

УДК 528.3: 528.063.1: 528.21

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, Шоганбекова Д.А.

Зарубежный научный консультант

PhD, Roman Shults

Алматы, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	4
НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ	6
ВВЕДЕНИЕ	7
1. СОСТОЯНИЕ МЕСТНОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЕТИ ГОРОДА АЛМАТЫ И АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПРОБЛЕМ	12
1.1. Характеристика местной геодезической сети города	12
1.2. Состояние точности и устойчивости локальной геодезической сети под влиянием природных и техногенных процессов	17
1.3. Выводы по главе 1	22
2. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ МОДЕРНИЗАЦИИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЕЙ	24
2.1. Зарубежный опыт по модернизации геодезической сети	24
2.2. Отечественный опыт по модернизации геодезической сети	29
2.3. Выводы по главе 2	31
3. ИНФОРМАЦИОННАЯ БАЗА, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ТРАНСФОРМАЦИИ КООРДИНАТ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛОКАЛЬНОГО ГЕОИДА ГОРОДА АЛМАТЫ	33
3.1. Обследование геодезических пунктов АГС города Алматы	33
3.2. Проведение спутниковых (GNSS) наблюдений на пунктах геодезической сети	36
3.3. Обработка полученных спутниковых данных в программном комплексе GAMIT/GLOBK	37
3.4. Уравнивание геодезической сети и получение высокоточных координат и высот пунктов	40
3.5. Обоснование выбора априорных файлов (apf)	41
3.6. Формирование базы гравиметрических данных (комбинирование наземных и глобальных данных) для территории исследования	49
3.7. Анализ и оценка точности цифровых моделей рельефа (ЦМР)	54
3.8. Оценка и подбор глобальной геопотенциальной модели (ГГМ)	61
3.9. Выводы по главе 3	65
4. ТРАНСФОРМАЦИЯ КООРДИНАТ МЕЖДУ ЛОКАЛЬНОЙ И ГЛОБАЛЬНОЙ СИСТЕМАМИ КООРДИНАТ	68
4.1. Конформное преобразование Гельмерта (4-параметрическая модель)	69
4.2. Билинейное преобразование	70

4.3. Аффинное преобразование координат	71
4.4. Полиномиальное преобразование второго и третьего порядка	72
4.5. Полиномиальный конформный метод преобразования второго и третьего порядка	74
4.5. Сравнительный анализ точности методов трансформации координат	76
4.6. Выводы по четвертой главе	78
5. ПОСТРОЕНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ГЕОИДА ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА АЛМАТЫ	80
5.1. Методика вычисления и построения локальной модели геоида	80
5.2. Модификация формулы Стокса методом наименьших квадратов	81
5.3. Результаты построения геоида и оценка точности	92
5.4. Выводы по главе 5	96
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	97
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	99

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

FABDEM	- Forest And Buildings removed Copernicus DEM, цифровая модель рельефа, очищенная от деревьев и зданий, основанная на данных Copernicus.
DEM	- Digital Elevation Model, цифровая модель высот, представляющая рельеф земной поверхности.
DSM	- Digital Surface Model, цифровая модель поверхности, включающая здания, растительность и другие объекты.
DTM	- Digital Terrain Model, цифровая модель рельефа, отражающая именно поверхность земли без объектов.
DWC	- Аналитическое продолжение вниз
EGM2008	- Earth Gravitational Model 2008 (Гравитационная модель Земли 2008 г.)
EIGEN-6C4	- глобальная комбинированная модель гравитационного поля Земли (GFZ, Potsdam), включающая спутниковые и наземные данные
GAMIT/GLOBK	- Прикладное ПО Масачусетского Технологического Института
GECO	- Global Earth Combined Model, Глобальная комбинированная модель Земли
GMF	- Global Mapping Function
GPS	- Global Positioning System (Глобальная система позиционирования)
ICGEM	- International Centre for Global Earth Models (Международный центр глобальных моделей Земли)
IGS	- International GNSS Service (Международная служба ГНСС)
ITRF	- International Terrestrial Reference Frame (Международная опорная земная система отсчёта)
ITRS	- International Terrestrial Reference System (Международная опорная земная система отсчёта)
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)
QazTRF-23	- Qazaqstan Terrestrial Reference Frame 2023, Казахстанская земная координатная отсчетная основа 2023 года
RINEX	- Международный формат спутниковых данных RINEX
SGG-UGM-2	- Satellite Gravity Gradiometry University of Graz Model, глобальная модель гравитационного поля, построенная на данных спутника GOCE.
SRTM	- Shuttle Radar Topography Mission (Радиолокационная топографическая миссия шаттла)

