

УДК 528.87

На правах рукописи

УРАЗАЛИЕВ АСЕТ СЕЙСЕНБЕКОВИЧ

**Модернизация местной геодезической сети города Алматы с применением
спутниковых и гравиметрических данных**

6D071100 - Геодезия

Диссертация на соискание степени доктора философии (PhD)

Научные консультанты

к.т.н., ассоц.профессор Мейрамбек Г.

PhD, ассоц.профессор, Шоганбекова Д.А.

Зарубежный научный консультант

PhD, Roman Shults

Алматы, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ	
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	
ВВЕДЕНИЕ	
1 СОСТОЯНИЕ МЕСТНОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЕТИ ГОРОДА АЛМАТЫ И АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПРОБЛЕМ	
1.1 Характеристика существующей геодезической сети Алматы	
1.2 Проблемы точности и устойчивости геодезической сети города Алматы в контексте современных геодинамических и техногенных процессов	
1.3 Выводы по первой главе	
2 СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ МОДЕРНИЗАЦИИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЕЙ	
2.1. Отечественный и зарубежный и опыт по обновлению местных геодезических сетей	
2.2. Спутниковые геодезические технологии (GNSS) в модернизации опорных сетей	
2.5 Выводы по третьей главе	
3 РЕКОГНОСЦИРОВКА И ОБСЛЕДОВАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ПУНКТОВ В ГОРОДЕ АЛМАТЫ. ПРОЦЕСС ОБРАБОТКИ И УРАВНИВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ.	
3.1. Рекогносцировка и обследование геодезических пунктов геодезической сети города Алматы	
3.2. Проведение спутниковых (GNSS) наблюдений на пунктах геодезической сети	
3.3. Обработка полученных спутниковых данных в программном комплексе GAMIT/GLOBK	
3.4. Уравнивание геодезической сети и получение высокоточных координат и высот пунктов	
4. МЕТОДЫ ТРАНСФОРМАЦИИ КООРДИНАТ МЕЖДУ WGS84 И МЕСТНОЙ СИСТЕМОЙ КООРДИНАТ (МСК) Г. АЛМАТЫ	
4.1 Метод Гельмерта	
4.2 Аффинное преобразование координат	
4.3 Полиномиальный метод трансформирования координат	
4.4 Сравнительный анализ точности методов и выбор оптимального преобразования для сети Алматы	
5 ПОСТРОЕНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ГЕОИДА ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА АЛМАТЫ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ И ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ	
5.1 Исходные данные для моделирования геоида	
5.2 Методика вычисления и построения локальной модели геоида	
5.3 Результаты построения геоида и оценка точности	
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	
ПРИЛОЖЕНИЯ	

СОКРАЩЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

CSH	– Classical Stokes –Helmert (Классический метод Стокс - Гельмерт)
DTE	– Direct topographic effect (Прямое топографическое влияние)
DWC	– аналитическое продолжение вниз
EGM2008	– Earth Gravitational Model 2008 (Гравитационная модель Земли 2008 г.)
EIGEN	– European Improved Gravity model of the Earth by New techniques (Европейская улучшенная модель гравитационного поля Земли с помощью новых методов)
GAMIT/GLOBK	– Прикладное ПО Масачусетского Технологического Института
GPS	– Global Positioning System (Глобальная система позиционирования)
GRACE	– Gravity Recovery and Climate Experiment (изучение гравитационного поля Земли и его временных вариаций, связанных с процессами изменения климата)
ICGEM	– International Centre for Global Earth Models (Международный центр глобальных моделей Земли)
IGS	– Международная служба ГНСС
ISG	– International Service for the Geoid (Международная служба геоида)
LSM	– Least square modification parameters (Параметры модификации методом наименьших квадратов)
LSMSA	– Least square modification of Stokes formula with additive corrections (Модификация формулы Стокса методом наименьших квадратов с аддитивными поправками)
RCR	– Remove-compute-restore (Удаление-вычисление-восстановление)
RINEX	– Международный формат спутниковых данных RINEX
SRTM	– Shuttle Radar Topography Mission (Радиолокационная топографическая миссия шаттла)
STD	– Standard deviation estimate (оценка стандартной отклонении)
SVD	– Singular value decomposition (Сингулярное разложение значения)
WGM2024	– World Gravity Map (Гравитационная карта мира)
WGS84	– World system of geodetic parameters of the Earth - 1984 (всемирная система геодезических параметров Земли 1984 года)

XGM2019	– Комбинированная модель глобального гравитационного поля.
ГГМ	– Глобальная гравитационная модель
ГНСС	– Глобальная навигационная спутниковая система
ГПЗ	– Гравитационное поле Земли
СШ	– северная широта
ЦМР	– Цифровая модель рельефа
ЮШ	– южная широта

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты.

1. Закон Республики Казахстан «О Науке» от 18.02.2011 г. №407-IV ЗРК;
2. Правила присуждения ученых степеней от 31 марта 2011 года №127;
3. ГКИНП (ГНТА)–12–004–07. ИНСТРУКЦИЯ ПО РАЗВИТИЮ СЪЕМОЧНОГО ОБОСНОВАНИЯ И СЪЕМКЕ СИТУАЦИИ И РЕЛЬЕФА С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ GPS И ГЛОНАСС;
4. ГКИНП (ГНТА)–01–020–09. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ О ГОСУДАРСТВЕННОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ И НИВЕЛИРНОЙ СЕТЯХ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН;
5. ГКИНП (ГНТА)–03–002–07. ИНСТРУКЦИЯ ПО НИВЕЛИРОВАНИЮ I, II, III и IV КЛАССОВ;
6. ГКИНП (ГНТА)–01–020–09. Основные положения о государственной геодезической и нивелирной сетях Республики Казахстан
7. ГОСТ 7.1-2003 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления

ВВЕДЕНИЕ

Оценка современного состояния решаемой научной или научно-технической проблемы.

Современные геодезические сети в крупных городах, особенно в сейсмически активных регионах, сталкиваются с проблемой устаревания инфраструктуры и необходимости повышения точности координатных измерений. Устаревшие системы координат, разработанные с использованием оптических методов (теодолиты и светодальномеры), не могут обеспечить необходимую точность при использовании современных высокоточных приборов, таких как ГНСС-приемники. Исследования показывают, что в условиях растущих требований к точности геодезических измерений оптимальным решением становится внедрение комплексных подходов с использованием спутниковых и гравиметрических данных, которые обеспечивают надежную связь между локальными системами координат и глобальной системой WGS84, что важно для городов с активной инфраструктурой, таких как Алматы.

Обоснование и исходные данные для разработки темы. Основой для разработки темы стали данные о высоких требованиях к точности геодезических измерений в условиях урбанизированного пространства и тектонически активного региона Алматы. Исходные данные включают архивные спутниковые наблюдения и наземные гравиметрические измерения, которые дают возможность разработать высокоточные методы трансформации координат и создать локальную модель геоида для города. Учитывая, что городская инфраструктура быстро развивается, а также с учетом сейсмических особенностей региона, модернизация существующей геодезической сети является экономически и технически обоснованным решением для поддержания точности пространственного позиционирования.

Обоснование необходимости проведения научно-исследовательской работы. Необходимость проведения данной научно-исследовательской работы обусловлена несоответствием существующей геодезической сети города Алматы современным требованиям точности. Внедрение спутниковых и гравиметрических данных в локальную геодезическую сеть решит проблему устаревших систем и повысит точность координат, что критически важно для выполнения инженерных проектов, обеспечения безопасности городской инфраструктуры и мониторинга деформаций земной поверхности. В условиях растущих потребностей города в высокоточном позиционировании данная работа имеет как научную, так и практическую значимость.

Сведения о планируемом научно-техническом уровне разработке, патентных исследованиях и выводы из них.

Планируемый научно-технический уровень разработки включает интеграцию

спутниковых и гравиметрических технологий для создания современной и точной локальной геодезической сети. Исследование учитывает передовые методы уравнивания и обработки GNSS-данных, а также методики построения локальных моделей геоида, используемые в международной практике. Проведенные патентные исследования показали отсутствие аналогичных решений для условий города Алматы, что позволяет разработать уникальную методологию интеграции спутниковых и гравиметрических данных для региональной модели геоида. Модернизация геодезической сети города Алматы необходима для повышения точности измерений, соответствующих стандартам современных геодезических инструментов и требованиям городской инфраструктуры. Необходимость разработки локальной модели геоида обусловлена экономической целесообразностью, так как она позволяет снизить затраты на нивелирование, переходя к более дешевым ГНСС-методам. Учитывая специфические условия Алматы, такие как высокая сейсмическая активность и неоднородность гравитационного поля, данная работа имеет важное значение для точного пространственного позиционирования, что критично для инженерных проектов и мониторинга состояния объектов.

Сведения о метрологическом обеспечении диссертации.

Метрологическое обеспечение данной диссертации будет включать сертификацию применяемых ГНСС-приемников, а также использование проверенного программного обеспечения (например, GAMIT/GLOBK) для уравнивания спутниковых данных и трансформации координат. Методы измерений и обработки данных будут проходить контроль качества в соответствии с международными стандартами. Также будут проведены тестирования точности и погрешностей, возникающих в процессе уравнивания спутниковых и гравиметрических данных, что обеспечит достоверность получаемых координат.

Связь с научно-исследовательскими работами и государственными программами.

Настоящая исследовательская работа проводится в рамках грантового проекта по программе «Жас ғалым» на 2023-2025 годы, направленного на поддержку фундаментальных и прикладных исследований молодых ученых – постдокторантов, научным руководителем которого является Уразалиев А.С. Также исследования по разработке модели геоида выполняются в рамках государственного заказа по приоритету «Информационные, коммуникационные и космические технологии» (программа 217 «Развитие науки», ИРН №BR21882366-ОТ-23 «Разработка модели геоида Республики Казахстан, как основа единой государственной системы координат и высот» на 2023-2025 годы) под руководством Касымкановой Х.М. Эти проекты способствуют развитию геодезической науки и практики, обеспечивая поддержку для модернизации геодезической сети города Алматы и всего Казахстана.

Актуальность темы. Модернизация локальной геодезической сети города Алматы является важной задачей для повышения точности пространственного позиционирования и обеспечения устойчивости геодезической инфраструктуры города. Быстрое развитие городской инфраструктуры, а также сейсмическая и тектоническая активность региона требуют регулярного обновления и улучшения точности геодезических измерений. В настоящее время решение современных задач в геодезии связано с высокими требованиями к точности геодезической сети. Существующая городская геодезическая сеть перестала соответствовать требованиям нормативно-технических документов, это тесно связано с появлением высокоточных геодезических инструментов (спутниковые приемники, электронные тахеометры и т.д.). Противоречия между точностью выполняемых измерений новыми инструментами и точностью, существующей местной городской геодезической сети связано с тем, что старые системы координат создавались с использованием другого оборудования, которые сильно уступают по техническим характеристикам (теодолиты, светодальномеры) и измерительных технологий. Учитывая вышеперечисленные факторы, правильным решением будет интеграция современных спутниковых технологий и данных гравиметрии, которые позволят значительно повысить точность высотных и горизонтальных координат, что необходимо для различных инженерных проектов, мониторинга деформаций земной поверхности и обеспечения безопасности городских сооружений. Также создание локальной модели геоида несет не только научно-практическую значимость, но и считается экономически целесообразным, так как построение модели геоида позволит заменить дорогостоящее, трудоемкое геометрическое нивелирование на более дешевые ГНСС методы.

Научная новизна исследования:

Разработан комплексный подход к модернизации геодезической сети Алматы на основе спутниковых и гравиметрических данных.

Получены новые параметры перехода с местной системы координат в WGS84 геодезической сети г. Алматы на основе обработки суточных статистических измерений на пунктах путем устранения неопределенностей позиционирования (ошибки часов, ионосферные задержки, учет приливов), также совместного уравнивания с глобальными станциями IGS, которое позволило определить координаты пунктов с высокой точностью.

Впервые создана локальная модель геоида для города Алматы, позволяющая получить точные значения ортометрических высот по спутниковым измерениям.

Цель исследования заключается в комплексной модернизации локальной геодезической сети города Алматы путем применения спутниковых технологий и гравиметрических данных для повышения точности пространственных координат. Комплекс предусматривает трансформацию координат между местной системой и глобальной системой

WGS84 и разработку локальной модели геоида с применением современных методов и технологий.

Объект и предмет исследования:

Объектом исследования выступает локальная геодезическая сеть города Алматы. Предметом исследования являются современные методы и технологии комплексной модернизации геодезической сети (вычисление параметров преобразования между системами координат, создание локальной модели геоида) с использованием спутниковых и гравиметрических данных.

Задачи исследования.

Для достижения цели диссертационного исследования поставлены следующие задачи:

Анализ текущего состояния геодезической сети города Алматы с целью выявления недостатков существующих методов и инструментов для обеспечения необходимой точности координатных определений в условиях городской среды и сейсмической активности.

Проведение уравнивания спутниковых наблюдений на пунктах геодезической сети города Алматы с использованием программного пакета GAMIT/GLOBK для повышения точности определения пространственных координат. Учет системных погрешностей, включая ионосферные задержки и влияние приливов, а также совместное уравнивание с глобальными станциями IGS.

Разработка переходных параметров между локальной системой координат и глобальной системой WGS84, учитывая неоднородность сетей. Исследование и выбор наилучших методов трансформации (Гельмерта, полиномиальная и конформная трансформации) для повышения точности преобразования.

Создание локальной модели геоида для города Алматы на основе наземных гравиметрических данных с учетом региональных особенностей гравитационного поля. Проведение сравнительного анализа точности полученной модели геоида с существующими глобальными моделями, такими как EGM2008.

Методы исследования:

Сбор архивных данных спутниковых наблюдений, координаты и высоты пунктов локальной геодезической сети из каталога, данные наземных гравиметрических измерений.

Уравнивание данных статистических спутниковых наблюдений, выполненных на пунктах геодезической сети г. Алматы в универсальном программном пакете GAMIT/GLOBK для повышения точности пространственных координат. Учитывая системные ошибки за ионосферные задержки, учет приливов и т.д. и совместного уравнивания с глобальными станциями IGS позволит определить координаты пунктов с высокой точностью.

Вычисление параметров перехода между местной системой координат и глобальной

системой WGS84 с учетом неоднородности сетей достигается применением различных методов трансформации: метод Гельмерта, полиномиальная и конформная трансформация и т.д. Оценка точности полученных результатов, выбор наиболее подходящего метода обеспечивающей высокую точность преобразования.

Разработка локальной модели геоида на основе наземных гравиметрических данных и методы гравиметрического моделирования, которая будет учитывать региональные особенностей гравитационного поля. Сравнительный анализ полученных результатов с существующими глобальными моделями геоида.

Научные положения, выносимые на защиту:

Модернизированная геодезическая сеть города Алматы с использованием спутниковых и гравиметрических данных, обеспечивающая повышенную точность пространственного позиционирования:

Новые параметры перехода между локальной системой координат и глобальным WGS84, которая обеспечивает высокую точность трансформации за счет устранения неопределенностей в позиционировании, совместного уравнивания с глобальными станциями IGS данных статистических спутниковых измерений и выбора оптимального метода преобразования с учетом неоднородности двух систем.

Локальная модель геоида для территории Алматы, позволяющая существенно повысить точность получения ортометрических высот по спутниковым измерениям, учитывающей локальные гравитационные аномалии.

Практическая значимость:

Результаты работы могут быть использованы в практической деятельности по модернизации и эксплуатации геодезической сети города Алматы. Созданная локальная модель геоида и новые параметры перехода между координатными системами будут полезны для повышения точности пространственных измерений в инженерных проектах, строительстве, мониторинге деформаций и других задачах, требующих высокой точности данных. Результаты научно-исследовательских работ могут использоваться в различных областях деятельности: РГП на ПХВ «НЦГПИ», управление земельных отношений г.Алматы, отечественные и международные научно-исследовательские организации по данному направлению, что способствует развитию экономики и повышению безопасности национальной инфраструктуры.

Теоретическая значимость. Исследование вносит вклад в развитие методов модернизации геодезических сетей с использованием спутниковых и гравиметрических данных, а также в разработку локальных моделей геоида. Созданная методология может быть использована для улучшения точности координатных систем в других регионах с

аналогичными условиями.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследований, подготовка информационной базы, расчетная часть, анализ и интерпретация полученных результатов, первичная обработка спутниковых наблюдений и их уравнивание, пересчет параметров перехода между локальной системой координат и WGS 84, создание модели геоида, написание статей и докторской диссертации.

Публикации и апробация работы. По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, из них: 2 статьи в журналах, входящих в базу данных Scopus (Процентиль - 36), 1 статья опубликована в международной конференции, которая входит в базу данных Scopus, 6 статей в журналах, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, обзора литературы, описания объекта и методов исследования, результатов и их обсуждения, заключения и списка использованных источников из 40 источников.

