерированных зональных параметров в зоне расположения каждой точки, и вторым способом, который используется в настоящее время — по параметрам, принятым для всего Ливана. Позиционные различия между двумя полученными результатами приведены на Рисунке 5. Видно, что различия существенны и точность определения координат выше более чем в 2 раза.

Решена еще одна локальная задача о сглаживании и принятии однозначных параметров на границах зон. Применена технология интерполирования, состоящая в расчете каждого из семи параметров для каждой точки, расположенной в этих областях. Использован метод интерполяции обратных расстояний (Inverse Distance Weighting, IDW), где основными факторами являются горизонтальные расстояния от точки до центроидов ближайших зон.

Метод IDW поясняется выражением 8:

$$\text{Весовой } P = \sum p_i * \frac{\frac{1}{w_i}}{\sum \frac{1}{w_i}}, \quad (8)$$

где P —параметр, который необходимо интерполировать (перевод, вращение или масштаб), “ i ” - номер зоны (1, 2, 3, 4 или 5), а “ w ” — вес влияния зоны, определяется из выражения 9:

$$w_i = \frac{d_i}{\sum d_i}, \quad (9)$$

где d_i —горизонтальное расстояние от искомой точки до центроида зоны, а $\sum d_i$ — это сумма всех горизонтальных расстояний.

Метод IDW был протестирован на 9 контрольных точках, расположенных на границах различных зон (Рисунок 4). Эти точки были измерены в статическом режиме, после чего их координаты были преобразованы в стереографическую систему с использованием параметров каждой из 2 соседних зон, а затем параметры были интерполированы для каждой точки. Результаты интерполяции показывают сокращение различий между координатами до среднего значения 6 см по оси x и 11 см по оси y при сравнении результатов интерполяции с зонами; эти различия являются удовлетворительными для использования на практике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена научная задача разработки методики локального применения спутниковой технологии позиционирования на репрезентативных участках Ливана для создания с использованием методов трансформации и интерполяции модели геодезической плановой сети, имеющей значение для развития прикладной геодезии в области строительства и кадастра.

На основе результатов исследований были сделаны следующие основные выводы и рекомендации:

1. На основе проведенного моделирования, включающего трансформацию геодезических сетей по параметрам Гельмерта, определено, что проведение в Ливане на пяти репрезентативных участках кустовых спутниковых определений обеспечит создание и корректирование геодезической сети.

2. Разработаны технологические схемы проведения натурных наблюдений. Выполнены серии сеансов наблюдений, в результате которых определены временные режимы измерений.

3. Разработаны алгоритмы для определения параметров преобразования с использованием метода точного позиционирования PPP и применения модели преобразования Гельмерта по методу Бурсы-Вольфа, что позволило построение модели геодезической сети, отвечающей 3-4 классу точности.

4. Разработан подход для интерполяции параметров преобразования на границах между зонами. Выбран метод взвешенных расстояний (IDW), тестирование которого на всех границах показало эффективность его применения.

5. Разработанная методика уточнения и построения сети специального назначения прошла проверку при решении конкретных производственных задач при строительстве и при определении границ зон земельных участков.

Дальнейшее развитие темы диссертации предполагает проведение исследований, направленных на разработку комплексной методики использования преобразования Гельмерта в трехмерной постановке.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Мустафин, М.Г. Методика создания и корректирования плановых геодезических сетей с использованием спутниковых определений и учетом разносистемных пунктов / М.Г. Мустафин, **М. Насруллах** // Маркшейдерский вестник. – 2024. – № 1 (151). – С. 41-47. EDN: WWCNTV.

2. Мустафин, М. Г. Опыт корректировки планового положения пунктов геодезической сети с использованием спутниковых определений и переводом координат на эллипсоид Кларка / М.Г. Мустафин, **М. Насруллах** // Вестник СГУГиТ. –

2024. – Т. 29, № 4. – С. 31–39. – DOI 10.33764/24111759-2024-29-4-31-39.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. Mustafin M.G. 3D Modeling of Sidon Sea Castle Utilizing Terrestrial Laser Scanner Combined with Photogrammetry / M.G. Mustafin, **M. Nasrullah**, M. Abboud // International Journal of Geoinformatics. – Т. 20, № 5. – Р. 28–39. – DOI: 10.52939/ijg.v20i5.3227.