STD	- Standard deviation estimate (оценка стандартной отклонении)
SVD	- Singular value decomposition (сингулярное разложение значения)
VMF	- Vienna Mapping Function
WGM2012	- World Gravity Map (Гравитационная карта мира)
WGS84	- World system of geodetic parameters of the Earth 1984 (всемирная система геодезических параметров Земли 1984 года)
XGM2019e_2159	- Комбинированная модель глобального гравитационного поля.
АГС	- Астрономогеодезическая сеть
БСВ-77	- Балтийской системе высот 1977 года
ГГМ	- Глобальная гравитационная модель
ГЛОНАСС	- Глобальная навигационная спутниковая система Российской Федерации
ГНСС	- Глобальная навигационная спутниковая система
ГПЗ	- Гравитационное поле Земли
МСК	- Местная система координат
НЦГПИ	- Национальный центр геодезии и пространственной информации
ЦМР	- Цифровая модель рельефа

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 плановой геодезической сети города Алматы с определением параметров перехода к системе WGS84 на основе современных алгоритмов обработки спутниковых наблюдений и трансформации координат.

Впервые для территории города Алматы создана локальная модель геоида высокой точности на основе интеграции спутниковых и наземных гравиметрических данных.

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:

- Изучить состояние и провести анализ основных проблем местной геодезической сети города Алматы.
- Провести обследование и инвентаризацию существующих геодезических пунктов в городе Алматы, выполнить обработку и уравнивание спутниковых наблюдений с использованием программного комплекса GAMIT/GLOBK.
- Применить и сравнить различные методы трансформации координат между глобальной системой WGS 84 и местной системой координат города Алматы, выполнить анализ точности и определить оптимальный метод.
- Построить локальную модель геоида для территории города Алматы на основе интеграции спутниковых и наземных гравиметрических данных.

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:

Модернизация плановой геодезической сети города Алматы на основе современных методов обработки спутниковых наблюдений и трансформации координат для повышения точности пространственного позиционирования.

Построение локальной модели геоида высокой точности для города Алматы с использованием спутниковых и наземных гравиметрических данных.

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 «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 8 научных работ, из них: 1 статья 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.

1. СОСТОЯНИЕ МЕСТНОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЕТИ ГОРОДА АЛМАТЫ И АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПРОБЛЕМ

1.1 Характеристика местной геодезической сети города 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-23 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 ETRS89 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 современным стандартам [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. Это создает предпосылки для устойчивого пространственного развития города, обеспечения инженерной и социальной безопасности, а также повышения научной точности геодинимических исследований.

1.2. Состояние точности и устойчивости локальной геодезической сети под влиянием природных 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 геодинимики. 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 1.1.1).

Таблица 1.1.1 – Факторы, вызывающие деформацию геодезической сети города Алматы

Категория фактора	Источники влияния	Последствия для геодезической сети
Сейсмический, Тектонический	Землетрясения, движение плит, неотектоника	Смещение геодезических пунктов из-за горизонтальных и вертикальных движений тектонических плит
Техногенный, антропогенный	Активное гражданское строительство, прокладка метрополитена	деформации, осадки, сдвиги, разрушение геодезических пунктов

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.

1.3. Выводы по главе 1

Результаты проведенного анализа свидетельствуют о наличии устойчивого комплекса факторов, негативно влияющих на функциональное состояние и метрологическую надежность геодезической сети города Алматы. В исторической ретроспективе развитие координатной основы города происходило в рамках Единой государственной геодезической сети СССР, на основе стандартов и методики середины XX века, с последующим инерционным переходом на национальную систему координат Казахстана. Однако, учитывая высокую геодинамическую активность региона и значительную урбанизированную трансформацию городской среды, существующая система координат утратила свою актуальность как в техническом, так и в методическом аспектах.

Известно, что Алматы находится в пределах Северного Тянь-Шаня - одной из наиболее активных тектонических зон Евразийского континента. Подтвержденные данными спутникового позиционирования неотектонические процессы проявляются в виде устойчивых горизонтальных смещений до 15 мм/год и вертикальных деформаций до 8 мм/год [18,22]. Эти значения значительно превышают нормативные допуски на смещения опорных пунктов, установленные действующими строительно-геодезическими нормами. Таким образом, поддержание пространственно-временной устойчивости пунктов в таких условиях без реализации динамических подходов к мониторингу становится невозможным.

Наряду с естественными геодинамическими воздействиями в структуре деструктивных факторов отчетливо выделяется техногенное давление, обусловленное активным строительством, реконструкцией транспортной и инженерной инфраструктуры, глубокими земляными работами и эксплуатацией подземных сооружений. В условиях интенсивного освоения территорий, особенно в центральной и южной частях г. Алматы, фиксируются локальные осадки и смещения земной поверхности, достигающие 30–35 мм/год, что по амплитуде сопоставимо с последствиями слабых сейсмических событий [27,28,29]. Анализ разрушенных или недоступных опорных пунктов, по данным КазНИИГиК, свидетельствует о высокой степени износа сети – до 40% пунктов утратили эксплуатационную пригодность или подверглись физическому разрушению.