1 СОСТОЯНИЕ МЕСТНОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЕТИ ГОРОДА АЛМАТЫ И АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПРОБЛЕМ

1.1 Характеристика существующей геодезической сети Алматы

Геодезическая сеть города Алматы является неотъемлемой частью пространственной инфраструктуры страны, формируя нормативно закреплённую координатно-высотную основу, необходимую для решения широкого круга инженерно-геодезических, картографических, кадастровых и научно-исследовательских задач. Она обеспечивает получение метрологически воспроизводимых координат, которые служат исходной базой для геоинформационных систем, пространственного планирования, мониторинга деформационных процессов земной поверхности, проектирования инженерных сооружений и управления городской территорией. В условиях активной урбанизации, инженерной насыщенности и сейсмической подвижности региона геодезическая сеть города Алматы приобретает стратегическое значение для обеспечения инженерной безопасности и устойчивого развития.

В соответствии с Инструкцией по созданию, восстановлению и использованию первоначальной геодезической сети Республики Казахстан (ГКИНП РК 02-153-2006) [1] городские геодезические сети проектируются как продолжение государственной геодезической сети (ГГС РК) и строятся по многоуровневой иерархии точности с использованием методов триангуляции, полигонометрии, трилатерации и нивелирования. Дополнительными нормативными источниками являются строительные нормы СП РК 1.03-106-2013 [2], а также нормативно-технические документы: ГКИНП (ГНТА)–12–004–07 [3], ГКИНП (ГНТА)–01–020–09 [4], ГКИНП (ГНТА)–03–002–07 [5], регламентирующие разработку межевого обоснования, организацию государственных геодезических и нивелирных сетей и выполнение нивелирования I – IV классов. Кроме того, применяются международные стандарты ISO 19111:2019, ISO 19152:2012 и ГОСТ 7.1-2003. [6, 7]. Эти документы формируют нормативно-методическую базу, обеспечивающую техническую совместимость, юридическую надёжность и интеграцию геодезической информации в национальные и международные системы координат, включая WGS 84 и ITRF . Сеть также должна соответствовать требованиям Национальной инфраструктуры пространственных данных (NSDI) и рекомендациям FIG и UN - GGIM .

Исторически геодезическая сеть города Алматы была сформирована в середине XX века в составе Единой государственной геодезической сети СССР, охватывающей всю территорию бывшего Советского Союза. Первоначальные координаты пунктов определялись в системе СК-42, а высотные отметки – в Балтийской системе высот 1977 года. После обретения независимости Республика Казахстан унаследовала инфраструктуру ГГС, включив ее в национальную систему координат. С конца 1990-х годов, согласно отчетам КазНИИГАиК и КазАГП, в южных регионах Казахстана инициированы проекты по переходу на системы WGS 84 и ITRF на основе GPS-измерений и высокоточного спутникового позиционирования [10,11]. Пространственная согласованность и метрологическая прослеживаемость координат в городской сети играют важную роль при интеграции в цифровые платформы планирования, системы инженерного анализа и программы управления городской средой. Ее развитие и современное состояние формировались в рамках Государственной геодезической сети Республики Казахстан (ГГС РК), унаследованной от Единой государственной геодезической сети СССР, и отражают эволюцию методов определения пространственных координат - от классической триангуляции до спутниковой геодезии. Пространственное положение опорных точек обеспечивается в современных условиях на основе международной системы координат ITRF и национальной системы QazTRF 2023, утвержденной в соответствии с постановлением Правительства Республики Казахстан от 14 марта 2023 года № 208 [9].

Современные вызовы, вызванные интенсификацией градостроительной деятельности, расширением инженерной инфраструктуры, а также геодинамической подвижностью территории, требуют от геодезической сети г. Алматы соответствия нормативным параметрам

точности. В соответствии с требованиями СП РК 1.03-106-2013 и ГКИНП РК 02-153-2006 среднеквадратическая погрешность определения координат для пунктов I класса не должна превышать ± 5 мм в плане и ± 10 мм по высоте. Однако существующая конфигурация геодезической сети г. Алматы, сформированная в основном в середине XX века, не соответствует этим нормативным критериям из-за физической деградации значительной части пунктов, утраты первоначальных реперов, а также отсутствия современной уравнивающей обработки координат на основе повторных высокоточных измерений. Это особенно актуально для реализации задач точного позиционирования, геодинамического мониторинга и правового закрепления границ, где даже незначительные несоответствия координат могут привести к правовым спорам, техническим ошибкам и социальной напряженности.

Городская геодезическая сеть, как часть государственной геодезической сети Республики Казахстан (ГГС РК), функционирует в условиях реализации приоритетных направлений пространственного развития и цифровизации управления. Она является не только техническим средством определения пространственных координат, но и элементом правовой системы, обеспечивающим соответствие пространственных данных требованиям кадастрового и инженерного законодательства. При этом функции сети распространяются на все этапы жизненного цикла объекта: от проектирования до эксплуатации и мониторинга.

Геодезические сети специального назначения формируются как в государственных системах координат (СК-42, QazTRF 2023), так и в местных системах координат, определяемых для отдельных территорий площадью до 5000 км² или в пределах административного района, области, городской территории [7]. В таких системах начало координат отличается от начала государственной системы координат, что позволяет минимизировать локальные искажения при крупномасштабных изысканиях и инженерных работах.

Городские геодезические сети строятся по принципу «от общего к частному», аналогично государственным опорным сетям. Они иерархически делятся на классы в зависимости от точности, длины сторон и способа построения. Пункты более высоких классов располагаются на значительном расстоянии (десятки километров), что дает основу для последовательного сгущения сетями более низких классов [3].

Высокоточная городская геодезическая сеть предназначена для решения следующих задач:

- топографическая съемка и обновление планов всех масштабов;
- землеустройство, межевание, инвентаризация земельных участков;
- топографо-геодезические изыскания в городской среде;
- инженерная подготовка проектов строительства;
- геодезическое обеспечение мониторинга геодинамических процессов;
- обеспечение навигации для наземного и воздушного транспорта [1 3].

Геодезическая сеть города включает пункты плана и высотной основы, представленные в виде триангуляционных, полигонометрических и нивелирных сетей различных классов. Она состоит из пунктов триангуляции I - II классов, полигонометрических линий III - IV классов, геометрического нивелирования II - III классов, а также временных и локальных сетей, сформированных под конкретные проекты. Пункты располагаются как в черте города, так и на прилегающей территории, создавая каркас для дальнейшего уплотнения и застройки. На территории стран СНГ, в том числе и Казахстана, формирование геодезических сетей длительное время осуществлялось в рамках единой государственной системы координат. За последние десятилетия неоднократно менялись как классификация сетей (по типам и классам), так и нормативные требования к точности угловых, линейных и высотных измерений. Однако в условиях активной урбанизации, массового жилищного строительства, прокладки инженерных коммуникаций и дорожно-транспортной инфраструктуры значительная часть пунктов геодезической сети в черте городов была либо физически уничтожена, либо стала недоступной для практического использования.

По мере деградации пунктов опорной сети и утраты их эксплуатационных

характеристик возникла необходимость в создании в крупных административно-хозяйственных структурах собственных ведомственных сетей, зачастую строившихся без учета единой координатной базы. Такие локальные системы формировались на основе различных геодезических основ, плохо согласованных между собой как в плане, так и по высоте. Применялись различные локальные системы координат и нивелирные поверхности, что приводило к дроблению координатного пространства в пределах городской территории и нарушению принципа единого пространственного пространства [4].

В результате современная городская геодезическая сеть в ее первоначальном виде не в полной мере выполняет свою ключевую функцию — обеспечение точного и единообразного пространственного позиционирования в масштабе города. Возникла необходимость ее реконструкции и модернизации, направленной на восстановление утраченных пунктов, уточнение координат и обеспечение соответствия новой национальной системе координат QazTRF 2023.

Развитие спутниковых технологий, в частности использование глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), таких как GPS и ГЛОНАСС, создало предпосылки для пересмотра подходов к построению и актуализации городской геодезической сети. Использование спутниковых приемников позволило внедрить методы высокоточного определения координат, что потребовало разработки соответствующих методических и нормативных решений в части интеграции новых измерений с ранее существовавшими сетевыми структурами.

При проектировании и реконструкции городской геодезической сети с использованием спутниковых технологий необходимо учитывать следующие особенности :

- Во многих городах Республики Казахстан, в том числе в г. Алматы, действуют адаптированные к условиям физической поверхности местные системы координат, которые используются на крупномасштабных топографических и кадастровых планах;
- При проведении реконструкций, инвентаризации, межевания и других градостроительных и кадастровых работ необходимо соблюдать преемственность и правопреемственность местных систем координат;
- В мегаполисе имеются специализированные геодезические сети, ориентированные на строительство подземных сооружений (метрополитены);
- Параллельно существуют сети геодинамических наблюдений, отличающиеся по параметрам точности и целям применения от традиционных опорных геодезических сетей.

Учитывая перечисленные факторы, процесс модернизации городской геодезической сети требует не только актуализации координатной информации, но и реализации принципов системной интеграции локальных и глобальных геопространственных данных на основе единой государственной системы координат и стандартов метрологической прослеживаемости. Внедрение QazTRF 2023 требует актуализации существующих координатных регистров, обновления данных высот и плана, введения единых параметров преобразования, способных обеспечить точность и логическую преемственность между различными уровнями пространственной информации. При этом возникает задача актуализации вертикальной основы на основе гравиметрических измерений и построения уточненной модели геоида, что особенно актуально в условиях перехода к высокоточному нивелированию и цифровому обеспечению высот.

Геодезическая сеть города Алматы также имеет особое значение в контексте Алматинского геодинамического полигона (АГТП), функционирующего с 1970-х годов для изучения тектонической активности юго-восточного Казахстана. Согласно исследованиям Е.Н. Атрушкевича, С.М. Земцовой и других авторов [12, 13], пункты АГТП фиксируют горизонтальные и вертикальные смещения от 1 до 10 мм/год. Эти данные имеют принципиальное значение при проектировании объектов критической инфраструктуры, включая метрополитен, гидротехнические сооружения и высотное строительство. Учитывая, что г. Алматы находится в зоне активных разломов Северного Тянь-Шаня, регулярная проверка координат геодезических пунктов является не только научной, но и стратегической

инженерной задачей.

Международный опыт показывает, что такие преобразования повышают точность кадастровой, инженерной и научной информации. Например, в Германии и Польше внедрение ETRS 89 и трансформация координат с учетом тектонических движений сократили расхождения ведомственных данных и повысили надежность пространственного планирования. В России внедрение ГСК-2022 по модели ITRF также сопровождается созданием цифровых каталогов, параметров трансформации и открытых геопорталов. Эти примеры подтверждают, что модернизация геодезических сетей — не изолированная задача, а основа цифрового развития территорий.

В условиях г. Алматы модернизированная сеть обеспечит: унификацию координатных баз во всех инженерно-кадастровых проектах; воспроизводимую систему координат, независимую от ведомственной принадлежности исходных данных; основу для оценки и мониторинга геодинамической подвижности региона на высоком научном уровне; юридически устойчивую и нормативно признанную опорную сеть для целей градостроительства, кадастровой съемки, навигации и экстренных служб.

Таким образом, модернизация геодезической сети не ограничивается технической адаптацией к новым системам координат, а носит комплексный характер. Научная необходимость обусловлена тем, что без устойчивой опорной геодезической базы невозможно проведение надежного мониторинга деформационных процессов в сейсмоактивных районах, таких как г. Алматы. С точки зрения метрологии, введение единой системы координат позволяет унифицировать исходные геоданные, минимизировать погрешности преобразования и повысить точность пространственных решений до уровней, соответствующих стандартам ISO 19111 и FIG. Стандарты Сеть [6].

С практической точки зрения модернизация позволит сократить дублирование инженерных работ и обеспечить нормативную совместимость инженерной и кадастровой документации. Обоснованность перехода подтверждается международной практикой: в Польше после перехода на ЕТРФ 89 количество межведомственных несоответствий сократилось более чем на 60%, а в России в рамках внедрения ГСК-2022 формируется единый цифровой каталог координат, обязательный для всех ведомств. Такой подход позволяет сократить ошибки в инженерных проектах, повысить достоверность кадастровых данных и улучшить планирование инфраструктуры. [14, 15,16] .

Поэтому модернизация геодезической сети г. Алматы является неотъемлемой частью научно обоснованного развития городской геопространственной инфраструктуры, интегрированной в национальные и международные системы координат, в том числе программы ООН - GGIM , EuroGeographics и рекомендации Международной ассоциации геодезии (IAG). Это создает предпосылки для устойчивого пространственного развития города, обеспечения инженерной и социальной безопасности, а также повышения научной точности геодинамических исследований.

1.2 Проблемы точности и устойчивости геодезической сети города Алматы в контексте современных геодинамических и техногенных процессов

Поддержание пространственной и временной устойчивости координатной основы геодезических сетей в сейсмически активных и урбанизированных районах является одной из приоритетных задач современной геодезии и инженерной геодинамики. Особенно остро этот вопрос стоит для города Алматы, расположенного в пределах Северного Тянь-Шаня — тектонически активного региона, характеризующегося высокой плотностью как естественных, так и техногенных деформационных процессов [18], [19].

Одним из основных условий устойчивого функционирования геодезической сети на городской территории, особенно в тектонически активных зонах, является ее пространственная устойчивость во времени. В условиях г. Алматы, расположенного в пределах Северного Тянь-Шаня, пункты геодезической сети подвергаются воздействию комплекса факторов, вызывающих смещения и деформации. Эти воздействия классифицируются на три основные группы: сейсмические, тектонические и техногенные

(таблица 1).

Таблица 1 – Факторы, вызывающие деформацию геодезической сети города Алматы

Категория фактора	Источники влияния	Последствия для геодезической сети
Сейсмический	Землетрясения, афтершоки	Смещение точек, разрушение
тектонический	Движение плит, неотектоника	Накопленные горизонтальные и вертикальные деформации
Искусственно созданный	Строительство, метро, связь	Потеря очков, осадки, сдвиги

Сейсмические факторы. Это совокупность процессов, связанных с высвобождением упругой энергии, накопленной в недрах Земли, которая при достижении критических значений приводит к возникновению землетрясений. Сейсмическая энергия, реализуясь в виде сейсмических волн, воздействует на элементы инженерной инфраструктуры и непосредственно на пункты геодезических сетей. Колебательные и смещающие воздействия приводят к изменению планового и высотного положения опорных пунктов, а также к полной их потере. Для территории города Алматы, расположенной в зоне повышенной сейсмической опасности, эти факторы представляют одну из ведущих угроз устойчивости координатного базиса [20], [21].

Тектонические факторы. Это длительные деформационные процессы, происходящие в земной коре в результате межплитного взаимодействия. Они проявляются в виде пластических смещений, поднятий, опусканий и других форм неотектонических движений, наблюдаемых в течение длительного периода времени. Тектонические смещения, зафиксированные в Северном Тянь-Шане, могут достигать значений до 10–15 мм/год по горизонтали и до 5–8 мм/год по вертикали [18], [22]. Несмотря на свою относительно небольшую интенсивность по сравнению с сейсмическими событиями, тектонические процессы играют ключевую роль в формировании напряженного состояния литосферы, что в свою очередь определяет необходимость длительного мониторинга положения пунктов геодезической сети.

Техногенные факторы. К этой категории относятся различные воздействия, связанные с хозяйственной деятельностью человека. Среди них: масштабное строительство (включая глубокие котлованы и подземные сооружения), откачка или закачка грунтовых вод, прокладка и эксплуатация инженерных коммуникаций, транспортные нагрузки, динамические и вибрационные воздействия. Техногенные процессы вызывают как локальные, так и региональные деформации поверхности, особенно в высокоурбанизированных районах, таких как Алматы. Согласно исследованиям КазНИИГиК и анализу автора, на отдельных участках города амплитуда техногенных смещений достигает 20–35 мм/год [27], [28].

Геодинамическая обстановка на территории города Алматы формируется в условиях активных тектонических процессов, охватывающих северную часть Тянь-Шаня, где расположены крупные зоны разломов и напряженные участки литосферы. Эта территория входит в так называемую Тянь-Шаньскую зону сжатия — результат столкновения Индийской и Евразийской литосферных плит [22]. Возникающие здесь тектонические движения носят долговременный, кумулятивный характер и сопровождаются как горизонтальными, так и вертикальными смещениями земной поверхности, что представляет существенную угрозу пространственной устойчивости геодезических пунктов.

С точки зрения геофизических и геотектонических параметров Алматы находится в зоне концентрации полей тектонических напряжений, передаваемых через крупные региональные разломы: Северо-Тянь-Шаньский, Зайсан-Чу-Илийский и Алматинский. По результатам геодезических и спутниковых наблюдений последних двух десятилетий, в частности, проведенных Зубовичем А.В., Жантаевым Ж.Ш., Узбековым Р.Б., а также рядом

зарубежных авторов (Трифонов В.Г., Таппонье П., Хавенит Х.-Б. и др.), в районе Алматы фиксируются устойчивые горизонтальные смещения земной коры со скоростью около 12-15 мм/год. Вертикальные деформации выражены менее интенсивно, но на отдельных участках (особенно вблизи активных разломов и зон северо-восточной тектонической подвижности) достигают 5-8 мм/год [18], [22], [25].