4. Mustafin, M.G. A Comparative Analysis of GNSS Processing Services for Static Measurements: Evaluating Accuracy and Stability at Different Observation Periods / M.G. Mustafin, **M. Nasrullah**, M. Abboud // International Journal of Geoinformatics. – Т. 20, № 9. – Р. 112–121. – DOI: 10.52939/ijg.v20i9.3553

5. Mustafin, M.G. Estimating Coordinates Transformation Parameters from Global to Local Coordinates Systems in Lebanese Republic Based on Zonal Division / M.G. Mustafin, **M. Nasrullah** // International Journal of Engineering. – Т. 38, № 4. – Р. 796–806. – DOI: 10.5829/ije.2025.38.04a.11

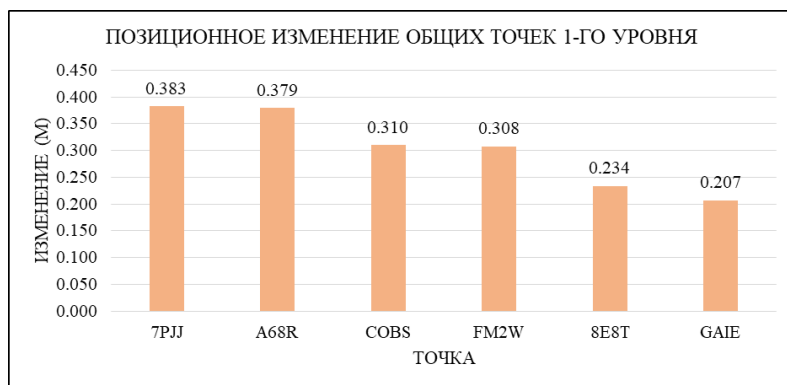
Публикации в прочих изданиях:

6. **Насруллах, М.С.** Влияние обновления международной системы земной привязки (itrf) на геоцентрические координаты, полученные с помощью точного позиционирования, в Ливане / М.С. Насруллах, М.Г. Мустафин // Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. Инновации в науке, образовании и производстве: Материалы V Всероссийской науч.-практ. конф. – 2024. – С. 142-148.

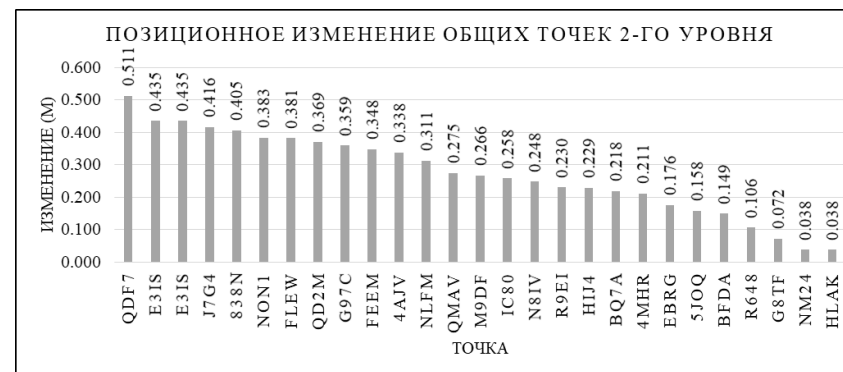
Свидетельство на объект интеллектуальной собственности:

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024662905. Программа преобразования геодезических координат в геоцентрические и проекционные координаты. Заявка № 2024661834: заявл. 27.05.2024: опубл.

31.05.2024 / М.Г. Мустафин, **М.С. Насруллах**; заявитель/право-
обладатель федеральное государственное бюджетное общеоб-
разовательное учреждение высшего образования «Санкт-Пе-
тербургский горный университет императрицы Екатерины II».