Дополнительной проблемой является фрагментация координатного пространства, возникшая в результате одновременного существования разнородных локальных систем координат, сформированных без должного трансформационного согласования с государственной системой. Это не только затрудняет интеграцию геоанных в инженерные, кадастровые и навигационные приложения, но и увеличивает вероятность возникновения нормативно-технических ошибок на всех этапах жизненного цикла объектов капитального строительства.

В этой связи модернизация геодезической сети г. Алматы не может рассматриваться исключительно как инфраструктурный вопрос. Это должен быть научно обоснованный процесс, включающий:

- отказ от статических координатных моделей в пользу динамических, учитывающих тектонические и техногенные смещения;
- интеграция современных ГНСС и гравиметрических технологий, обеспечивающих метрологически прослеживаемые координаты;
- создание единой цифровой платформы, объединяющей местные и государственные системы координат с возможностью автоматизированного преобразования;
- регулярное обновление каталога точек и повторное нивелирование на основе современных моделей геоида.

Кроме того, необходимость обеспечения точности пространственного позиционирования в приложениях ГИС, BIM, городского моделирования, кадастрового учета и инженерных изысканий требует синхронизации существующих геодезических данных с системами QazTRF-23 и ITRF, которые обеспечивают глобальную совместимость и единообразие координатной информации.

Таким образом, по результатам комплексного анализа можно сделать вывод, что существующая геодезическая сеть г. Алматы находится в критическом состоянии. Отсутствие современной обработки уравнивания, деградация пунктов, несогласованность систем координат и неучет геодинамических воздействий обуславливают необходимость перехода к новой модели пространственного обеспечения. Она должна базироваться на принципе интеграции данных, устойчивости к внешним возмущениям и функциональной адаптивности к современным цифровым сервисам и международным стандартам точности.

2 СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ МОДЕРНИЗАЦИИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

2.1. Зарубежный опыт по модернизации геодезической сети

Модернизация национальных геодезических сетей в зарубежной практике опирается на переход к глобальным и региональным реализациям ITRF/ETRS, выявление и моделирование наследованных деформаций локальных датумов с применением комбинированных решений преобразования, а также на строгия оценки точности и внешней валидации. Важнейшим методологическим следствием распространения GNSS стало требование увязки национальных систем с глобальными кадрами (WGS84/ITRF), что подчёркивается в современных обзорах и реализовано на ряде национальных примеров.

Методологические подходы и математические модели. В качестве основного метода преобразований применяются 7-параметрические конформные модели (Bursa–Wolf/Helmert), обеспечивающие совместимость датумов через трех компонентов координат, три вращения и масштабный коэффициент. Методы широко известны и подробно описаны в классической и прикладной литературе по координатным преобразованиям.

Для компенсации неконформных искажений в сети используются аффинные и полиномиальные преобразования с различными параметрами.

Комбинированные (гибридные) схемы реализуют последовательность: (i) удаление крупномасштабной систематики, (ii) моделирование остаточного поля деформаций аппроксимационными методами либо регулярной сеткой смещений с билинейной/бикубической интерполяцией. Такая техника обоснована и формализована, включая постановку триангуляции Делоне, введение граничных условия и алгоритмы регуляризации.

Великобритания на протяжении многих десятилетий использовала в качестве основной систему координат OSGB36 (Ordnance Survey Great Britain 1936). Эта система была построена на основе датума Airy 1830 и опорной точки в Гринвиче. Она широко применялась в топографии, кадастре и картографии, но её локальная природа создавала определённые ограничения. Во-первых, OSGB36 плохо согласовывалась с современными глобальными системами (WGS84/ETRS89), что осложняло использование спутниковых методов позиционирования. Во-вторых, в системе накапливались искажения, которые на отдельных участках превышали несколько метров.

С развитием спутниковых технологий и ростом требований к точности пространственных данных стало очевидно, что Великобритании необходим механизм перехода к общеевропейской системе ETRS89, которая жёстко связана с глобальной земной

системой отсчёта (ITRS) и используется во всех странах Европы. Однако простой семипараметрический переход (Helmert transformation) не мог обеспечить требуемую точность, так как его погрешность достигала 5–10 метров.

Для решения этой задачи Ordnance Survey разработало специальную трансформационную модель OSTN15 (Ordnance Survey Transformation 2015), которая пришла на смену более ранней OSTN02. OSTN15 представляет собой сеточную модель искажений (distortion grid), созданную на основе точных GNSS-наблюдений, нивелирных данных и классической геодезической сети. Она позволяет преобразовывать координаты между ETRS89 и OSGB36 с точностью порядка 1–2 см по всей территории Великобритании.

Таким образом, использование OSTN15 обеспечивает практически бесшовный переход между глобальной системой координат и локальной системой, сохраняя преемственность с историческими данными. В сочетании с вертикальной моделью ODN/OSGM15 для высотных преобразований, эта система обеспечивает единое координатно-высотное поле, пригодное как для современных GNSS-технологий, так и для использования архивных картографических материалов.