Природа этих смещений сложная и обусловлена как тектоническими, так и неотектоническими движениями. Наиболее активны сдвиговые компоненты вдоль левосторонних трансформных разломов, что подтверждается как результатами геодезических измерений, так и данными дистанционного зондирования Земли (InSAR, DInSAR), выполненного в рамках программы космического мониторинга UN-SPIDER (2022–2024 гг.) [24], [34].

Исторические источники также указывают на высокую сейсмическую активность в этом районе. С конца XIX века в пределах города и его окрестностей произошло не менее пяти землетрясений магнитудой более 6,0. Наиболее разрушительным было Верненское землетрясение 28 мая 1887 года, магнитуда которого, по разным оценкам, составляла от 7,3 до 7,8. Оно сопровождалось разрушением практически всех кирпичных построек города, смещениями грунтового основания и образованием оползней в горных районах к югу от города [23].

За ним последовало Чиликское землетрясение (1889 г.), а в январе 1911 г. – Кеминское землетрясение, считающееся одним из сильнейших в регионе (магнитуда до 8,2). Это событие сопровождалось выраженными деформациями поверхности на площади более 5000 км². Были зафиксированы разрыхление грунта, оползневые процессы и разрывы, многие из которых находились в непосредственной близости от современного города Алматы. Эти землетрясения не только изменили рельеф, но и оказали долгосрочное влияние на устойчивость геодезической основы, что подтверждается ретроспективным анализом данных нивелирования и повторных триангуляций, проведенных в советский период [23], [25].

Современный этап геодинамической активности в регионе сопровождается менее разрушительными, но регулярными сейсмическими событиями. Так, землетрясение 1 мая 2011 г., хотя и имело сравнительно небольшую интенсивность (4–5 баллов по шкале MSK-64 в пределах г. Алматы), вызвало афтершоковую активность и послужило основой для оценки уязвимости городской застройки. В последние годы проводятся наблюдения за активностью Алматинского разлома, который проходит южнее центральной части города и имеет протяженность около 40 км. Сейсмическая активность в этой зоне классифицируется как «спящая», но потенциально способная генерировать разрушительные толчки [20], [21].

Особого внимания требует анализ геоморфологических условий. Геологическая среда в черте города представлена лессовыми, делювиальными и аллювиальными отложениями, которые характеризуются неоднородностью и высокой восприимчивостью к внешним воздействиям. Лессовые грунты, широко распространенные на северной окраине города, подвержены просадочным деформациям при увлажнении и вибродинамическом воздействии, что усиливает влияние вертикальных смещений, особенно в периоды паводков и техногенных нагрузок [31], [32].

Помимо природных факторов, существенное влияние на геодинамику оказывает антропогенное вмешательство. Активное строительство, изменение гидрогеологического режима, эксплуатация подземных коммуникаций, интенсивная транспортная нагрузка — все это приводит к образованию зон локальных техногенных деформаций. Современные урбанизированные территории, особенно такие, как Алматы, существенно подвержены влиянию антропогенных факторов, способствующих разрушению геодезической инфраструктуры. Масштабное строительство, активное развитие транспортной сети, инженерных коммуникаций, земляные и буровые работы становятся основными источниками пространственно-временной нестабильности пунктов геодезической сети. Наиболее интенсивное антропогенное воздействие наблюдается в центральных районах города, где фиксируется высокая плотность застройки, подземных коммуникаций и динамические

нагрузки. Нарушение гидрогеологического режима, связанное с откачкой подземных вод, вызывает просадочные деформации, по величине близкие к тем, которые фиксируются после сейсмических событий средней интенсивности. Например, расчеты на основе геомеханических моделей показывают, что амплитуда вертикальных смещений в результате строительных нагрузок может достигать величин, сопоставимых с деформациями от мощных землетрясений, особенно на территориях с лессовыми грунтами. Особое внимание следует уделять подземным коммуникациям — тоннелям метрополитена, коллекторным системам, дренажным трубопроводам. Их установка и эксплуатация сопровождаются локальными просадками, деформациями насыпи и повреждением структуры прилегающего массива, что приводит к нарушению целостности пунктов сети. Дополнительным негативным фактором являются вибрации, создаваемые транспортными средствами и инженерным оборудованием. Регулярные вибрации, особенно вблизи реперных пунктов, со временем нарушают устойчивость их положения. Практике КазНИИГиК известны многочисленные случаи полной утраты или деформации пунктов государственной геодезической сети. Например, при реконструкции проспекта Абая в 2019 году было демонтировано более 30% пунктов, ранее входивших в систему координат этой части города [7]. Исследования Калдыбаева А. (2020), Исакова Ш.Х., а также отчеты КазНИИГиК (2021) показывают, что амплитуда техногенных смещений в пределах городской застройки может достигать 30–35 мм в год [27], [28], [29].

Таким образом, геодинамическая модель Алматинского региона представляет собой сложную систему взаимодействующих природных и техногенных факторов. Геодезическая сеть, функционирующая в таких условиях, неизбежно испытывает пространственные деформации, что приводит к снижению точности координатной информации и потере долговременной устойчивости опорных пунктов. В связи с этим возникает необходимость формирования новой концепции организации геодезической сети на принципах динамического мониторинга. Такая сеть должна включать как стационарные пункты ГНСС, так и временные опорные станции, функционирующие в составе геодинамических полигонов. Комплексное использование спутниковых, гравиметрических и традиционных методов обеспечит актуальность координатной основы, ее интеграцию в современные системы отсчета и устойчивость к природным и техногенным воздействиям.

5 ПОСТРОЕНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ГЕОИДА ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА АЛМАТЫ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ И ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

5.1 Исходные данные для моделирования геоида

Астрономо-геодезическая информация является основополагающей при оценке абсолютной и относительной точности локальной модели геоида. Она включает в себя данные триангуляционных сетей, нивелирования и спутниковых наблюдений, которые совместно обеспечивают высокоточную основу для геодезических вычислений.

Триангуляционная сеть 1 класса представляет собой опорную сеть геодезических пунктов, используемую для точного определения координат на земной поверхности. Пункты триангуляции располагаются на значительном расстоянии друг от друга, образуя систему треугольников, что позволяет точно вычислять углы и расстояния между пунктами. В данной сети расстояния между пунктами могут составлять десятки километров, что обеспечивает точное взаимное положение пунктов для дальнейших расчетов [47]. Высокая точность триангуляционной сети 1 класса обеспечивается точными угловыми измерениями, которые проводятся с использованием современных геодезических приборов. Среднеквадратичная ошибка угловых измерений для триангуляционных сетей 1 класса обычно не превышает 1–2 угловые секунды, что гарантирует высокую точность координат. Эти данные являются основой для последующего уравнивания координат и расчета высотной аномалии, или высоты геоида [48]. Для повышения точности оценки локальной модели геоида, данные триангуляционных пунктов 1 класса использовали совместно с результатами статистических спутниковых наблюдений и нивелирования 2 класса. ГНСС/Нивелирование на пунктах АГС позволит высокоточно оценить созданную модель геоида и уменьшить возможные систематические ошибки [49].

В данном исследовании была использована линия нивелирования 2 класса, которая совмещена с триангуляционными пунктами 1 класса, что позволило получить точные данные о высотах пунктов для качественной оценки модели геоида. Линия нивелирования 2 класса характеризуется высокой точностью определения перепадов высот. В среднем, погрешность измерений на 1 км нивелирования составляет 2–3 мм, что обеспечивает высокое качество данных для геодезических расчетов [50]. Процесс нивелирования проводится методом двойного хода, который предполагает выполнение измерений в прямом и обратном направлении для устранения систематических ошибок и повышения точности результатов. Данные нивелирования играют ключевую роль в оценке точности высоты геоида. Полученные нормальные высоты в системе БСВ-77 также использовались с результатами спутниковых

наблюдений (эллипсоидальные высоты) с целью расчета аномалий высоты (высот квазигеоида) [51].

В данном исследовании было использовано 10 пунктов АГС (сети триангуляции 1 класса, совмещенные с линией нивелирования 2 класса), участвующих в оценке модели геоида/квазигеоида (рисунок 2.4).

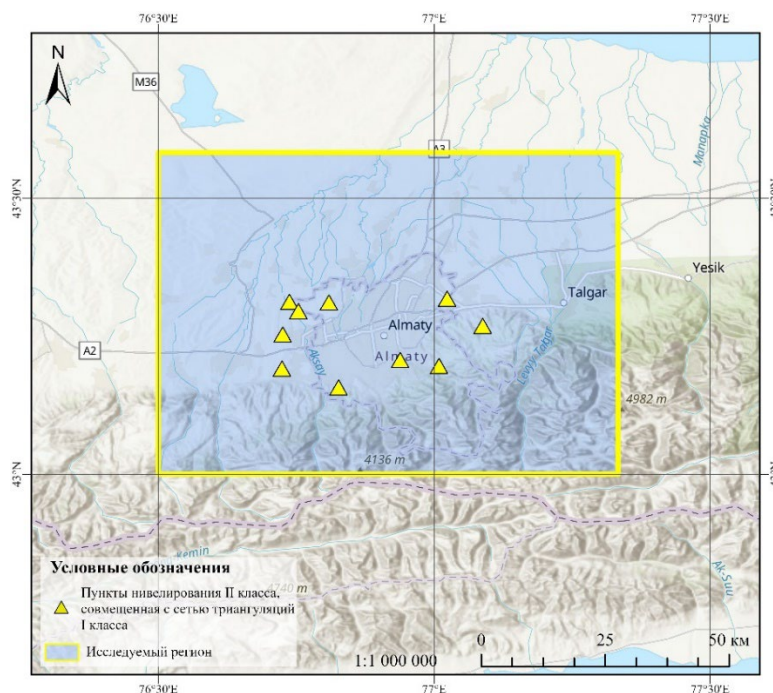


Рисунок 2.4 – Схема расположения пунктов АГС, участвующих в оценке локальной модели геоида

Пункты расположены преимущественно в городе Алматы и близлежащей территории. Были выписаны с БД значения нормальных высот в системе БСВ-77 для пунктов сети нивелирования 2 класса: Чибыл, Узбек, Горный гигант, Береговой, Карауылды, Каратумсык, Боролдай, Котырбулак, Курсай, Пригородный. Они расположены на территории с разнообразным рельефом, охватывающим как равнинные, так и горные участки. Средняя высота пунктов варьируется от 698 м до 1465 м, что указывает на значительные топографические изменения, которые необходимо учитывать при проведении геодезических измерений и построении модели геоида. Географическое распределение пунктов является достаточно сбалансированным и охватывает как равнинные области, так и более сложные рельефные участки, включая предгорья и горные массивы. Такой выбор пунктов позволяет учесть разнообразие рельефа, что необходимо для корректной оценки модели геоида.

Исследования, такие как работа [52], подтверждают, что использование современных методов, таких как интеграция ГНСС с геометрическим нивелированием, позволяет повысить

точность оценки в сложных рельефных условиях. Тем не менее, в горных участках (например, пункты на высотах более 1000 м) влияние рельефа требует более плотной сетки цифровых моделей рельефа (ЦМР) для точных расчетов высоты геоида. Для пунктов, расположенных в горных районах (например, пункты Горный гигант, Котырбулак, Курсай), необходимо учитывать дополнительные коррекции. Эти пункты подвержены влиянию топографических и атмосферных факторов, что требует использования методов локальной коррекции рельефа и высокоточных гравиметрических данных.

5.2 Методика вычисления и построения локальной модели геоида

Существует множество различных методов определения регионального геоида, каждый из которых отличается набором методов и философией, что затрудняет определение того, какой метод является лучшим в определенной ситуации. Основные методы вычисления модели геоида часто основаны на модификации формулы Стокса различными способами для повышения точности и адаптации к специфическим условиям. Формула Стокса позволяет определить высоту геоида (N) на основе гравитационных данных:

$$N = \frac{R}{4\pi\gamma} \iint_{\sigma} S(\psi) \Delta g d\sigma \quad (3.1)$$

где R – средний радиус Земли, ψ – геоцентрический угол, Δg – гравитационная аномалия, d – бесконечно малый элемент поверхности единичной сферы, γ – нормальная сила тяжести на эталонном эллипсоиде, $S(\psi)$ – функция Стокса. Свойства ортогональности между многочленами Лежандра $P_n(\cos\psi)$ на сфере позволяют нам представить $S(\psi)$ в виде:

$$S(\psi) = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{2n+1}{n-1} P_n(\cos\psi) \quad (3.2)$$

Использование теории Стокса в целях вычисления аномалий высот относительно референц-эллипсоида сталкивается с серьезными трудностями:

1) Для интегрирования нужно, чтобы аномалии силы тяжести были известны по всей поверхности Земли, треть которой покрыта морями и океанами. Как известно измерение гравитационных аномалий на поверхности океанов стало возможно лишь в XX веке.

2) Использование формулы Стокса означает то, что все массы расположены под геоидом. Как известно, измерения гравитационных аномалий проводятся на физической поверхности Земли, которая не совпадает с уровенной поверхностью. Решение данной проблемы заключается в том, чтоб в измеренные значения должны быть включены поправки, которые могли бы перенести все топографические массы под уровень моря, при этом не внося изменений в саму поверхность геоида, а сила тяжести оказалась бы отнесенной к уровенной поверхности. Эта проблема широко обсуждалась в научной литературе и получила

название проблемы регуляризации Земли [21]. Для улучшения точности вычислений были разработаны различные модификации и дополнения к методу Стокса, к примеру метод наименьших квадратов модификации формулы Стокса, с аддитивной коррекцией (LSMSA), который был разработан Л. Съебергом в Королевском технологическом институте (КТН), метод Стокса-Гельмерта (SH), разработанный Университетом Нью-Брансуика (UNB) в Канаде [22] и т.д.

Помимо методов, основанных на формуле Стокса, существуют также стохастические подходы к определению геоида. Эти методы опираются на статистическую обработку данных, что позволяет более гибко учитывать ошибки и неопределённости в измерениях. Стохастические методы, такие как методы коллокации, используют ковариационные функции для учета корреляций между данными различных источников, что даёт возможность получать более точные модели гравитационного поля.

Методы среднеквадратической коллокации и метод Стокса-Гельмерта в основном следуют подходу «Удаления-вычисления-восстановления», но метод LSMSA не следует данному подходу напрямую, но придерживается сути.

Модификация формулы Стокса методом наименьших квадратов.

Модификация формулы Стокса методом наименьших квадратов (LSMSA) представляет собой один из наиболее простых и практичных подходов, который успешно используется для определения региональных моделей геоида в различных областях. Применение метода LSMSA позволяет интегрировать различные разнородные данные, такие как гравитационные аномалии, цифровые модели рельефа высокого, глобальные геопотенциальные модели, а также данные ГНСС и нивелирования, в единую модель на основе метода наименьших квадратов. Этот подход обеспечивает оптимальное объединение данных, что способствует более точному и надежному моделированию геоида.

Метод LSMSA, также известный как подход Королевского технологического института (Метод КТН) к точному определению геоида, разрабатывался в основном профессором Ларсом Съебергом с 1984 годам [23, 24, 25, 26]. Теоретические и практические аспекты этого метода были завершены в 2006 году.

Этот метод был успешно применен при определении различных региональных моделей геоида. Одно из применений метода КТН было в определении Латвийской модели геоида. Метод дал среднеквадратическую ошибку 7,5 см в районе Риги при использовании данных гравиметрических измерений и модели гравитационного поля Земли GO_CONS_GCF_2_DIR_R4 [27]. В другом исследовании метод КТН использовался для определения геоида в Польше, также применяя LSMSA с добавочными коррекциями для

вычисления новой гравиметрической модели геоида [28]. Кроме того, метод КТН использовался в исследовании, посвященном определению геоида для территории Ирана, хотя основной упомянутой методикой был метод Молоденского [29]. Также эффективность метода была продемонстрирована в исследовании о геоиде Южной Кореи, которое показало значительное улучшение точности при включении новых данных о гравитации на суше и данных ГНСС/Нивелирования [30]. Также метод КТН использовался для локального определения геоида, комбинируя сферические гармонические коэффициенты, аномалии гравитации и топографические данные для достижения высокой точности в Эфиопии [31], Швеции, странах Балтии [31] и Иране [32] и т.д. Метод хорошо проявил себя также в областях с очень сложной топографией и в развивающихся регионах, где данные о гравитационных аномалиях ограничены. Это демонстрирует универсальность и адаптивность метода LSMSA к различным условиям. Согласно данному методу, модифицированный метод Стокса

$$\tilde{N} = \frac{c}{2\pi} \iint_{\sigma_0} S^L(\psi) \Delta g d\sigma + c \sum_{n=2}^M b_n \Delta g_n^{GGM} \quad (3.3)$$

где $c = \frac{R}{2\gamma}$

$S^L(\psi)$ — модифицированная функция Стокса;

b_n — параметры модификации;

L — степень модификации ядра.