а)



б)

Рисунок 1 – Графики позиционных отличий общих точек: а – 1-го уровня; б – 2-го уровня.

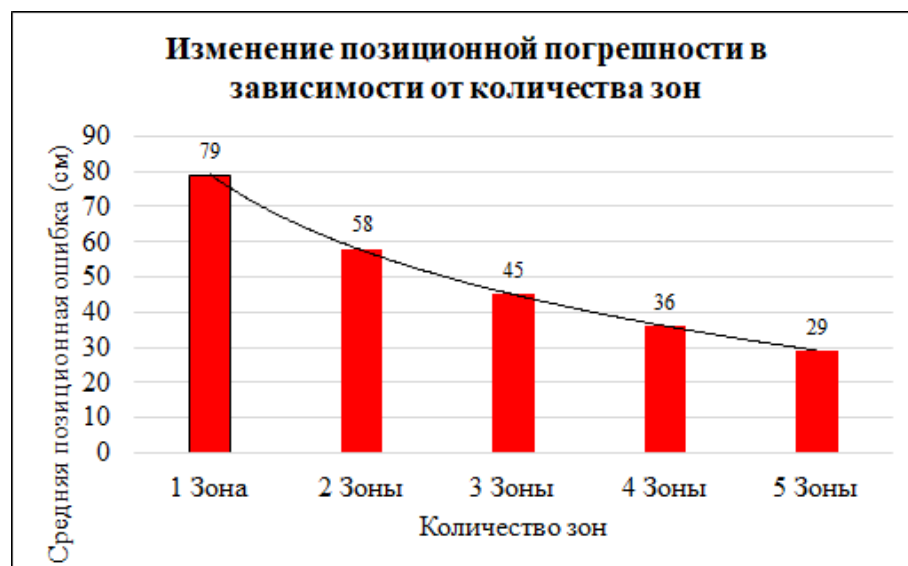


Рисунок 2 – График снижения позиционной ошибки в зависимости от количества зон

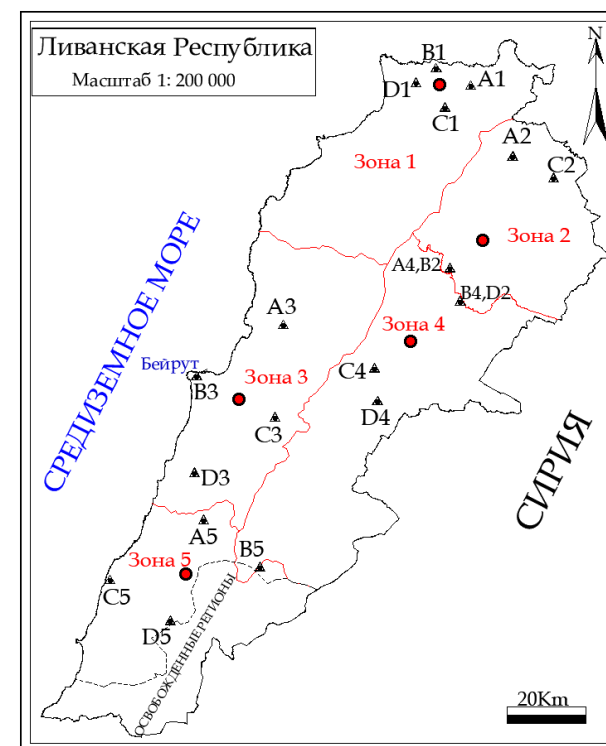


Рисунок 3 – Схема Ливана с предлагаемыми зонами и контрольными точками

Таблица 1 – Детали статических измерений

Точка	Дата измерения	Высота инструмента	Продолжительность измерения
A1	25/9/2021	1.080m	3:03:42
B1	25/9/2021	0.200m	2:58:17
C1	25/9/2021	0.200m	2:57:19
D1	25/9/2021	0.200m	3:02:41
A2	13/3/2023	1.442m	3:05:25
B2	4/4/2021	0.200m	3:03:34
C2	21/3/2021	0.200m	3:00:17
D2	21/3/2021	0.200m	2:53:09
A3	1/4/2023	0.200m	2:53:17
B3	30/4/2021	0.200m	3:14:30
C3	30/4/2021	0.300m	3:03:58