Сегодня OSTN15 является официальным инструментом трансформации координат в Великобритании. Он применяется во всех кадастровых, топографических и инженерных работах, гарантируя полную совместимость национальной геодезической основы с общеевропейскими стандартами и глобальными навигационными системами.

В России на протяжении второй половины XX века применялась система координат СК-42, построенная на основе эллипсоида Красовского (1940) и датумов, определённых по результатам астрономо-геодезических наблюдений середины прошлого столетия. Эта система обеспечивала развитие топографо-геодезических работ и создание карт всего Советского Союза, но к концу столетия её точность и совместимость с современными спутниковыми технологиями оказались ограниченными.

Для временного улучшения характеристик в 1995 году была введена система СК-95, которая представляла собой уточнённый вариант СК-42 с обновлёнными параметрами и более согласованной связью с глобальными спутниковыми системами. Тем не менее, и СК-95 по своей сути оставалась локальной системой, не имеющей жёсткой привязки к международным системам отсчёта.

С развитием глобальных технологий GNSS и необходимостью интеграции в международное геодезическое пространство в России была разработана новая государственная система координат — ГСК-2011 (Государственная система координат 2011 года). Она основана на международной системе ITRF (International Terrestrial Reference Frame) и согласована с европейской системой ETRS89. Реализация ГСК-2011 обеспечивается

через сеть постоянно действующих референчных GNSS-станций, объединённых в национальную систему ФАГС (фундаментальная астрономо-геодезическая сеть).

Переход к ГСК-2011 был официально закреплён постановлениями Росреестра и Федерального агентства геодезии и картографии, а начиная с 2017 года эта система стала обязательной для всех новых геодезических, кадастровых и картографических работ. Для обеспечения преемственности данных были разработаны параметры трансформации между СК-42, СК-95 и ГСК-2011. На практике применяются как семипараметрические преобразования Гельмерта, так и специализированные сеточные модели (gridded transformations), учитывающие локальные искажения старых систем.

Таким образом, Россия осуществила поэтапный переход от локальных координатных систем советского периода к современной системе ГСК-2011, полностью совместимой с международными и европейскими стандартами. Это позволило обеспечить единство координатно-высотного пространства страны, повысить точность и надёжность геодезических данных, а также интегрировать национальную геодезическую инфраструктуру в глобальные и региональные системы пространственной информации.

С ростом роли навигационных систем Украина в начале 2000-х годов приступила к созданию новой системы координат. В 2007 году постановлением Кабинета Министров Украины была утверждена система УСК-2000 (Українська Система Координат 2000 року). Она основана на европейской системе ETRS89, которая жёстко связана с международной земной системой отсчёта ITRS (эпоха 1989.0).

Реализация УСК-2000 обеспечивается за счёт национальной сети постоянно действующих референчных станций GNSS (UA-EUPOS/ZAKPOS и др.), которые создают современную координатную основу для всей территории страны. Таким образом, Украина получила систему координат, полностью совместимую с европейскими стандартами и глобальными технологиями спутникового позиционирования.

Для обеспечения преемственности был разработан механизм трансформации из старых систем (СК-42, СК-63) в УСК-2000. Применяются семипараметрические преобразования Гельмерта, а также локальные уточнённые сеточные модели (gridded transformations), которые позволяют минимизировать искажения при переходе. На практике это обеспечивает точность преобразования на уровне 10–20 см, тогда как простая параметрическая трансформация ограничивалась метрами.

С момента введения УСК-2000 все новые топографо-геодезические и кадастровые работы в Украине выполняются в этой системе. Старые данные постепенно трансформируются, что позволяет сохранить преемственность и обеспечить их совместимость с современными пространственными сервисами. В результате страна

получила единое и согласованное координатное пространство, соответствующее европейским требованиям (INSPIRE) и полностью интегрированное в международное геодезическое сообщество.

До конца XX века в Словении применялась система координат D48 (Datum 1948), которая была основана на эллипсоиде Бесселя 1841 и имела происхождение из общегославской геодезической традиции. Система D48 создавалась в условиях ограниченной инструментальной базы и локальных астрономо-геодезических измерений, что неизбежно приводило к накоплению искажений при переходе к крупным территориям. В частности, в горных районах Словении погрешности достигали нескольких метров, что становилось серьёзной проблемой для современного кадастра, топографии и инженерных изысканий.

С развитием спутниковых технологий и вхождением страны в единое европейское геодезическое пространство возникла необходимость перехода к системе координат, совместимой с глобальными и общеевропейскими стандартами. В качестве такой основы была выбрана система D96/TM (Datum 1996/Transverse Mercator), являющаяся национальной реализацией общеевропейской системы ETRS89. D96 базируется на сети постоянных GNSS-станций и гарантирует привязку координат к Международной земной системе отсчёта (ITRS) в эпоху 1989.0. Для удобства практических применений в картографии и кадастре она реализована в проекции поперечного цилиндра Гаусса–Крюгера (Transverse Mercator).