Модифицированная функция Стокса выражается как:

$$S^L(\psi) = S(\psi) - \sum_{n=2}^L \frac{2n+1}{2} s_n P_n(\cos \psi) \quad L \geq M \quad (3.4)$$

где s_n — параметры модификации, с предположением что s_1 и s_0 равны нулю.

$$b_n = (Q_n^L + s_n^*) \frac{c_n}{c_n + dc_n} \quad for \quad 2 \leq n \leq M \quad (3.5)$$

Коэффициенты усечения, далее выражаются как:

$$Q_n^L = Q_n - \sum_{k=2}^L \frac{2k+1}{2} s_k e_{nk} \quad (3.6)$$

где Q_n — коэффициенты усечения Молоденского:

$$Q_n = \int_{\psi_0}^{\pi} S(\psi) P_n(\cos \psi) \sin(\psi) d\psi \quad (3.7)$$

и e_{nk} – функция ψ_0 называется коэффициентами Паула:

$$e_{nk}(\psi_0) = \int_{\psi_0}^{\pi} P_n(\cos \psi) P_k(\cos \psi) \sin(\psi) d\psi \quad (3.8)$$

Аномалия силы тяжести ГГМ:

$$\Delta g_n^{GGM} = \frac{GM}{a^2} \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} (n-1) \sum_{m=-n}^n C_{nm} Y_{nm}(\bar{\phi}, \lambda) \quad (3.9)$$

где, a – экваториальный радиус референц-эллипсоида;

r – геоцентрический радиус вычисляемой точки;

GM – принятая геоцентрическая гравитационная постоянная;

C_{nm} – полностью нормализованные коэффициенты сферических гармоник возмущающего потенциала, предоставленные ГГМ;

Y_{nm} – полностью нормализованные сферических гармоники.

Используя оценки погрешности данных и некоторые аппроксимации (как теоретические, так и вычисленные), мы переходим к вычислению высоты геоида, которую мы называем приблизительной высотой геоида [33]:

$$\tilde{N} = c \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{2}{n-1} - Q_n^L - S_n^* \right) (\Delta g_n + \varepsilon_n^T) + c \sum_{n=2}^M (Q_n^L + S_n^*) (\Delta g_n + \varepsilon_n^S) \quad (3.10)$$

где $\varepsilon_n^T, \varepsilon_n^S$ – спектральные ошибки наземных и глобальных гравитационных аномалий, соответственно.

Параметры модификации:

$$s_n^* = \begin{cases} s_n & \text{if } 2 \leq n \leq L \\ 0 & n > L \end{cases} \quad (3.11)$$

«Истинная» геоидальная высота на основе спектральной формы N :

$$N = c \sum_{n=2}^{\infty} \frac{2\Delta g_n}{n-1} \quad (3.12)$$

Проектная глобальная средняя квадратическая погрешность вычисленного геоида может быть выражена как:

$$m_{\tilde{N}}^2 = E \left\{ \frac{1}{4\pi} \iint_{\sigma} (\tilde{N} - N)^2 d\sigma \right\} \quad (3.13)$$

или

$$m_{\tilde{N}}^2 = c^2 \left\{ \sum_{n=2}^M (b_n^2 dc_n) + \sum_{n=2}^{\infty} [b_n^* - Q_n^L(\psi_0) - s_n^*]^2 c_n + \sum_{n=2}^{\infty} \left[\frac{2}{n-1} - Q_n^L(\psi_0) - s_n^* \right]^2 \sigma_n^2 \right\} \quad (3.14)$$

где $E\{\}$ — статистический оператор ожидания;

c_n — степень дисперсии гравитационных аномалий;

σ_n^2 — степень дисперсии ошибок аномалий силы тяжести наземных измерений;

dc_n — степень дисперсии ошибок аномалий силы тяжести ГГМ.

$$b_n^* = \begin{cases} b_n & \text{if } 2 \leq n \leq L \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.15)$$

Степень дисперсии гравитационных аномалий c_n также известна как компонент спектра силы:

$$c_n = \frac{1}{4\pi} \iint_{\sigma} \Delta g_n^2 d\sigma \quad (3.16)$$

В то время как степень дисперсии наземных гравитационных аномалий σ_n^2 и степень дисперсии гравитационных аномалий dc_n рассчитываются путем:

$$\sigma_n^2 = E \left\{ \frac{1}{4\pi} \iint_{\sigma} (\varepsilon_n^T)^2 d\sigma \right\} \quad (3.17)$$

$$ddc_n = E \left\{ \frac{1}{4\pi} \iint_{\sigma} (\varepsilon_n^S)^2 d\sigma \right\} \quad (3.18)$$

где ε_n^T — спектральная ошибка наземных гравитационных аномалий;

ε_n^S — спектральная ошибка наземных гравитационных аномалий.

Поскольку истинные значения компонентов ошибок неизвестны, их оценка может быть основана на некоторых стандартных подходах и стохастических моделях.

Ключевым фактором для сведения к минимуму глобальной СКО и сократить все

соответствующие ошибки в моделировании геоида является подходящий выбор параметров LS. Для получения параметров LSM нужно выполнить дифференцирование уравнения (3.14) по s_n . Результат дифференцирования затем приравнивается к нулю и параметры модификации s_n разрешаются методом наименьших квадратов, образуя системы линейных уравнений [31]:

$$\sum_{r=2}^L a_{kr} s_r = h_k, \quad k = 2, 3, \dots, L \quad (3.19)$$

где a_{kr} , h_k – коэффициенты модификации.

$$a_{kr} = d_k \delta_{kr} - \frac{2r+1}{2} d_k e_{kr} - \frac{2k+1}{2} d_k e_{kr} + \frac{2k+1}{2} \frac{2r+1}{2} \sum_{n=2}^{\infty} e_{nk} e_{nr} d_n \quad (3.20)$$

$$h_k = \frac{2\sigma_k^2}{k-1} - Q_k d_k + \frac{2k+1}{2} \sum_{n=2}^{\infty} \left(Q_n e_{nk} d_n - \frac{2}{n-1} e_{nk} \sigma_n^2 \right) \quad (3.21)$$

где

$$d_n = \sigma_n^2 d c_n^*, \text{ с } d c_n^* = \begin{cases} d c_n & \text{if } 2 \leq n \leq L \\ c_n & \text{if } n > L \end{cases} \text{ и } \delta_{kr} = \begin{cases} 1 & \text{if } k = r \\ 0 & \text{if } k \neq r \end{cases}$$

Система уравнений (3.20) предполагает инверсию матрицы $matrix = [a_{kr}]$, что становится плохим условием с увеличением размера L . Это требует применения математических регуляризаций процедуры. Исследования, сделанные А.Эллман [31] и Агрэн [34], показали, что, хотя не все методы регуляризации хорошо работают с инверсией, но метод сингулярного разложения значения (SVD) является более эффективным и действенным.

Несколько версий модели геоида тестового участка были рассчитаны с использованием различных максимальных степеней сферических гармоник коэффициентов глобальной гравитационной модели (ГГМ) и сферических радиусов интегрирования на территорию ограниченную координатами по методу LSMSA. Расчет высот был выполнен согласно блок-схеме алгоритма вычисления, приведенного на рисунке 3.1. [35].

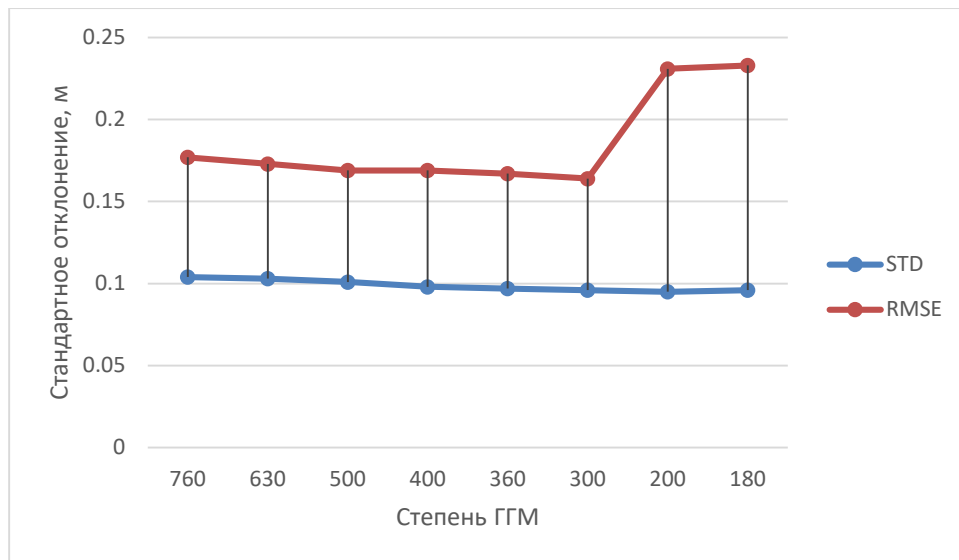


Рисунок 3.2 - График изменения статистики с уменьшением степени ГГМ с дисперсией ошибок наземных гравиметрических данных $C(0)=1 \text{ мГал}^2$

Согласно полученных результатов, в качестве исходных данных финальной версии модели были использованы матрицы значений:

- комбинации наземных гравиметрических данных отвекторизованной карты и данных WGM2012;
- гармоники глобальной гравитационной модели XGM2019;
- высот цифровой модели рельефа GLO30.

Исходными параметрами для расчета параметров модификации послужили:

- степень модификации $L=M=300$;
- дисперсия ошибок наземных гравиметрических данных $C(0)=1 \text{ мГал}^2$;
- размер охвата интеграции $\Psi=1^\circ$.

Процесс вычисления предварительной модели высот геоида могут быть разделены на два компонента:

- коротковолнового компонента;
- длинноволнового компонента.

Для вычисления коротковолновой части предварительного геоида был использован первый член уравнения (3.3):

$$\tilde{N}_1 = \frac{c}{2\pi} \int_{\sigma_0} S^L(\psi) \Delta g d\sigma \quad (3.22)$$

Для определения длинноволнового компонента был использован второй член уравнения (3.3):

$$\tilde{N}_2 = c \sum_{n=2}^M b_n \Delta g_n^{GGM} \quad (3.23)$$

Для моделирования предварительной модели высот геоида коротковолновой $\tilde{N}_1$ и длинноволновой $\tilde{N}_2$ компоненты были объединены (Рисунок 3.3).

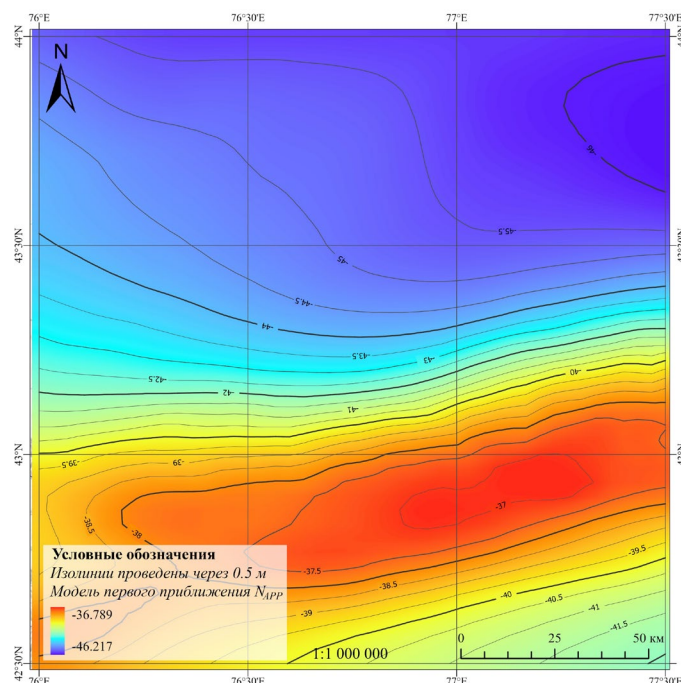


Рисунок 3.3 – Приблизительные высоты геоида без учета поправок N_{app} , м

Для вычисления геоида по формуле Стокса (уравнение 3.1) требуется выполнение двух условий: отсутствие массы за пределами геоида и приведение гравитационных данных к уровню моря. Однако из-за наличия топографии и атмосферных масс над геоидом необходимо внести поправки чтобы эти условия были соблюдены.

В вычислительной схеме метода LSMSA для определения геоида аномалии силы тяжести на поверхности и ГГМ используются для определения N_{app} , после этого добавляются все необходимые поправки. Напротив, в классических подходах эти поправки обычно применяются так, что на первом этапе аномалии силы тяжести на поверхности корректируются путем устранения эффектов топографических и атмосферных внешних масс или уменьшения их внутри как прямого эффекта, а затем, после применения интеграла Стокса, их эффекты восстанавливаются (косвенный эффект). Кроме того, поскольку аномалии силы тяжести в формуле Стокса должны относиться к геоиду, чтобы удовлетворить второму условию, необходимо уменьшение наблюдаемой силы тяжести от поверхности Земли к геоиду. Этот шаг называется продолжением вниз (DWC) [36]. Вычислительная процедура высот геоида может быть обобщена следующей формулой:

$$\tilde{N} = \tilde{N}^0 + N_{comb}^{Topo} + N_{DWC} + N_{comb}^a + N_e \quad (3.24)$$

где δN_{comb}^{Topo} – комбинированная топографическая поправка, включающая в себя сумму прямого и косвенного топографического влияния на высоту геоида, δN_{DWC} – эффект продолжения вниз, δN_{comb}^a – комбинированная атмосферная поправка, включающая сумму прямых и косвенных атмосферных воздействий и δN_e – эллипсоидальная поправка для сферического приближения геоида в формуле Стокса к эллипсоидальной поверхности отсчета.

Комбинированный топографический эффект представляет собой сумму прямого и косвенного эффектов и может быть добавлен непосредственно к приблизительным значениям высот геоида следующим образом:

$$\delta N_{comb}^{Topo} = \delta N_{dir} + \delta N_{indir} = -\frac{2\pi G \rho}{\gamma} \left[H^2 + \frac{2}{3R} H^3 \right] \quad (3.25)$$

где ρ — средняя топографическая плотность массы, H — ортометрическая высота, а R — средняя плотность радиус Земли. Этот метод не зависит от выбранного типа топографической редукции. С другой стороны, прямое воздействие, которое обычно обусловлено значительным влиянием рельефа, включая возможные латеральные изменения плотности, нейтрализуется в комбинированном топографическом воздействии на геоид.

Традиционно для DWC используются разные методы, но наиболее распространенным является использование обращения интеграла Пуассона. Сьеберг разработал новый метод для DWC полных гравитационных аномалий поля. В этом методе эффект DWC вычисляется непосредственно для высоты геоида, а не для аномалий силы тяжести [34]:

$$N_{DWC}(P) = N_{DWC}^{(1)}(P) + N_{DWC}^{L1, Far} + N_{DWC}^{L2}(P) \quad (3.26)$$

где

$$\delta N_{DWC}^{(1)} = H_P \left(\frac{\Delta g(P)}{\gamma} + 3 \frac{N_P^0}{r_P} - \frac{1}{2\gamma} \frac{\partial \Delta g}{\partial r} \Big|_P H_P \right) \quad (3.27)$$

и

$$\delta N_{DWC}^{L1, Far} = c \sum_{n=2}^M (S_n^* + Q_n^L) \left[\left(\frac{R}{r_P} \right)^{n+2} - 1 \right] \Delta g_n(P) \quad (3.28)$$

и

$$\delta N_{DWC}^{L2} = \frac{c}{2\pi} \iint_{\sigma_0} S_L(\psi) \left(\frac{\partial \Delta g}{\partial r} \right) \Big|_P (H_P - H_Q) d\sigma_Q \quad (3.29)$$

Где $r_p = R + H_p$, σ_0 представляет собой сферическую крышку с радиусом ψ с центром вокруг P , и она должна быть такая же, как и в модифицированной формуле Стокса, H — ортометрическая высота точки P и гравитационный градиент $\frac{\partial \Delta g}{\partial r}$ в точке P , который можно вычислить на основе:

$$\left. \frac{\partial \Delta g}{\partial r} \right|_P = \frac{R^2}{2\pi} \iint_{\sigma_0} \frac{\Delta g_Q - \Delta g_P}{l_0^3} d\sigma_Q - \frac{2}{R} \Delta g(P) \quad (3.30)$$

где

$$l_0 = 2R \sin \frac{\psi_{PQ}}{2}$$

Известная формула Стокса определяет высоту геоида по аномалиям силы тяжести на сфере. Поскольку форма Земли скорее эллипсоидальная с сжатием порядка 1/300, можно ожидать, что ошибка в формуле Стокса также будет составлять этот порядок, что соответствует ошибке до нескольких дециметров в модели геоида [37, 38]. При точном определении геоида это сферическое приближение должно учитываться некоторым поправочным коэффициентом (эллипсоидальной поправкой):

$$\delta N_e(P) = \frac{R}{2\gamma} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{2}{n-1} - s_n^* - Q_n^L \right) \left(\frac{a-R}{R} \Delta \tilde{g}_n^{EGM}(P) + \frac{a}{R} (\delta g_e)_n \right) \quad (3.31)$$

где $s_n^* = s_n$ если $2 \leq n \leq M$ и $s_n^* = 0$ в противном случае. Более того,

$$(\delta g_e)_n = \frac{e^2}{2a} \sum_{m=-n}^n \{ [3 - (n+2)F_{nm}] T_{nm} - (n+1)G_{nm} T_{n-2,m} - (n+7)E_{nm} T_{n+2,m} \} Y_{nm}(P) \quad (3.32)$$

где T_{nm} — коэффициенты сферической гармоник возмущающего потенциала.