D3	4/30/2021	0.300m	3:20:55
A4	4/4/2021	0.200m	3:03:34
B4	21/3/2021	0.200m	2:53:09
C4	4/4/2021	0.200m	3:07:07
D4	28/3/2021	1.560m	3:21:17
A5	30/4/2021	0.200m	3:05:58
B5	4/5/2021	0.300m	2:58:57
C5	4/5/2021	0.200m	2:52:56
D5	4/5/2021	0.200m	2:52:37

Таблица 2 – Сформировано 7 параметров трансформации для 5 зон

Параметр	Зона 1	Зона 2	Зона 3	Зона 4	Зона 5
TX (м)	173.8649	132.7729	63.73426	221.5674	6.420754
TY (м)	125.7209	96.61674	33.41938	142.0478	-4.631109
TZ (м)	-249.7648	-281.8231	-337.9305	-204.0017	-385.6347
RX "	-17.88677	-14.12985	-12.09317	-21.16097	-12.75016
RY "	-12.43455	-9.721754	-8.506588	-15.25291	-8.837847

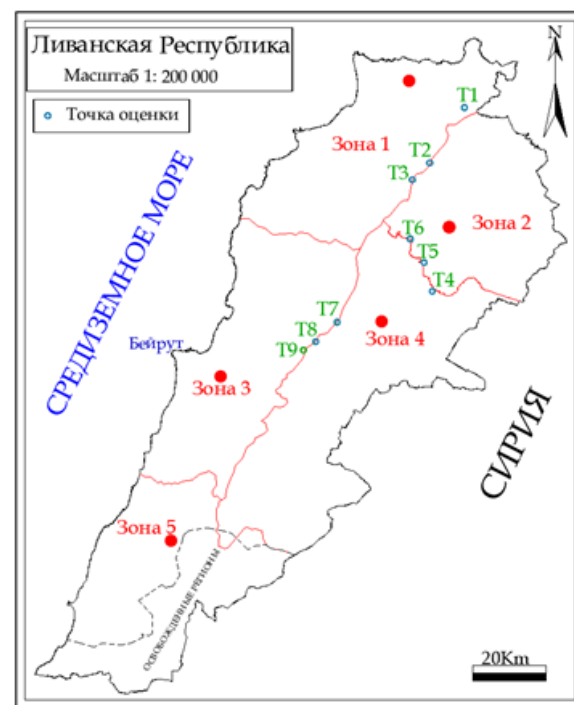
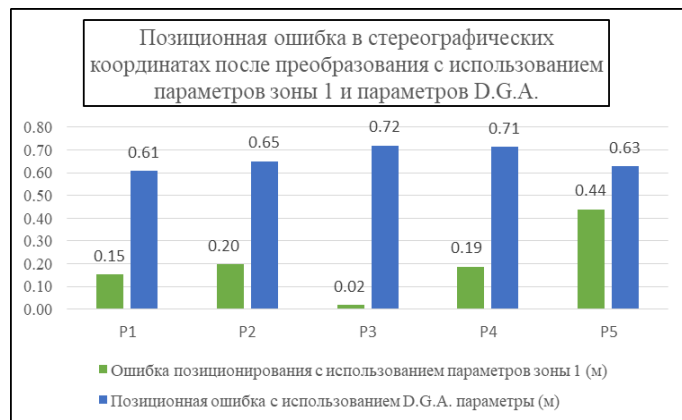
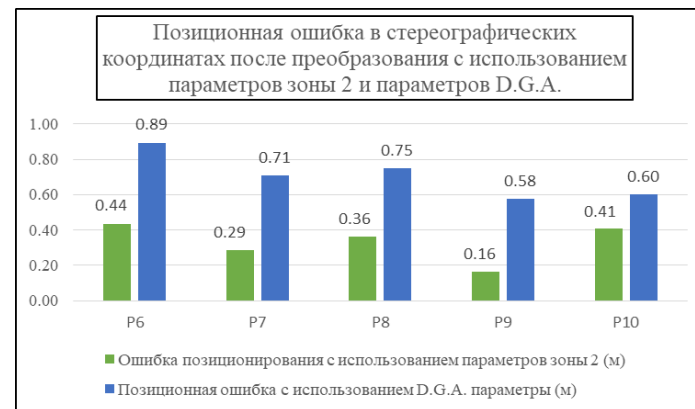