Переход от D48 к D96/TM осуществлялся через определение параметров семипараметрического преобразования Гельмерта, включающего три сдвига, три угла поворота и масштабный коэффициент. Однако опыт показал, что одного только параметрического преобразования недостаточно для достижения высокой точности из-за выраженных локальных искажений старой системы. Поэтому Геодезическое управление Словении (GURS) разработало дополнительную корректирующую сетку поправок (gridded transformation), которая позволила существенно повысить точность преобразования координат.

В результате, при использовании официальной сетки трансформации обеспечивается точность порядка нескольких сантиметров, тогда как простое параметрическое преобразование ограничивалось метрами. Именно благодаря такому подходу удалось обеспечить массовый переход кадастровых и картографических данных в новую систему без потери точности и согласованности.

С 2008 года D96/TM является официальной системой координат Словении, обязательной для всех видов геодезических, кадастровых и картографических работ. Применение этой системы позволило интегрировать национальные пространственные

данные в европейскую инфраструктуру INSPIRE, обеспечив единство координатного пространства и совместимость со всеми современными GNSS-технологиями.

На протяжении всего XX века в Хорватии применялась локальная система координат HDKS (Hrvatski Državni Koordinatni Sustav), основанная на датуме Hermannskogel и эллипсоиде Бесселя 1841. Высоты определялись в системе HVRS1875, привязанной к уровню моря в Триесте, зафиксированному в 1875 году. Эти системы являлись фундаментом национальной картографии и кадастра, однако к концу столетия стали проявляться их существенные ограничения. Прежде всего это относилось к несовместимости со спутниковыми технологиями (GPS, ГЛОНАСС, Galileo), а также к наличию накопленных искажений координат, достигавших метровых значений на отдельных территориях.

В условиях стремительного внедрения спутниковых методов позиционирования и необходимости интеграции в общеевропейское геодезическое пространство, в конце 1990-х годов в Хорватии начался процесс перехода на новую систему координат. В качестве основы была выбрана система HTRS96 (Hrvatski Terestrički Referentni Sustav 1996), представляющая собой национальную реализацию европейской системы ETRS89. Параллельно была введена и новая система высот - HVRS71, основанная на нивелирной сети и нуле уровня моря в Которе (1971). Эти изменения позволили обеспечить прямую связь национальной геодезической основы с глобальными и региональными референчными системами.

Ключевой задачей переходного периода стало преобразование накопленных массивов данных, существовавших в старой системе HDKS/HVRS1875, в новую систему HTRS96/HVRS71. Простое семипараметрическое преобразование типа Helmert оказалось недостаточным, так как оно обеспечивало точность лишь на уровне 1–2 метров. Для решения этой проблемы Государственное геодезическое управление Хорватии разработало специализированную модель T7D (Transformation 7 + Distortion). Она сочетала в себе классическое семипараметрическое преобразование с использованием трёх сдвигов, трёх поворотов и масштаба, а также корректирующую модель искажений (distortion grid), которая учитывала локальные деформации старой сети. Благодаря этому удалось достичь точности преобразования порядка 5–20 сантиметров, что является приемлемым для кадастровых и топографо-картографических работ.

Официальное внедрение системы HTRS96/HVRS71 состоялось в 2011 году. С этого момента все новые геодезические, картографические и кадастровые проекты в Хорватии выполняются в новых системах, а архивные данные постепенно трансформируются при помощи модели T7D. Такой подход позволил не только модернизировать геодезическую основу страны, но и обеспечить её полную совместимость с европейскими и международными стандартами. В результате Хорватия получила единое и согласованное

координатно-высотное поле, которое отвечает современным требованиям к точности и надёжности пространственных данных.

2.2. Отечественный опыт по модернизации геодезической сети

Становление современной координатно-высотной основы Республики Казахстан связано с нормативной реформой 2022–2025 гг. Базовым актом стал Закон РК «О геодезии, картографии и пространственных данных» (№ 166-VII от 21.12.2022), который закрепил полномочия государства по установлению государственных систем отсчёта, охране пунктов опорных сетей и созданию Национальной инфраструктуры пространственных данных (НИПД). Тем самым была сформирована правовая база для перехода от наследуемых систем (СК-42, БСВ-77) к геоцентрическим и цифровым стандартам [33].

Во исполнение Закона Правительство приняло Постановление от 14.03.2023 № 208, которым установлены государственные системы отсчёта и картографические проекции; документ определил архитектуру перехода к национальной геоцентрической системе координат, обеспечив управляемый отказ от устаревших систем [34].