Как уже упоминалось, определение геоида по формуле Стокса требует, чтобы вне геоида не было масс. Сюда же относятся и запрещенные атмосферные массы вне поверхности геоида. Их влияние необходимо учитывать [39]. В схеме LSMSA комбинированный атмосферный эффект можно аппроксимировать до порядка N с помощью [40]

$$\begin{aligned} \delta N_{comb}^a(P) = & -\frac{2\pi R \rho_0}{\gamma} \sum_{n=2}^M \left(\frac{2}{n-1} - s_n - Q_n^L \right) H_n(P) \\ & - \frac{2\pi R \rho_0}{\gamma} \sum_{n=M+1}^{\infty} \left(\frac{2}{n-1} - \frac{n+2}{2n+1} Q_B^L \right) H_n(P) \end{aligned} \quad (3.33)$$

где ρ_0 — плотность атмосферы на уровне моря, H_n — гармоника Лапласа степени n для

топографической высоты. Высота H произвольной степени v может быть представлена любой точкой на поверхности с широтой и долготой (φ, λ) ,

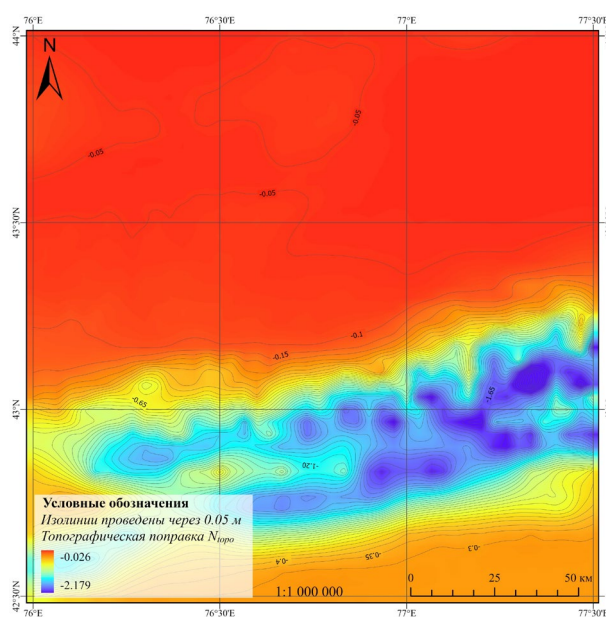
$$H^V(\varphi, \lambda) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=-n}^n H_{nm}^V Y_{nm}(\varphi, \lambda) \quad (3.34)$$

где H_{nm}^V — нормированный коэффициент сферической гармоники степени n и порядка m , который может быть определен методом сферического гармонического анализа:

$$H_{nm}^V = \frac{1}{4\pi} \iint_{\sigma} H^V(\varphi, \lambda) Y_{nm}(\varphi, \lambda) d\sigma \quad (3.35)$$

Результаты вычисления поправочных коэффициентов приведены на рисунке 3.4.

Топографическая коррекция показана на рисунке 3.4 а). Она варьируется от -2,179 м до -0,026 м со средним значением -0.416 м и стандартным отклонением 0.506 м. Минимальное значение уменьшения DWC составляет -0.271 м, максимальное значение составляет 1.227 м, среднее значение составляет 0.028 м, а стандартное отклонение составляет 0.25 м (рисунок 3.4 б).). Эллипсоидальная коррекция варьируется от -1.3 мм до 0.2 мм со средним значением 0.27 мм, а стандартное отклонение составляет 0.34 мм (рисунок 3.4в)). Атмосферная коррекция над исследуемой территорией тестового участка практически незначительна: минимальное значение равно 0.5 мм, максимальное - 4.8 мм, среднее – 1.7 мм, стандартное отклонение – 1.2 мм (рис 3.4 г)). Минимальное значение суммы всех коррекций для территории тестового участка составляет -1.114 м, максимальное значение составляет -0.018 м, среднее значение составляет -0.386 м, а стандартное отклонение составляет 0.3 м.



Вычисленные высоты геоида на тестовом участке по методу LSMSA варьируется в диапазоне от - 46.329 м до - 37.710 м, среднее значение составляет - 42.493м, стандартное отклонение – 2.856 м.

Техника «Удаления-вычисления-восстановления»

Наиболее распространенным и применяемым подходом к региональному гравиметрическому определению геоида сегодня, вероятно, является техника «Удаления-вычисления-восстановления» (remove-compute-restore - RCR). Техника RCR — это широко используемый 3-шаговый подход в моделировании квазигеоида [41], фактически разработанный в 1980-х годах одновременно многими исследователями для (в то время) определения геоида на основе LSC [42, 43, 44] и, следовательно, применения спектральных методов [45] в физической геодезии. На первом этапе цель RCR состоит в том, чтобы создать гладкое гравитационное поле, т. е. максимально снизить его среднее значение и значения стандартного отклонения. Это может быть достигнуто путем удаления вклада ГГМ и эффекта топографии из имеющихся гравитационных аномалий и данных, связанных с гравитацией. Затем вычисляются остаточные аномалии высоты или остаточные высоты геоида из сглаженного гравитационного поля с использованием, например, метода среднеквадратической коллокации (Least Squares Collocation - LSC), интеграции Стокса или других методов. В завершении, восстанавливаются все предыдущие вклады и эффекты, которые были удалены на первом этапе [46].

В методе RCR аномальный потенциал T разделяется на три части:

$$T = T_{GGM} + T_{RTM} + T_{RES} \quad (3.36)$$

где T_{GGM} — вклад модели геопотенциала Земли (ГГМ). T_{RTM} — эффекты рельефа из модели остаточного рельефа (RTM), а T_{RES} — остаточное гравитационное поле. T рассматривается как пространственная функция. Одной из причин вычитания ГГМ является представление гравитационного поля за пределами области, покрытой данными.

Для редукции рельефа эффекты рельефа уменьшаются относительно поверхности средней высоты. Потенциал рельефа вычитается из наблюдений с использованием интегрирования призмы, т. е. представления массы между фактической топографией и поверхностью средней высоты в виде призм массы либо положительной, либо отрицательной плотности, номинально 2670 кг/м³. Реализация призмы метода RTM имеет неотъемлемую проблему: метод оставляет точку над поверхностью средней высоты в области без массы,

тогда как точка под поверхностью средней высоты после редукции будет соответствовать значению внутри массы опорной топографии. Поскольку все методы моделирования геодезического гравитационного поля требуют наблюдений, полученных из гармонической функции, т. е. в среде без массы над геоидом, гармоническая поправка применяется к точкам аномалии силы тяжести под поверхностью средней высоты. Сигнал «восстановления» геоида вычисляется методами Фурье [47,48]. В методе RTM разрешение поверхности среднего возвышения контролируется пользователем с помощью подходящего фильтра нижних частот. В идеале такой фильтр должен соответствовать эквивалентному разрешению наивысшей степени сферического гармонического расширения в опорном потенциале.

Формула Стокса/Молоденского [40] имеет вид;

$$\zeta = \frac{R}{4\pi\gamma} \iint_a (\Delta g + g_1) S(\psi) d\sigma \quad (3.37)$$

где ζ — квазигеоид, R — средний радиус Земли, γ — нормальная гравитация на нормальной высоте, σ — единичная сфера, $S(\psi)$ — функция Стокса с аргументом ψ в качестве геоцентрического угла, Δg — аномалии силы тяжести на поверхности, g_1 — первый член в разложении Молоденского. Уравнение (3.37) модифицируется с использованием редуцированных аномалий силы тяжести на поверхности (Δg_{res}), полученных путем удаления вклада ГГМ и эффектов рельефа из аномалий силы тяжести на поверхности (Δg), вместо Δg для получения остаточного вклада квазигеоида (ζ_{res}) по формуле:

$$\zeta_{res} = \frac{R}{4\pi\gamma} \iint_a (\Delta g_{res} + g_1) S(\psi) d\sigma \quad (3.38)$$

При использовании редукции RTM поправка Молоденского g_1 , как правило, оказывается незначительной [49], и формула преобразуется в обычную формулу Стокса для геоида, в принципе применяемую к величинам гравитационного поля на геоиде.

Процесс вычисления в методе RCR может быть выполнен различными методами: к примеру, методом быстрого преобразования Фурье, методом Стокса-Гельмерта, методами среднеквадратических коллокаций и т.д.

Классический метод Стокса-Гельмерта

Классическое SH-приближение. При региональном применении интеграла Стокса область интегрирования пространственно ограничена из-за нехватки наземных гравитационных съемок в пределах исследуемой территории. Следовательно, аномалии земной гравитации математически определяются с учетом частот гравитационного поля. По существу, влияние как длинных, так и коротких волн гравитационного поля исключается из земных гравитационных аномалий, затем уменьшенные гравитационные аномалии

используются для определения остаточной высоты геоида, и, наконец, высота геоида восстанавливается с помощью повторного использования длинноволнового и коротковолнового компонентов.

Во-первых, процесс удаления заключается в том, что уменьшение силы тяжести достигается за счет формулы:

$$\Delta g_{red} = \Delta g^{FA} - \Delta g^{GGM} - \Delta g^{DTE} \quad (3.39)$$

где Δg^{FA} относится к гравитационной аномалии в открытом воздухе на среднем уровне моря, Δg^{GGM} обозначает вклад Глобальной геопотенциальной модели (ГГМ), Δg^{DTE} представляет собой прямое топографическое влияние (DTE) на гравитационную аномалию.

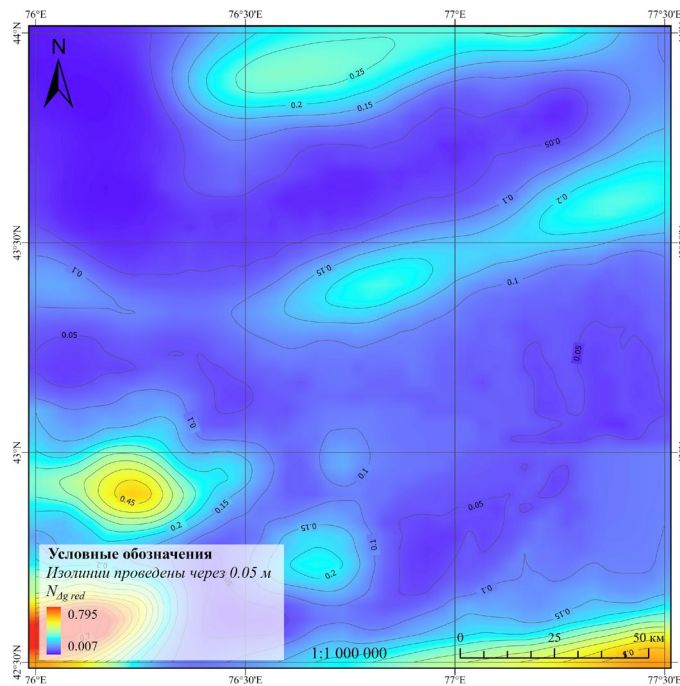


Рисунок 3.6– Средние длины волн модели геоида ($N_{\Delta g_{red}}$), м

Затем вычисление остаточной высоты геоида (Рисунок 3.6) определяется по формуле:

$$N_{\Delta g_{red}} = \frac{R}{4\pi\gamma} \iint_{\sigma} S(\psi) \Delta g_{red} d\sigma \quad (3.40)$$

где σ обозначает поверхность интегрирования (т. е. сферу), $S(\Psi)$ - исходное ядро Стокса.

Наконец, процесс восстановления заключается в добавлении длинной и короткой волны к остаточной высоте геоида, путем

$$\hat{N} = N_{GGM} + N_{\Delta g_{red}} + N_{PITE} \quad (3.41)$$

где N_{GGM} - длинноволновая часть модели геоида, $N_{\Delta g_{red}}$ - это средние длины волн модели геоида, которые представляют собой остаточную высоту геоида, N_{PITE} - это короткие

длины волн модели геоида, которые являются основным косвенным топографическим эффектом (PITE) на высоту геоида.

Длинноволновые зависимости гравитационного поля от гравитационной аномалии и высоты геоида (Рисунок 3.7) равны:

$$\Delta g^{GGM} = \frac{GM}{r^2} \sum_{n=2}^{n_{max}} (n-1) \left(\frac{a}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos \theta) \quad (3.42)$$

и

$$N_{GGM} = \frac{GM}{\gamma r} \sum_{n=2}^{n_{max}} \left(\frac{a}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos \theta) \quad (3.43)$$

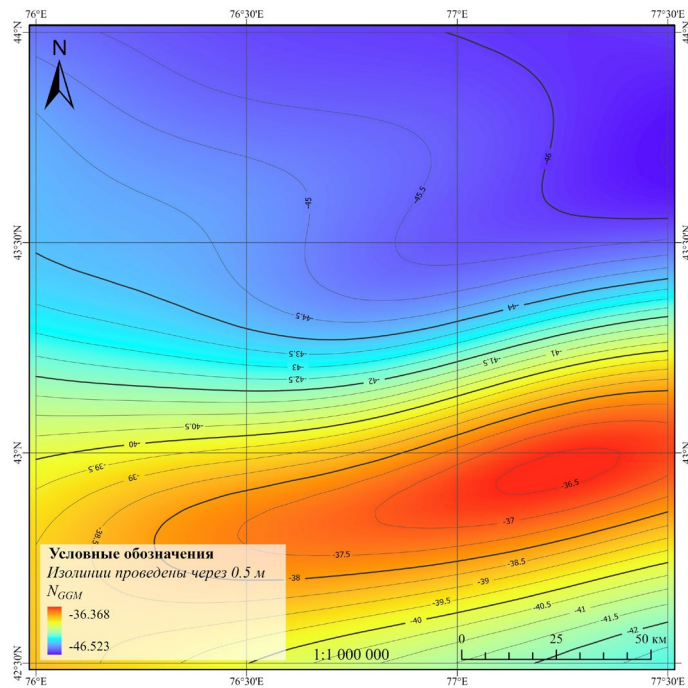


Рисунок 3.7 – Длинноволновая часть модели геоида (N_{GGM}), м

В уравнении, GM относится к произведению массы Земли на гравитационную постоянную, r обозначает радиальное расстояние от расчетной точки, N_{max} - максимальная степень расширения, n - градус, m - порядок, a указывает на большую полуось эллипсоида уровня; $\bar{C}_{nm}$ и $\bar{S}_{nm}$ - полностью нормализованные коэффициенты гармоник, Δ означает разницу коэффициентов между ГГМ и уровнем-эллипсоидом, $\bar{P}_{nm}$ относится к первому виду полностью нормализованной функции Лежандра; θ и λ являются геодезическими координатами широты и долготы расчетной точки P соответственно.

В процессе удаления реализован второй метод уплотнения, разработанный Гельмертом. В классической теории Стокса-Гельмерта топография, на которой проводятся гравитационные измерения, сжимается до бесконечно малого слоя массы на геоиде. На заключительном этапе гравитационные аномалии аналитически продолжают до уровня

геоида от точечного уровня. Такого рода манипуляции с топографией непосредственно влияют на наблюдения за гравитацией. Соответственно, DTE, аппроксимированный поправкой на рельеф местности (на основе подхода Морица-Пеллине, описанного в Джекели и Серпас [50] для гравитационной аномалии, рассчитывается следующим образом:

$$\Delta g^{DTE} = -\frac{G \rho R^2}{2} \iint_{\sigma} \frac{(H_Q - H_P)^2}{l_0^3} d\sigma \quad (3.44)$$

где G обозначает ньютоновскую гравитационную постоянную, ρ представляет плотность видимых топографических масс (т.е. $2,67 \text{ g/cm}^3$) [50]. Известно, что постоянное значение плотности ρ , равное $2,67 \text{ g/cm}^3$, является грубым приближением, поскольку фактическая плотность отличается от постоянного значения на ± 20 процентов [51].

Зона между поверхностью Земли и геоидом остается гармоничной после применения DTE к гравитационным аномалиям в открытом воздухе. Однако из-за второго сгущения Гельмерта возникает изменение потенциала между фактическим и уплотненные массы. Следовательно, требуется вторичная косвенная топография, которая рассчитывается по формуле:

$$\Delta g^{SITE} = -\frac{2 \pi G \rho H}{R} \quad (3.45)$$

Более того, первичный косвенный топографический эффект (PITE) на высоту геоида (Рисунок 3.8) для второго сгущения Гельмерта рассчитывается по формуле:

$$N_{PITE} = -\frac{\pi G \rho H^2}{\gamma} - \frac{G \rho R^2}{6\gamma} \iint_{\sigma} \frac{H_Q^3 - H_P^3}{l_0^3} d\sigma \quad (3.46)$$

где l_0 - сферическое расстояние между H_P и H_Q , которые являются высотами вычислительной и рабочей точек соответственно [52].