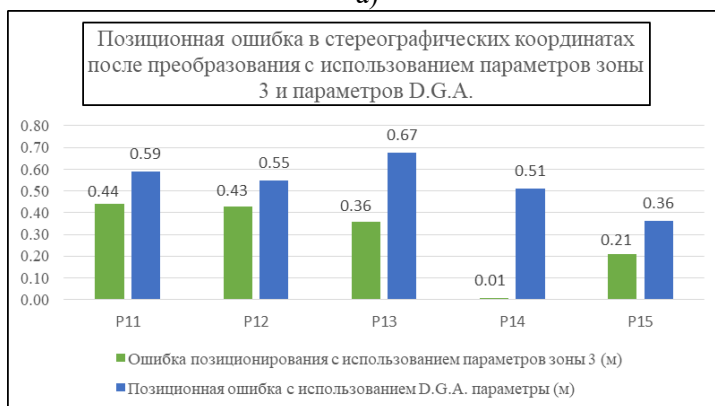
Рисунок 4 – Схема геодезических пунктов на границах зон 1, 2, 3 и 4



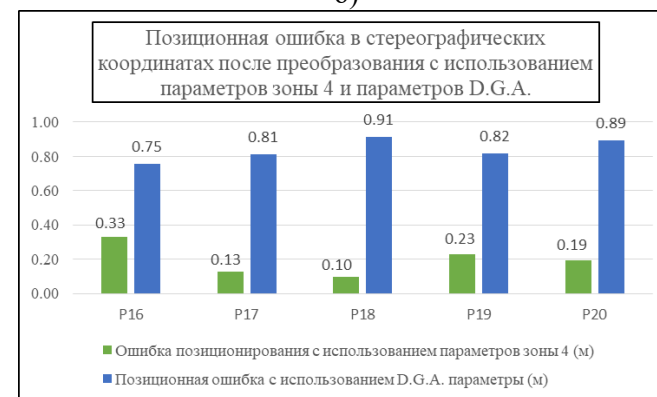
а)



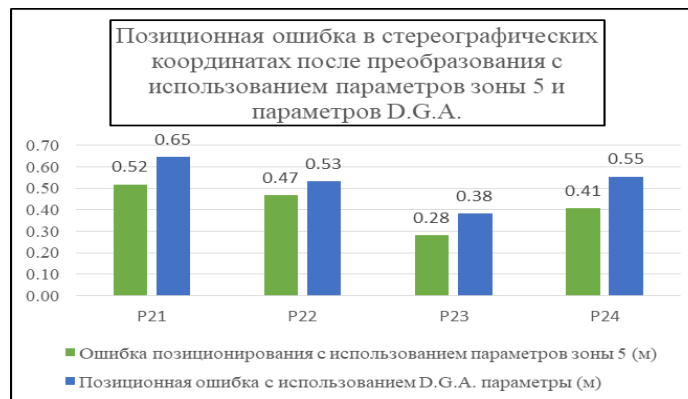
б)



в)



г)



д)

Рисунок 5 – Гистограмма распределения позиционной ошибки: а) в зоне 1; б) в зоне 2; в) в зоне 3; г) в зоне 4; д) в зоне 5.