Реализация реформы опирается на подзаконные акты уполномоченного органа 2023 г.: «Инструкция по созданию и развитию государственных геодезических, нивелирных и гравиметрических сетей» (приказ № 107/НК от 27.03.2023) и «Правила отнесения к государственным геодезическим сетям и применения постоянно действующих референцных станций (CORS)» (приказ № 127/НК от 31.03.2023). Эти документы регламентируют состав иерархии сетей, требования к полевым работам и уравниванию, а также критерии включения CORS в состав ГГС [35].

Целевая архитектура опорной основы: QazTRF-23, QazVRF, QazGRF. Национальная координатная отсчётная основа QazTRF-23 реализована на эпоху 2022.328 в привязке к ITRF2014, распространяется на всю территорию РК и опирается на пункты астрономо-геодезической сети, сети сгущения и нивелирной сети. Для согласования с СК-42 предусмотрена матрица трансформации (grid-shift), задающая поле деформаций между системами [36].

Высотная основа QazVRF и гравиметрическая основа QazGRF формируют единую систему, выступая обязательным элементом согласования спутниковых определений, нивелирования и гравиметрии в инженерной практике [37].

Ввод QazTRF-23 и развёртывание сервисной инфраструктуры. С 1 января 2025 г. QazTRF-23 введена в промышленную эксплуатацию одновременно с национальной сетью CORS; о завершении перехода официально сообщили ведомственные и отраслевые

источники. Это обеспечило единство координатного пространства и возможность высокоточного позиционирования в реальном времени (RTK) [38].

В составе цифровых сервисов функционируют: информационная система «Государственное геодезическое обеспечение» (ggo.gov.kz) для управления CORS, предоставления корректирующей информации и трансформации координат, а также Государственный геопортал НИПД (map.gov.kz) - единая цифровая картографическая платформа с публикацией Единой цифровой картографической основы и единой ортофотомозаики в QazTRF-23 [39].

Иерархия и требования к точности. Инструкцией 2023 г. формализована многоуровневая структура ГГС (ФАГС, ВГС, ССГС, СГС-1, ТГС) и соответствующие критерии точности (в мм $\pm$ ppm для планового и высотного положения), а также производственный цикл: проектирование $\rightarrow$ рекогносцировка и закрепление $\rightarrow$ измерения $\rightarrow$ уравнивание $\rightarrow$ выпуск каталогов. Нормативно закреплена обязательность интеграции с ITRF на верхнем уровне, участие CORS в уравнивании и требования к предоставлению наблюдений [40].

В отечественной практике приведения наследованных данных к QazTRF-23 применяется двухступенчатый подход, согласованный с международными руководствами:

- (1) Жёсткая геометрия - оценка 7-параметрического подобия (Bursa-Wolf/Molodensky-Badekas) по устойчивой сети общих пунктов для удаления глобальных сдвигов, вращений и масштаба;
- (2) Поле деформаций - моделирование остаточных, пространственно переменных искажений посредством сеток деформаций (grid-shift, форматы NTv2/GSB) или локальных полиномиальных/сплайновых моделей с валидацией по независимому контролю (RMSE, квантиль ΔQ). Такой контур соответствует IOGP 373-7-2 и широко реализован в современном ПО (EPSG/PROJ) [41].

Теоретико-методическая база (преобразования Гельмерта/Молоденского, состав преобразований, направление операций) изложена в классических руководствах по трансформациям координат и используется как справочная основа при проектировании национальных трансформаций [42].

Производственный маршрут модернизации (типовой). Сформировался повторяемый технологический маршрут, встроенный в ведомственные процессы и сервисы:

1. Инвентаризация и обследование пунктов: паспортирование, оценка сохранности центров, условий для GNSS/нивелирования; при необходимости - восстановление знаков.

2. Спутниковые наблюдения и уравнивание: длительные сессии на пунктах различных уровней с участием CORS; блочное уравнивание, анализ ошибок и мониторинг временных рядов; публикация каталогов координат в QazTRF-23.

3. Трансформация и унификация архивов: расчёт параметров перехода, построение и обновление сеток деформаций между СК-42/локальными системами и QazTRF-23, контроль стабильности во времени.

4. Согласование «план-высота-гравитация»: развитие ГНСС и гравиметрических сетей, расчёт региональных моделей (квазигеоид/геоид) для увязки координатной и высотной основ.

5. Публикация и сервисы: предоставление RTK-поправок и сервисов трансформаций через GGO; публикация базовых карт и ортофотомозаики через геопортал НИПД.

Практические эффекты внедрения. Модернизация обеспечила (i) единство координатного пространства для ГИС и отраслевых данных, (ii) оперативное высокоточное позиционирование (RTK) на всей территории страны, (iii) цифровизацию картографической основы и широкое распространение сервисов доступа к пространственным данным в QazTRF-23.