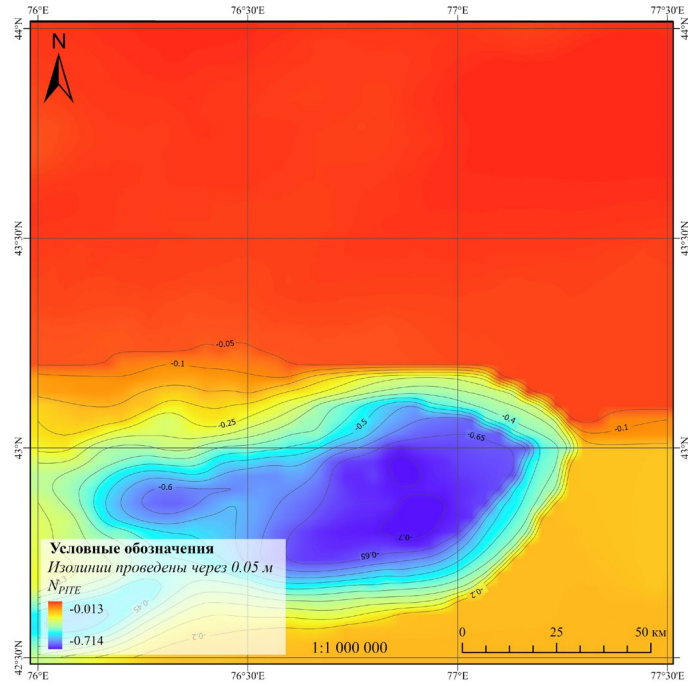


Рисунок 3.8– Короткие длины волн модели геоида (N_{PITE}), м

Для дальнейшего повышения точности модели геоида необходимо также учитывать атмосферные и эллипсоидальные поправки. Прямое атмосферное воздействие (DAE) рассматривается как:

$$\Delta g^{DAE} = 0.871 - 1.0298 \cdot 10^{-4}H + 5.3105 \cdot 10^{-9}H^2 - 2.1642 \cdot 10^{-13}H^3 + 9.5246 \cdot 10^{-18}H^4 - 2.2411 \cdot 10^{-22}H^5 \quad (3.47)$$

где H - средняя высота центров сетки, полученная из цифровой модели рельефа [45].
Эллипсоидальный поправочный коэффициент задается следующим образом,

$$\Delta g^{ELL} = -\frac{e^2}{R} \sin \theta \cos \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} + \frac{e^2}{R} (3 \cos^2 \theta - 2)T \quad (3.48)$$

где e - первый эксцентриситет уровня-эллипсоида, θ - широта точки, T - возмущающий гравитационный потенциал расчетной точки [54].

Учитывая все рассмотренные эффекты гравитационной аномалии, уравнение 3.39 кратко переписывается следующим образом,

$$\Delta g_{red} = \Delta g^{FA} - \Delta g^{GGM} - \Delta g^{DTE} + \Delta g^{SITE} + \Delta g^{DAE} + \Delta g^{ELL} \quad (3.49)$$

Модификация ядра Стокса. Чтобы получить точную модель геоида с уровнем в один сантиметр, необходимо модифицировать ядро Стокса. Существует две группы методов

модификации ядра Стокса: детерминированные и стохастические методы. В приближении SH детерминистически модифицированное ядро Стокса в основном предлагается в геодезической литературе [55, 56].

Обзоры различных типов методов детерминированной модификации можно найти в работах Ваничека и Физерстоуна [57]; Физерстоуна [55]. Для этого исследования использовался метод Вонга-Гора метод модификации предпочтителен из-за его точности и практичности в применении [58]. Этот метод представляет собой более простую детерминированную модификацию с ограниченным диапазоном, которая включает в себя вычитание полиномиальных членов из исходного ядра. Примечательно, что этот метод не требует прогнозирования дисперсий степени сигнала для оценки параметров модификации.

Как правило, модифицированное ядро Стокса просто вычисляется как:

$$S^L(\psi) = S(\psi) - \sum_{n=2}^L \frac{2n+1}{2} s_n P_n(\cos \psi) \quad (3.50)$$

где L - верхняя граница гармоник, подлежащих изменению в ядре Стокса, $P_n(\cos \Psi)$ - первый вид ненормализованной функции Лежандра. В методе Неверного Гора параметры модификации вычисляются по формуле:

$$s_n = \frac{2}{n-1} \quad (3.51)$$

где n означает степень сферических гармоник.

Модификатор ядра Стокса выражается путем перезаписи Уравнения 3.1 в виде:

$$\bar{N} = \frac{R}{4\pi\gamma} \iint_{\sigma_0} S^L(\psi) \Delta g d\sigma + N_{GGM} \quad (3.52)$$

Поскольку L и M (максимальная используемая степень GGM) являются произвольными и не обязательно должны иметь одинаковое значение, мы принимаем во внимание, что это разные значения ($M \neq L$).

Вклад данных о земной гравитации (первый член уравнения 3.50) может быть расширен следующим образом:

$$\bar{N}^T = \frac{R}{4\pi\gamma} \iint_{\sigma_0} S^L(\psi) (\Delta g_Q - \Delta g_P) d\sigma + \frac{R}{4\pi\gamma} \Delta g_P \iint_{\sigma_0} S^L(\psi) \sin(\psi) d\sigma \quad (3.53)$$

где Δg_P и Δg_Q - средние гравитационные аномалии в расчетной и контрольной точках соответственно. Второй член уравнения 3.53 можно представить в виде,

$$N(2) = \frac{R}{4\pi\gamma} \Delta g_P \iint_{\psi=0}^{\psi=\psi^0} S^L(\psi) P_0(\cos \psi) \sin(\psi) d\psi \quad (3.54)$$

Учитывая коэффициенты усечения, уравнение 3.54 становится:

$$N(2) = -\frac{R}{2\gamma} \Delta g_P Q_0^L \quad (3.55)$$

где Δg_P - средняя гравитационная аномалия в точке расчета, Q_0^L - коэффициент усечения Молоденского, рассчитанный следующим образом:

$$Q_0^L = Q_0 - \sum_{k=2}^L \frac{2k+1}{2} s_k e_{k0} \quad (3.56)$$

где e_{k0} - функции от Ψ_0 , а Q_0 - член нулевой степени коэффициента усечения

$$Q_0 = -4t + 5t^2 + 6t^3 - 7t^4 + (6t^2 - 6t^4) \log t(t+1) \quad (3.57)$$

где t равно $\sin \frac{\Psi_0}{2}$ [59]. В уравнении 3.56 e_{k0} просто вычисляется по формуле

$$e_{k0}(\psi_0) = \int_{\psi_0}^{\pi} P_n(\cos \psi) P_0(\cos \psi) \sin \psi d\psi \quad (3.58)$$

где $P_n(\cos \Psi)$ обозначает ненормированные многочлены Лежандра степени n [60].

Процесс расчета модели геоида по методу CSH изображен на рисунке 3.9 [61, 62].

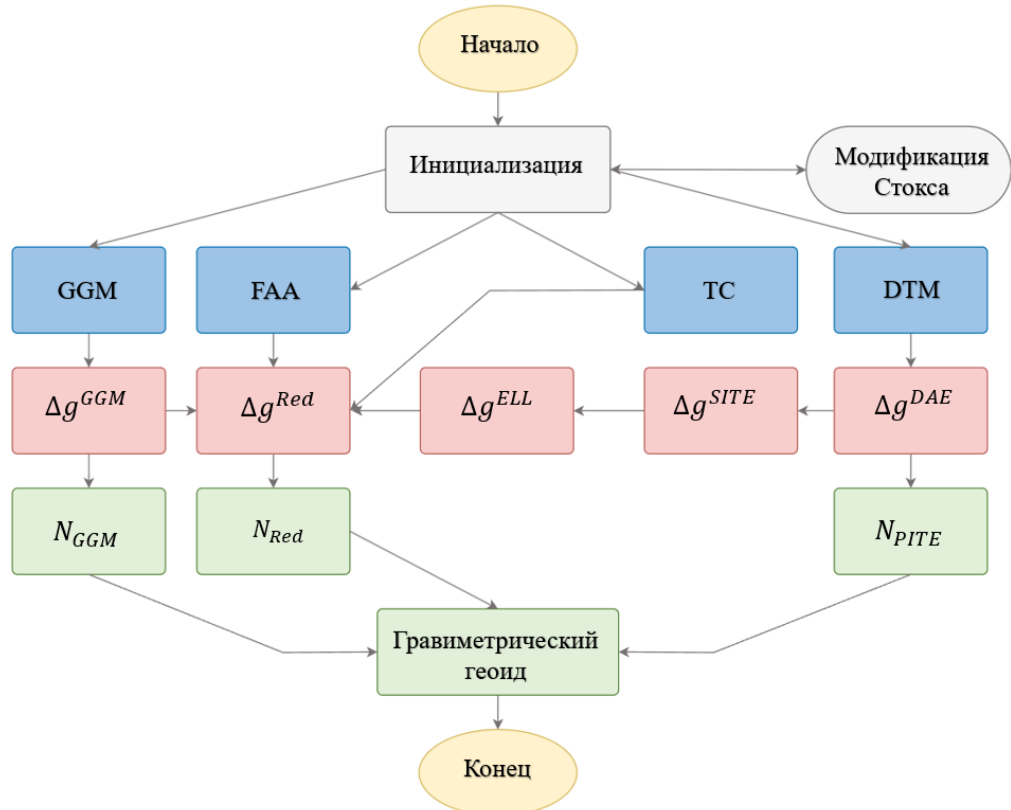


Рисунок 3.9 - Блок-схема алгоритма вычисления модели геоида по методу CSH [140]

Согласно формуле 3.41, результаты вычисления модели геоида по методу CSH приведены на рисунке 3.10.

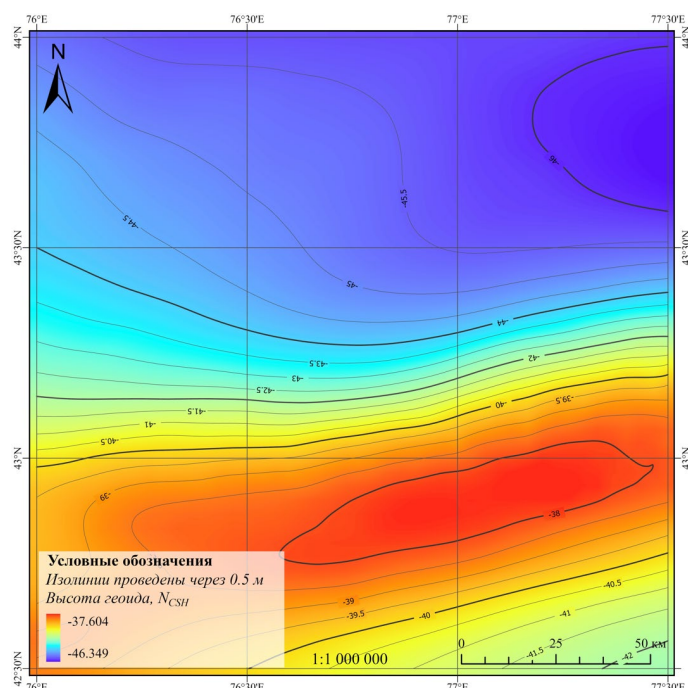


Рисунок 3.10 – Высота геоида по методу Стокса-Гельмерта (N_{CSH}), м

Высоты модели геоида, вычисленные согласно метода CSH для территории исследования, варьируются от - 46.349 м до - 37.604 м.

Метод среднеквадратической коллокации

Метод среднеквадратической коллокации (Least Squares Collocation – LSC) может обрабатывать неоднородные наблюдения для оценки компонентов гравитационного поля и их стандартных ошибок, таких как высоты геоида [63]. Метод LSC использует технику RCR [64], поскольку данные, которые будут использоваться для оценки ковариационной функции и последующего шага LSC, должны быть гладкими с небольшой дисперсией для правильной интерпретации оценок ошибок.

Как было отмечено ранее, в методе RCR аномальный потенциал T разделяется на три части (формула 3.39). Согласно Морицу, рассматривая T как пространственную функцию, линейную модель наблюдений можно записать как [40];

$$y_i = A_i^T X + L_i(T) + e_i \quad (3.59)$$

где y_i — это i -е наблюдение доступного набора данных, X — вектор параметров, A_i^T — это i -я строка дизайн матрицы A , относящаяся к X , L_i — линейная функция T , связанная с y_i , а e_i — ошибка наблюдения [65]. При использовании техники RCR линейная модель уравнения (3.59) изменяется на:

$$\delta y_i = A_i^T X + L_i(T_{res}) + e_i \quad (3.60)$$

где δy_i — остаточное наблюдение. Уравнение (3.60) — это основное уравнение наблюдения для LSC. В матричной форме оно становится

$$\delta Y = AX + L(T_{res}) + E \quad (3.61)$$

где δY — вектор остаточных наблюдений, L — вектор линейных функционалов, а E — вектор ошибок наблюдений.

Важнейшей частью процедуры LSC является моделирование ковариации, в котором доступные наблюдения используются для моделирования локальных или региональных характеристик гравитационного поля в исследуемой области. Ковариация между двумя наблюдаемыми величинами определяется как

$$cov(L_i, L_j) = C_{ij} \quad (3.62)$$

В случае, если один из двух функционалов является оценкой T в точке P , ковариация обозначается как;

$$cov(T_P, L_j) = C_{Pi} \quad (3.63)$$

в то время как базовая ковариация T по двум точкам P и Q равна

$$cov(T_P, T_Q) = C_{PQ} \quad (3.64)$$

В этом исследовании функция Чернинга-Раппа [66] используется для определения уравнения (3.64) и, следовательно, уравнений (3.62) и (3.6), а именно:

$$cov(T_P, T_Q) = a \sum_{i=2}^N \left[\frac{R_E^2}{r_{PrQ}} \right]^{i+1} \sigma_i^2 P_i(\cos \psi) + \sum_{i=N+1}^{\infty} \left[\frac{R_B^2}{r_{PrQ}} \right]^{i+1} \frac{A}{(i-1)(i-2)(i+4)} P_i(\cos \psi) \quad (3.65)$$

где r_P, r_Q — радиусы Земли в точках P и Q, R_E — средний радиус Земли, N — максимальная степень ГГМ, P_l — полином Лежандра степени l , ψ — сферическое расстояние между двумя точками P и Q, а σ_i^2 — дисперсия степени ошибки используемой ГГМ. В этом уравнении неизвестными переменными ковариационной функции являются два масштабных коэффициента α и a (первый относится к ошибке ГГМ, второй — к остаточному сигналу в более высоких степенях) и радиус Бьерхаммера R_B . Эти неизвестные получаются с помощью итеративной нелинейной корректировки [67].

Обозначая дисперсию-ковариацию между шумами e_i и e_j через σ_{ij} и определяя матрицу ковариации $n \times n$ как $\bar{C} = \{cov(L_i, L_j) + \sigma_{ij}\}$, где n — число наблюдений, оценка X методом наименьших квадратов приводит к

$$\hat{X} = (A^T \bar{C}^{-1} A)^{-1} (A^T \bar{C}^{-1} \delta Y) \quad (3.66)$$

На основе процедуры LSC $\hat{T}_{res}$ затем получается как [144]

$$\hat{T}_{res}(P) = C_P^T \bar{C}^{-1} (\delta Y - A^T X) \quad (3.67)$$

где C_P — вектор компонент C_{Pi} . На основе уравнения (3.67) и формулы Брунса можно оценить остаточные аномалии высоты как

$$\hat{\zeta}_{res}(P) = \frac{\hat{T}_{res}(P)}{\gamma} \quad (3.68)$$

Для получения полных аномалий высот необходимо суммировать глобальный эффект $\hat{\zeta}_{GGM}$ и топографический эффект $\hat{\zeta}_{RTM}$ сигнала:

$$\hat{\zeta} = \hat{\zeta}_{GGM} + \hat{\zeta}_{RTM} + \hat{\zeta}_{res} \quad (3.69)$$

Наконец, используя общую формулу, аномалии высоты ζ преобразуются в высоты геоида N :

$$\hat{N} = \hat{\zeta} + \frac{\Delta g_B}{\bar{\gamma}} H \quad (3.70)$$

где Δg_B — аномалия силы тяжести Буге, $\bar{\gamma}$ — средняя нормальная сила тяжести, а H — ортометрическая высота, $\hat{\zeta}$ в точке P на поверхности местности преобразуется в соответствующую высоту геоида $\hat{N}$ [68].

Для реализации техники RCR в качестве первого шага по удалению глобального

эффекта гравитационного поля использовалась модель XGM2019 до степени 1000. Согласно теории RCR, удаление топографических эффектов из гравитационных данных основано на технике RTM. Для вычисления RTM использовалась ЦМР GLO-30, которая предоставляла топографическую информацию. Статистика остаточных гравитационных аномалий представлена в таблице 3.2.

Таблица 3.2 Статистика остаточных гравитационных аномалий, в м

Данные	Аномалии	Δg , мГал	Δg^{GGM} , мГал	Δg^{RTM} , мГал	Δg^{ERTM} , мГал
Наземные	Mean	-40,390	0,790	1,011	1,451
	STD	55,386	19,233	14,440	8,057
	Min	-150,881	-183,726	-174,611	-57,377
	Max	-40,390	118,965	81,125	60,129
Глобальные	Mean	10,992	-2,521	-0,308	4,352
	STD	89,429	37,419	26,281	21,336
	Min	-147,606	-124,540	-121,544	-85,978
	Max	197,298	101,194	62,025	84,294

Как видно из Таблицы 3.2, удаление глобального гравитационного и топографических эффектов из гравитационных аномалий впечатляюще сгладило гравитационный сигнал. В частности, удаление эффектов ГГМ уменьшило STD наблюдаемых гравитационных данных примерно на 65% (для глобальных данных на 58%). После удаления топографических эффектов с использованием техники RTM STD гравитационных данных снизилось до 85% (для глобальных данных до 76%). График распределения остаточных гравитационных аномалий (Δg_{res}) представлен на Рисунок 3.11.