2.3. Выводы по главе 2

Анализ зарубежного опыта модернизации национальных геодезических сетей показал, что ключевым направлением является переход к глобальным и региональным реализациям ITRF/ETRS, что обеспечивает прямую совместимость национальных координатных основ с международными системами WGS84/ITRS. Практика Великобритании, Словении, Хорватии, а также России и Украины свидетельствует о том, что простого применения параметрических моделей преобразования недостаточно: накопленные деформации старых датумов требуют построения уточнённых комбинированных решений, включающих сеточные модели остаточных искажений (distortion grids). Это позволяет достичь сантиметрового уровня точности и обеспечить преемственность архивных картографических данных.

Методологическая база подобных преобразований складывается из классических семипараметрических моделей (Bursa–Wolf/Helmert), дополненных методами аффинных и полиномиальных преобразований, а также гибридных схем, где крупномасштабная систематика удаляется параметрическими методами, а остаточные локальные деформации моделируются регулярными сетками смещений с билинейной и бикубической интерполяцией. Такой подход отражает современный мировой стандарт и получил широкое распространение в программных продуктах и национальных службах координатных систем.

Отечественный опыт Казахстана подтверждает универсальность этих принципов. Переход к системе QazTRF-23 реализован на основе ITRF2014 и сопровождается созданием согласованных высотной и гравиметрической основ (QazVRF и QazGRF), что обеспечивает комплексное единство «план-высота-гравитация». Для согласования со старыми системами (СК-42, БСВ-77) применяется двухступенчатый контур: оценка параметров подобия и моделирование остаточных деформаций в формате grid-shift.

Таким образом, современная парадигма модернизации геодезических сетей заключается в создании геоцентрических координатных систем, интегрированных с глобальными стандартами, и в применении сеточных моделей для устранения локальных искажений. Это обеспечивает высокую точность, совместимость с GNSS-технологиями и полноценное включение национальных пространственных данных в международные инфраструктуры (INSPIRE, ITRF/ETRS).

3. ИНФОРМАЦИОННАЯ БАЗА, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ТРАНСФОРМАЦИИ КООРДИНАТ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛОКАЛЬНОГО ГЕОИДА ГОРОДА АЛМАТЫ

3.1. Обследование геодезических пунктов АГС города Алматы

Астрономо-геодезическая информация является фундаментальной составляющей при трансформации координат между локальной геодезической системой города Алматы и глобальными системами (WGS84, ITRF), а также при оценке точности локальной модели геоида. Полнота, согласованность и метрологическое качество исходных данных напрямую определяют надежность вычисляемых параметров перехода и точность конечной геодезической модели. С учетом сложности исследуемого региона - высокой сейсмической и тектонической активности, антропогенных факторов и необходимости интеграции архивных и современных данных - формируемая информационная база включает в себя несколько взаимосвязанных компонентов:

- Исходная координатно-высотная основа формируется на базе архивных каталогов астрономо-геодезической сети (АГС) города Алматы, содержащие плоские координаты пунктов триангуляции I класса в местной системе координат; нормальные высоты пунктов, определенные методами нивелирования II класса в Балтийской системе высот 1977 года (БСВ77). Архивные данные обеспечивают историческую преемственность координатной основы и позволяют оценить долговременную стабильность геодезических пунктов в условиях сейсмической активности региона.

- Формирование гравиметрической основы для построения локальной модели города Алматы. Была создана цифровая модель гравитационного поля путем комбинирования наземных (оцифрованные гравиметрические карты 1:200000 масштаба) и глобальных данных (WGM2012). Для построения локальной модели геоида была сформирована цифровая модель гравитационного поля, основанная на интеграции оцифрованных наземных гравиметрических карт масштаба 1:200 000 и глобальной модели гравитационного поля WGM2012.

- Определение эллипсоидальных координат и высот путем проведения и обработки суточных спутниковых наблюдений, в статическом режиме с дискретностью 30 секунд на пунктах АГС. Постобработка спутниковых измерений с применением специализированного программного комплекса GAMIT/GLOBK позволяет учитывать влияние систематических ошибок, тем самым обеспечивает субсантиметровую точность определения пространственных координат.

- Для построения локальной модели геоида был выполнен систематический сбор и оценка точности глобальных гравитационных моделей (EGM2008, XGM2019e_2159, GECO, SGG-UGM-2,

Eigen-6C4) и цифровых моделей рельефа (SRTM, Copernicus DEM, NASADEM, MERIT DEM, FABDEM). Эти модели были выбраны с учётом их пространственного разрешения, гармонического порядка разложения, актуальности данных и степени согласованности с наземными гравиметрическими измерениями и спутниковыми наблюдениями. Для каждой модели проведена предварительная оценка качества, включающая анализ остаточных погрешностей, сравнение с локальными гравиметрическими аномалиями и приведение к единой системе координат. Выполненные процедуры позволили определить весовые коэффициенты для дальнейшей интеграции данных и минимизировать систематические смещения при вычислении высот геоида. Собранные и обработанные ГГМ и ЦМР составляют ключевой компонент информационной базы, обеспечивающей корректный учёт гравитационных и топографических факторов при моделировании локального геоида и выполнении параметрической трансформации координат между локальной и глобальной системами.