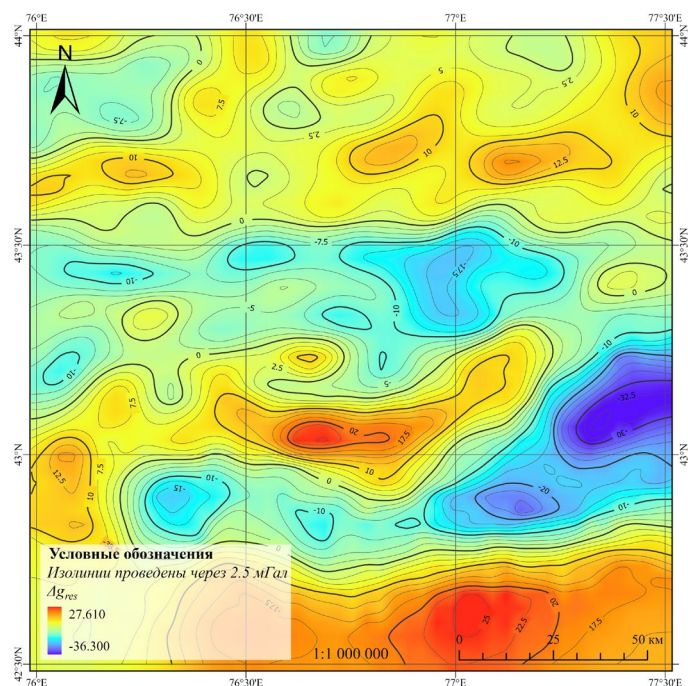


Рисунок 3.11 – Остаточные гравитационные аномалии после удаления эффектов глобальной гравитационной модели и модели остаточного рельефа с использованием моделей XGM2019 до градуса/порядка 1000 и GLO-30 соответственно, мГал

Важным шагом для достижения оптимального результата процедуры LSC является определение подходящей локальной ковариационной функции, представляющей стохастические характеристики гравитационного поля в данном регионе Земли. После удаления глобальных гравитационных и топографических эффектов остаточные гравитационные аномалии использовались в качестве входных данных для определения наилучших параметров ковариации. Эмпирическая ковариация была вычислена на основе всех наземных данных, и к ней была подогнана уникальная ковариационная модель (равномерная ковариация).

Модель Tscherning and Rapp TR1974 была выбрана для определения аналитической ковариационной модели, которая могла бы быть применима для процедуры LSC [71]

Эта модель учитывает локальную структуру гравитационного поля Земли в исследуемой области путем подгонки эмпирической ковариации, полученной из остаточных гравитационных аномалий. Эмпирическая ковариация и соответствующая подобранная модель определяются методом проб и ошибок, проверяя различные значения и выбирая те, которые делают расхождение между прогнозами LSC и контрольными значениями меньшим и более стационарным.

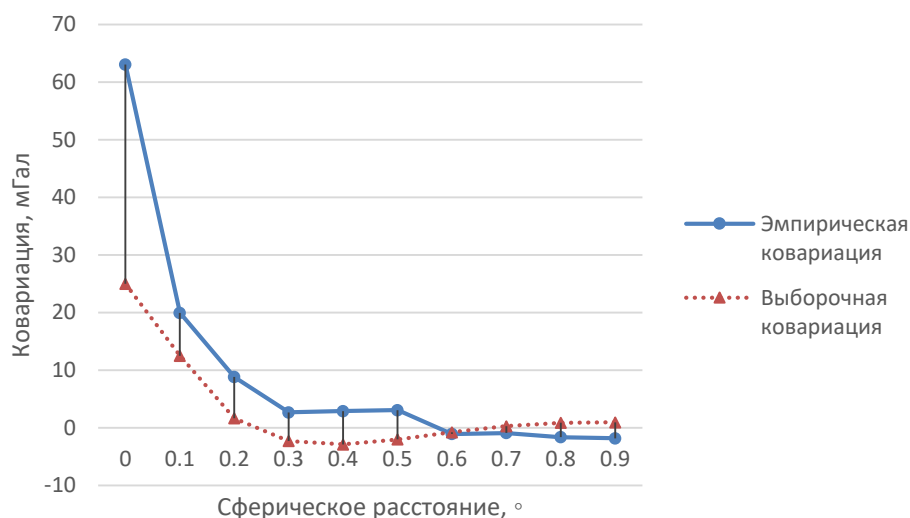


Рисунок 3.12 – Эмпирическая и выборочная равномерная ковариация

Метод LSC учитывает данные, расположенные на разных высотах, с помощью пространственной ковариационной функции. Однако ключевым ограничением метода LSC является необходимость решения систем уравнений, количество которых соответствует количеству исходных данных. Поскольку площадь территории Казахстана весьма велика, обработка такого объема данных представляет значительную вычислительную сложность. Существуют многочисленные техники по оптимизации метода LSC для работы с большими наборами данных.

Одним из наиболее известных методов модифицированной коллокации наименьших квадратов, позволяющим ускорить вычисления при создании моделей геоида, является Метод быстрой коллокации (Fast Collocation - FastCol). Этот подход предполагает использование регулярных сеточных и однородных данных, что приводит к особой структуре ковариационной матрицы. Автоковариационная матрица обладает симметрией Тёплица, и каждый её блок также представляет собой симметричную матрицу Тёплица (структура Тёплица/Тёплица). Это позволяет эффективно решать задачи коллокации для больших наборов данных, покрывая значительные территории за один шаг, избегая необходимости делить данные на подмножества [69].

После определения ковариации с использованием остаточных аномалий земной гравитации были вычислены остаточные аномалии высот (см. уравнения (3.67) и (3.68)), далее были восстановлены вклады ГТМ и рельефа (см. уравнение (3.69)), и, наконец, полученные аномалии высоты были преобразованы в высоты геоида (см. уравнение (3.70)). Результат моделирования геоида методом FC представлен на рисунке 3.13.

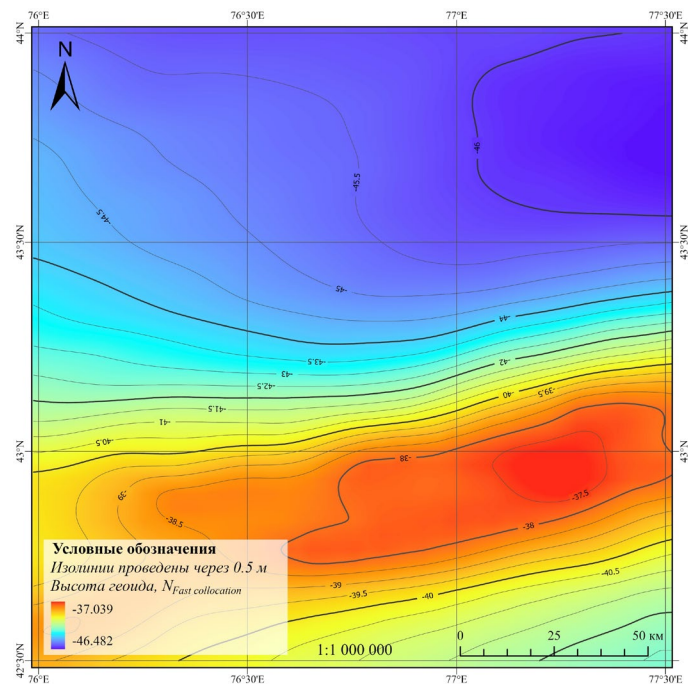


Рисунок 3.13 – Высоты геоида по методу быстрой коллокации N_{FC} , м

Согласно рисунку 3.13, представляющему модель геоида для исследуемой территории, построенную с использованием метода Быстрой коллокации, наблюдается вариация геоидальных высот в диапазоне от -46,482 м до -37,039 м. На карте отчетливо видно постепенное увеличение высот геоида по мере приближения к горной местности, что соответствует общим геофизическим закономерностям для районов с выраженным рельефом. Такое изменение высот связано с влиянием массы горных массивов на гравитационное поле Земли, что приводит к более высоким значениям геоида в этих областях.

5.3 Результаты построения геоида и оценка точности

Гравиметрические модели геоида были рассчитаны для исследуемого региона, ограниченного координатами $42,5^\circ$ и 44° северной широты, 76° и $77,5^\circ$ восточной долготы в сетке $2' \times 2'$. Для уменьшения краевых эффектов исходные данные были расширены за пределы исследуемой области на 1° . В рамках этого исследования были разработаны три модели геоида: N_{LSMS} , N_{CSH} , N_{FC} , с использованием сферических гармонических коэффициентов геопотенциальной модели XGM2019, цифровой модели рельефа GLO-30 и 14799 пунктов наземных гравиметрических данных.

Основной целью данного исследования было создание гравиметрической модели геоида для Казахстана, что было успешно выполнено. Однако в связи с тем, что существующая высотная сеть Казахстана основана на нормальных высотах, для которых квазигеоид является наиболее точным приближением к нулевой опорной поверхности, для обеспечения корректной оценки и сопоставления результатов по данным ГНСС/Нивелирования, высоты геоида были пересчитаны в аномалии высот в соответствии с методикой пересчета, изложенной в работе Хейсканена и Морица [9]. Согласно Хейсканену и Морицу, аномалия высоты ζ и высота геоида N связаны соотношением:

$$\zeta - N = H^o - H^N = -\frac{\bar{g} - \bar{\gamma}}{\bar{\gamma}} H^o \quad (4.1)$$

где H^o и H^N — ортометрическая и нормальная высоты соответственно, $\bar{g}$ и $\bar{\gamma}$ — средняя сила тяжести между геоидом и поверхностью Земли и средняя нормальная сила тяжести между референц-эллипсоидом и теллуroidом соответственно.

Член $\bar{g} - \bar{\gamma}$ не доступен напрямую [72,73], поэтому разницу между квазигеоидом и геоидом можно вычислить, приблизив этот член простой аномалией силы тяжести Буге (Δg_B) в точке вычисления таким образом, что:

$$\zeta - N = H^o - H^N = -\frac{\Delta g_B}{\gamma_0} H \quad (4.2)$$

где $\bar{\gamma}$ в знаменателе заменяется на нормальное ускорение силы тяжести для произвольной стандартной широты (γ_0), обычно 45, а H — топографическая высота расчетной точки на поверхности Земли.

Точность разработанных моделей была оценена через интерполяцию аномалий высот на контрольные точки ГНСС/Нивелирования. Для оценки ошибок моделей в контрольных точках использовались различия между аномалиями высот, полученными из модели (ζ_{geoid}), и высотами, измеренными методом ГНСС/нивелирования ($\zeta_{\text{GNSS/Lev}}$). Точность вычислений обычно оценивается с использованием стандартного отклонения (STD) и среднеквадратичной

ошибки (RMS), позволяющей количественно измерить различия между гравиметрической и геометрической моделями геоида/квазигеоида. Однако прямое сравнение моделей геоидов/квазигеоидов может оказаться нецелесообразным из-за наличия возможных систематических ошибок (т.е. смещений). Смещение и наклон исходных данных в координатных направлениях оси глобальной системы, представляющие гармоники нулевой и первой степеней, являются недостающими параметрами геоида/квазигеоида. Поэтому было использовано 4-параметрическое преобразование для моделирования остатков между моделями квазигеоида и высотами квазигеоида, полученными с помощью ГНСС/Нивелирования в точках наблюдения:

$$\zeta_{GNSS/Lev} - \zeta_{model} - \varepsilon = x_1 + x_2 \cos \varphi \cos \lambda + x_3 \cos \varphi \sin \lambda + x_4 \sin \varphi \quad (4.3)$$

где x_1, x_2, x_3 и x_4 - четыре параметра, φ — широта, λ — долгота. Статистика отклонений представлена в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Статистика различий между высотами геоида $\zeta_{GNSS/lev}$ и ζ_{Geoid} , рассчитанных по разным методам

Методы	Min, м	Max, м	Mean, м	STD, м	RMSE, м
ζ_{LSMSA}	-0,193	0,003	-0,067	0,061	0,089
ζ_{CSH}	-0,151	0,146	0,001	0,084	0,080
ζ_{FC}	-0,193	0,049	-0,05	0,068	0,080

Из таблицы 4.1 видно, что два подхода — LSMSA и FC — продемонстрировали высокую степень согласованности. Применение этих методов позволяет получить модель геоида с точностью около 6 см, в то время как метод CSH обеспечил точность около 8 см. Согласованность результатов между методами LSMSA и FC проиллюстрирована на рисунке 4.1, где представлена сравнительная карта высчитанных моделей геоида.

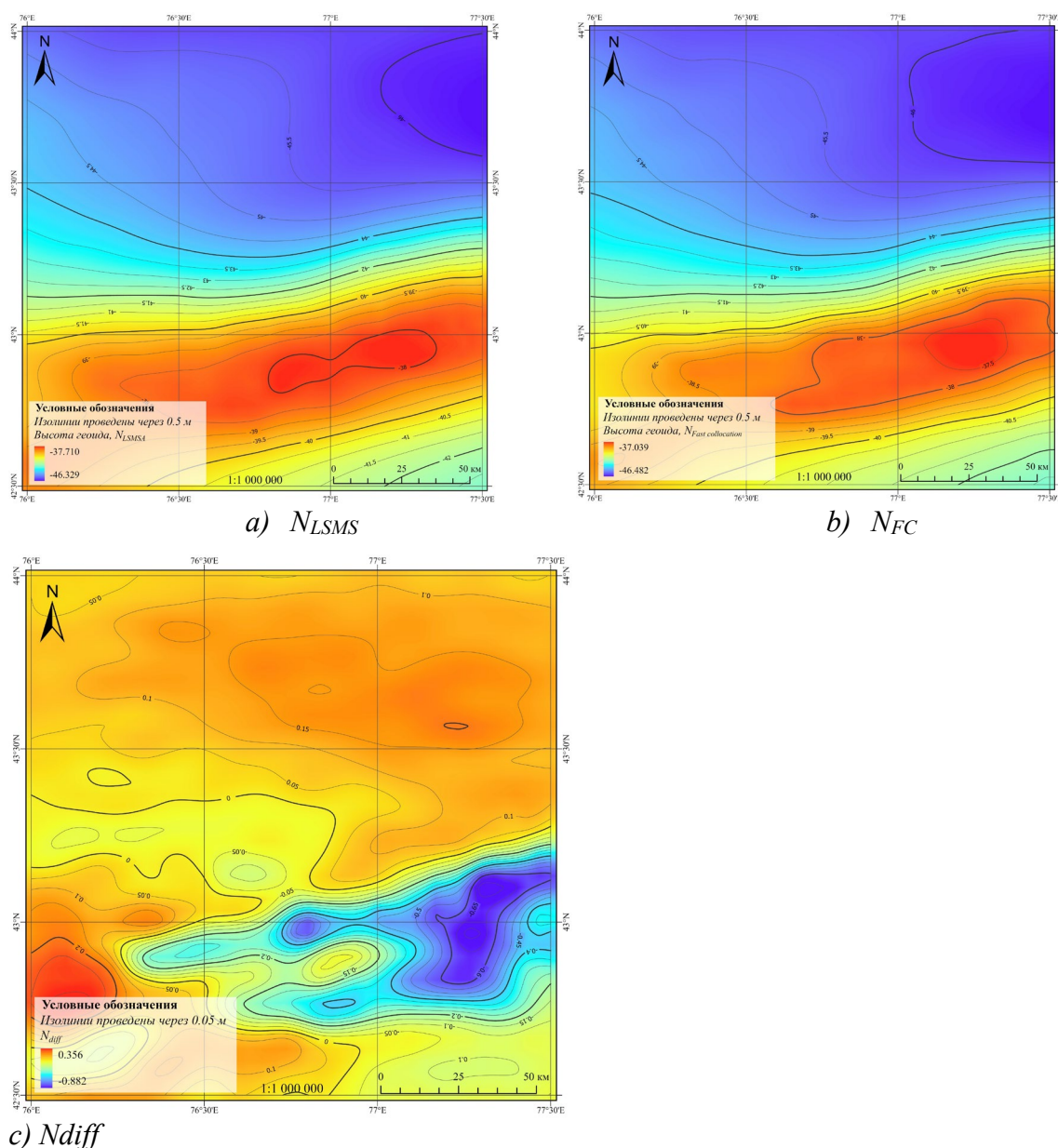


Рисунок 4.1 – Высоты геоида, вычисленные методами а) LSMSA и б) FC
и с) согласованность высчитанных моделей геоида, м

Модели геоида, рассчитанные для исследуемой территории, демонстрируют постепенное увеличение по направлению к горной местности, с высотами, варьирующимися от -46 до - 37м. Наиболее значительное расхождение между методами результаты моделирования LSMSA и FC, достигающее 88 см, наблюдается в горной местности (рисунок 4.1). Поскольку данные ГНСС/Нивелирования для этой территории отсутствуют, на данном этапе невозможно определить, какой из методов лучше описывает геоид в горной местности.

ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 5

Точность моделей геоида в значительной степени зависит от качества исходных данных

и применяемых методик вычислений, которые используются при его построении. Современные исследования и практические примеры убедительно демонстрируют, что совершенствование этих аспектов может значительно повысить точность модели геоида.

Во-первых, качество данных играет ключевую роль в определении точной модели геоида. На всю территорию Республики Казахстан доступны только гравиметрические карты советского периода, качество и актуальность которых не были оценены.

Для повышения точности планируется:

- Продолжить работы по сравнительному и изучению существующих моделей геоида, вычисленных разными международными группами;
- Изучить топографическую редукцию чтобы минимизировать влияние топографических масс на модель геоида,
- Оценить различные техники интерполяции данных для обеспечения более высокой точности входных данных.
- Разработать и применить методы аналитического продолжения вниз для точного переноса гравитационных данных с поверхности на нужную глубину.
- Применить методы сглаживания и фильтрации для устранения шумов и ошибок в комбинированных данных.

Следуя этим рекомендациям, можно значительно улучшить точность модели геоида, что позволит получить более надежные и точные данные для геодезических и геофизических исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования проведена комплексная модернизация местной геодезической сети города Алматы, включающая трансформацию координат и моделирование локального геоида.

Для трансформации координат наилучшие результаты показало полиномиальное преобразование третьего порядка, обеспечившее среднеквадратическое отклонение менее 0.05 м, что подтверждает его высокую точность и устойчивость.

В ходе работы были протестированы различные методы трансформации координат, включая преобразования Гельмерта, аффинные, билинейные, полиномиальные второго и третьего порядка, а также конформные полиномиальные преобразования. Полиномиальные преобразования второго и третьего порядка продемонстрировали наилучшую точность, со среднеквадратическими отклонениями по осям xx и yy в пределах 0.05 м. Эти методы доказали свою эффективность при трансформации координат в условиях сложной топографии города. Конформное полиномиальное преобразование уступает по точности, но остается перспективным для задач, где требуется сохранение формы. Таким образом, для задач модернизации рекомендуется использование полиномиального преобразования третьего порядка, которое сочетает высокую точность и устойчивость к искажениям.

Моделирование локального геоида методом LSMSA продемонстрировало минимальную ошибку ($RMSE = 0.0455$ м) по сравнению с глобальными моделями, такими как EGM2008 и EIGEN-6C4, что подтверждает ее высокую точность по сравнению с глобальными моделями.

Полученные результаты позволяют повысить точность геодезических измерений, создают основу для интеграции данных в глобальные системы и обеспечивают надежную платформу для дальнейших исследований и практических применений в градостроительстве и инженерных изысканиях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГКИНП РК 02-153-2006. Государственный каталог исходных геодезических пунктов Республики Казахстан. — Астана: КГА РК, 2006. — 156 с.
2. СП РК 1.03-106-2013. Инженерные изыскания для строительства. — Астана: Комитет по делам строительства и ЖКХ РК, 2013. — 44 с.
3. ГКИНП (ГНТА)–12–004–07. Инструкция по развитию съёмочного обоснования и съёмке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС. — Астана: КГА РК, 2007.
4. ГКИНП (ГНТА)–01–020–09. Основные положения о государственной геодезической и нивелирной сетях Республики Казахстан. — Астана: КГА РК, 2009.
5. ГКИНП (ГНТА)–03–002–07. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов. — Астана: КГА РК, 2007.
6. ISO 19111:2019. Geographic Information — Referencing by Coordinates. — Geneva: ISO, 2019.
7. ISO 19152:2012. Geographic Information — Land Administration Domain Model (LADM). — Geneva: ISO, 2012.
8. Постановление Правительства Республики Казахстан от 14 марта 2023 г. № 208 «О введении системы координат QazTRF 2023». — Режим доступа: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2300000208>
9. КазНИИГАиК. Архивные отчеты по переходу к системе WGS84. — Алматы: КазНИИГАиК, 1999–2004 гг.
10. КазАГП. Сводные материалы по развитию геодезической сети. — Алматы: КазАГП, 2000–2007 гг.
11. Атрушкевич Е.Н., Земцова С.М. Геодезические исследования на Алматинском геодинамическом полигоне // Вестник КазНИИГАиК. — 2015. — № 2. — С. 25–30.
12. Земцова С.М., Журавлев С.С. Геодинамическая активность юго-востока Казахстана по данным ГНСС-наблюдений // Геодезия и картография. — 2020. — № 4. — С. 21–29.
13. Руководство по созданию и реконструкции городских геодезических сетей с использованием спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS. М.: 2003
14. Europäisches Terrestrisches Referenzsystem 1989 (ETRS89) [Электронный ресурс] // Wikipedia – Die freie Enzyklopädie.
15. Szymaniak, M., Banasik, P. Integration of GNSS-based reference frames in cadastral and geodetic infrastructure: case of Poland // Geodesy and Cartography. – 2016. – Vol. 65(4). – P. 537–546. — DOI: 10.1515/geo-2016-0059. — Режим доступа: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/geo-2016-0059/html>
16. Лукоянов В.П., Земцов А.Ю., Киселёв Д.М. О построении государственной системы координат ГСК-2022 в Российской Федерации // Геодезия и картография. – 2022. – № 1. — С. 3–15. — Режим доступа: https://miigaik.ru/journal/archive/2022/Geodesy_2022_66_1_EN.pdf
17. Зубович, А.В. и др. Поле скоростей GPS для Тянь-Шаня и прилегающих регионов // Tectonics. – 2010. – Т. 29, №6. – DOI: 10.1029/2010TC002772.
18. Amey, R., Craig, T., Jackson, J. и др. Существенный сейсмический риск, связанный с погребёнными разломами под Алматы // Journal of Seismology. – 2021. – Т. 25, №3. – С. 567–583.
19. Tapponnier, P. и др. Активное разломообразование и укорочение земной коры в Тянь-Шане // Journal of Geophysical Research. – 2001. – Т. 106, №B10. – С. 21735–21763.
20. Grützner, C., Fernández-Blanco, D., Strecker, M.R. и др. Активная тектоника в районе Алматы и вдоль фронта Заилийского Алатау // Tectonics. – 2017. – Т. 36, №9. – С. 1685–1705.
21. Трифонов, В.Г., Коржнев, М.М., Лебедев, А.Н. и др. Эволюция внутриконтинентальных горных сооружений: пример Тянь-Шаня // Геология и геофизика. —

2019. – Т. 60, №6. – С. 721–740.

22. Калметьев, Б.З. Геодинамическая нестабильность юго-восточного Казахстана и проблемы инженерной сейсмостойкости // Вестник КазНИИСА. – 2019. – №4. – С. 25–34.

23. UN-SPIDER. Казахстан: использование данных ДЗЗ для снижения рисков бедствий // Программа ООН по космосу. – Вена: UNOOSA, 2023.

24. Havenith, H.-B., Bourdeau, C. Сейсмическая опасность и риск в Центральной Азии: исторический фон и современные подходы // *Earth-Science Reviews*. – 2024. – Т. 245.

25. Шульц, Р., Ломов, А., Евсеев, А. и др. Геопространственный мониторинг и расчётно-механические модели на примере спортивных сооружений // Материалы 11-й Межд. конф. «Экологическая инженерия». – 2020. – DOI: 10.3846/enviro.2020.685.

26. КазНИИГиК. Методические рекомендации по мониторингу пунктов геодезических сетей в тектонически активных условиях. – Алматы: КазНИИГиК, 2021. – 64 с.

27. Искаков, Ш.Х., Баймуханбетова, Д.А. Влияние строительных нагрузок на устойчивость пунктов геодезических сетей // Труды КазНИИГиК. – 2021. – Вып. 1. – С. 37–44.

28. Курманов, А.К., Аскаров, Д.А. Влияние уровня подземных вод на строительство и реконструкцию зданий и сооружений // Наука и техника Казахстана. – 2017. – №1–2. – С. 20–24.

29. Мадимарова, Г.С., Мусрепов, Е.Ж., Аймагамбетов, К.А. и др. Геодезический мониторинг деформаций высотного здания с применением наземного лазерного сканирования // *Journal of Applied Engineering Science*. – 2022. – Т. 20, №4. – С. 1083–1091.

30. Mukupa, W., Roberts, G.W., Hancock, C.M. и др. Применение наземного лазерного сканирования для мониторинга деформаций конструкций: обзор // *Survey Review*. – 2017. – Т. 49, №353. – С. 99–116.

31. Lu, Z., Dzurisin, D., Wicks, C. и др. Введение в геодезический мониторинг деформаций. – Springer, 2017. – 375 с.

32. Нурпеисова, М.Б. Эффективный метод мониторинга поведения массива горных пород в Центральном Казахстане // Евразийская горнорудная промышленность. – 2023. – №1. – С. 19–24.

33. Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. Постоянные рассеиватели в интерферометрии SAR // *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*. – 2001. – Т. 39, №1. – С. 8–20.

34. Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansosti, E. Новый алгоритм мониторинга деформаций поверхности по данным SAR-интерферометрии на малом базисе // *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*. – 2002. – Т. 40, №11. – С. 2375–2383.

35. Trifonov, V.G., Tarponnier, P., Avouac, J.P. и др. Современные разломы и блоковые смещения в горах Тянь-Шаня // *Journal of Geophysical Research*. – 1992. – Т. 97, №B3. – С. 3779–3803.

36. Shults R. et al. Different approaches to coordinate transformation parameters determination of nonhomogeneous coordinate systems. – 2020.

37. Deakin, R. E. (2004). Coordinate transformations in surveying and mapping (Technical Report, pp. 1–31). School of Geospatial Sciences, RMIT University.

38. Gao, Y. (2017). Analysis of coordinate transformation with different polynomial models (Bachelor thesis). Universität Stuttgart, Stuttgart, Germany. https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/9661/1/BscThesis_GaoYueqing.pdf

39. Ghilani, C., & Wolf, P. R. (2010). Adjustment computations: Spatial data analysis (5th ed.). Hoboken.

40. Gil, J., & Mrówczyńska, M. (2012). Methods of artificial intelligence used for transforming a system of coordinates. *Geodetski list*, 4, 321–336.

41. Kohli, A., & Jenni, L. (2008, June). Transformation of cadastral data between geodetic reference frames using finite element method. Paper presented at the FIG Working Week 2008, Stockholm, Sweden.

42. Liu, G. R., & Quek, S. S. (2003). The finite element method: a practical course. Butterworth-Heinemann.

43. Mikhail, E. M. (1976). Observations and least squares. IEP – A Dunn-Donnelley Publisher.
44. Ocalan, T. (2019). Investigation on the effects of number of common points in 2d transformation problem. International Journal of Engineering and Geosciences (IJEG), 4(2), 58–62. <https://doi.org/10.26833/ijeg.446962>
45. The International Association of Oil & Gas Producers. (2018). Geomatics Guidance Note 7, part 2. Coordinate Conversions & Transformations including Formulas (Report No. 373-7-2).
46. Ziggah, Y. Y., Youjian, H., Tierra, A. R., & Laari, P. B. (2019). Coordinate transformation between global and local data based on artificial neural network with K-Fold cross-validation in Ghana. Earth Sciences Research Journal, 23(1), 67–77. <https://doi.org/10.15446/esrj.v23n1.63860>
47. ГКИНП (ГНТА)–01–020–09 – «О государственной геодезической и нивелирной сетях Республики Казахстан», [Электронный ресурс] – URL: <https://new-shop.ksm.kz/upload/egfntd/mshrk/18.pdf>
48. 13.Skeivalas J., Parseliunas E. On the measurement of the neutrino velocity applying the standard time of the Global Positioning System //Measurement Science and Technology. – 2012. – Т. 24. – №. 1. – С. 015002.
49. 14.ГКИНП (ГНТА)–12–004–07 – «Инструкция по развитию съемочного обоснования и съемке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС», [Электронный ресурс] – URL: <https://new-shop.ksm.kz/upload/egfntd/mshrk/10.pdf>.
50. ГКИНП (ГНТА)–01–020–09 –«Основные положения о государственной геодезической и нивелирной сетях Республики Казахстан», [Электронный ресурс] – URL: <https://new-shop.ksm.kz/upload/egfntd/mshrk/18.pdf>.
51. Kotsakis C., Sideris M. G. On the adjustment of combined GPS/levelling/geoid networks //Journal of geodesy. – 1999. – Т. 73. – С. 412-421.
52. Mustafin M., Moussa H. Integration of GNSS Technology and Geometric Levelling for Accurate Height Determination in Uneven Terrains: A Case Study in Lebanon. – 2024.
53. Hoang H. N. et al. Application of adjustment with constrained condition in mixed GNSS, levelling control network and improving accuracy of the Geoid model //Journal of Mining and Earth Sciences Vol. – 2020. – Т. 61. – №. 5. – С. 64-70.
54. Herring T. A., King R. W., McClusky S. C. GAMIT GPS Analysis at MIT Version 10.4 // Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2010A. – 162 p.
55. Herring T. A., King R. W., McClusky S. C. GLOBK: Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program Version 10.4 // Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2010B. – 90 p.
56. Kaplan E. D., Hegarty C. (ed.). Understanding GPS/GNSS: principles and applications. – Artech house, 2017.
57. Майоров А. Н. О выборе преобразования формулы Стокса //Научно-технический сборник по геодезии, аэрокосмическим съемкам и картографии. Физическая геодезия. Москва, ЦНИИГАиК. – 1996.
58. Goyal R., Nagarajan B., Dikshit O. Status of precise geoid modelling in India: A review //Proceedings of 37th Indian National Cartographic Association International Congress on Geoinformatics for Carto-Diversity and Its Management, Indian Cartographer. – 2017. – С. 308-313.
59. Sjöberg L. E. Least squares modification of Stokes' and Vening Meinesz' formulas by accounting for errors of truncation, potential coefficients and gravity data. – University of Uppsala, Institute of Geophysics, Department of Geodesy, 1984.
60. Sjöberg L. E. Refined least squares modification of Stokes' formula //Manuscripta geodaetica. – 1991. – Т. 16. – №. 6. – С. 367-375.
61. Sjöberg L. E. A general model for modifying Stokes' formula and its least-squares solution //Journal of geodesy. – 2003. – Т. 77. – С. 459-464.

62. Sjöberg L. E. A solution to the downward continuation effect on the geoid determined by Stokes' formula //Journal of geodesy. – 2003. – T. 77. – C. 94-100.
63. Janpaule I. Application of KTH method for determination of latvian geoid model //The International Scientific Conference „Innovative Materials, Structures and Technologies”. – 2014. – C. 64-68.
64. Kuczynska-Sieghien J., Lyszkowicz A., Birylo M. Geoid determination for the area of Poland by the least squares modification of Stokes' formula //Acta Geodyn. Geomater. – 2016. – T. 13. – №. 1. – C. 19-26.
65. Abdollahzadeh M., Alamdari M. Application of Molodensky's Method for Precise Determination of Geoid in Iran //Journal of Geodetic Science. – 2011. – T. 1. – №. 3. – C. 259-270.
66. Bae T. S. et al. Update of the precision geoid determination in Korea //Geophysical prospecting. – 2012. – T. 60. – №. 3. – C. 555-571.
67. Ellmann A. The geoid for the Baltic countries determined by the least squares modification of Stokes formula : дис. – Infrastruktur, 2004.
68. Kiamehr R. Precise gravimetric geoid model for Iran based on GRACE and SRTM data and the least-squares modification of Stokes' formula: with some geodynamic interpretations : дис. – KTH, 2006.
69. Ågren J., Kiamehr R., Sjöberg L. Computation of a New Gravimetric Geoid Model over Sweden using the KTH Method: Paper presented at FIG working week, 14-18 June 2008, Stockholm, Sweden //FIG working week, 14-18 June 2008, Stockholm, Sweden. – 2008.
70. Ågren J. Regional geoid determination methods for the era of satellite gravimetry: numerical investigations using synthetic earth gravity models : дис. – Infrastruktur, 2004.
71. Abbak R. A., Ustun A. A software package for computing a regional gravimetric geoid model by the KTH method //Earth science informatics. – 2015. – T. 8. – C. 255-265.
72. Molodensky M. S., Eremeev V. F., Yurkina M. I. Methods for study of the external gravity field and figure of the Earth //Israeli Program for Scientific Translations, Jerusalem. – 1962.
73. Moritz H. Geodesy and Geophysics in their interaction with mathematics and physics, and some open problems in geodesy //Quo Vadimus: Geophysics for the Next Generation. – 1990. – T. 60. – C. 1-4.
74. ELLMANN A., SJÖBERG L. E. Ellipsoidal correction for the modified Stokes formula //Bollettino di geodesia e scienze affini. – 2004. – T. 63. – №. 3. – C. 153-172.
75. Moritz H. Geodetic reference system 1980 //Bulletin Géodésique. – 1992. – T. 66. – №. 2. – C. 187-192.