Информационная база координатно-высотной основы была сформирована на основе данных с архивных каталогов астрономо-геодезической сети (АГС), включающей 17 пунктов триангуляции I класса, совмещённых с линиями нивелирования II класса расположенных преимущественно в городе Алматы и близлежащей территории. Эти пункты обеспечивают историческую преемственность геодезической основы и служат исходной координатно-высотной базой для выполнения трансформации между локальной и глобальной системами координат, а также для построения локальной модели геоида города Алматы. Сведения по каждому пункту содержат плановые координаты в местной системе, нормальные высоты в Балтийской системе высот 1977 года (БСВ77) (рисунок 3.1.1).

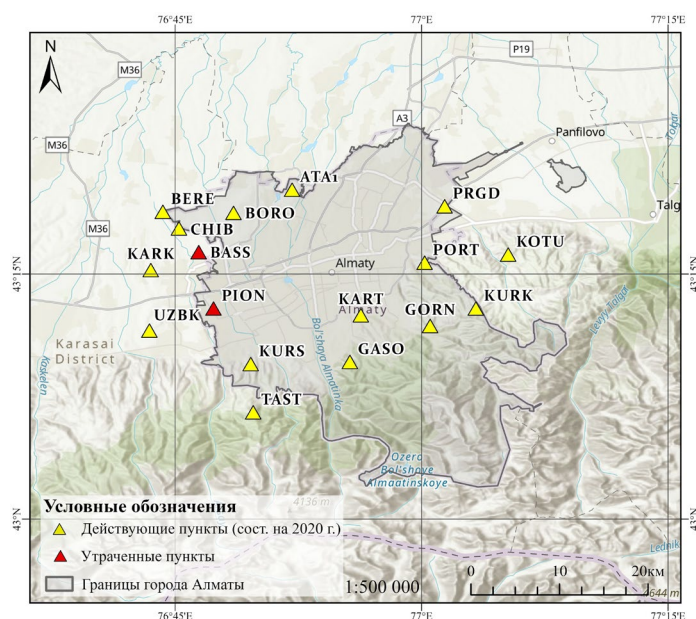


Рисунок 3.1.1 – Схема расположения пунктов координатно-высотной основы

Пункты 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.

Полевое обследование 17 пунктов АГС было выполнено в 2020 году, после которой было установлено, что два пункта утрачены: пункт Бассейн (BASS) - на месте велись работы по выемке грунта, связанные с деятельностью кирпичного завода; пункт Пионерский (PION) - был демонтирован в связи со строительством коттеджного городка «Елисейские поля». Остальные 15 пунктов находились в сохранности: ATA1, BERE, BORO, CHIB, GASO, GORN, KARK, KART, KOTU, KURK, KURS, PORT, PRGD, TAST, UZBK.

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. 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. 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.

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. 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).

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.

3.2. Проведение спутниковых (GNSS) наблюдений на пунктах геодезической сети

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) играют ключевую роль в точных геодезических и геофизических исследованиях, обеспечивая данные для определения координат, мониторинга движений земной коры и измерения различных геодинамических процессов. Одним из наиболее надежных инструментов на сегодняшний день для обработки данных ГНСС-наблюдений является программный комплекс GAMIT/GLOBK, который обеспечивает моделирование и коррекцию множества ошибок и воздействий на сигнал, что позволяет получать высокоточные решения.

Исходными данными послужили результаты статических ГНСС-наблюдений на триангуляционных пунктах 1 класса. Постобработка данных выполнялась в программном комплексе GAMIT/GLOBK, что позволило достичь высокой точности уравнированных координат. Для определения точных координат пунктов использовались методы статических ГНСС-наблюдений с двухчастотными приемниками GPS и ГЛОНАСС. Длительность сеансов наблюдений составляла 24 часов, что позволило минимизировать влияние ионосферных и тропосферных искажений [43]. Методы постобработки позволили устранить систематические ошибки и увеличить точность измерений, что особенно важно для последующего расчета высоты геоида. Этапы полного цикла постобработки:

- Приведение данных к единой временной шкале;
- Устранение искажений, вызванных атмосферными условиями (тропосферными и

ионосферными задержками);

– Построение базовых векторов между пунктами наблюдений;

– Уравнивание координат методом наименьших квадратов для минимизации случайных ошибок [44].

3.3. Обработка полученных спутниковых данных в программном комплексе GAMIT/GLOBK

Отбор опорных пунктов выполнялся отдельно по двум задачам - трансформация координат между МСК Алматы и WGS-84 и моделирование локальной модели геоида. По результатам обследования из 17 пунктов два признаны утраченными; следовательно, к анализу допущены 15 действующих пунктов. Для задачи трансформации использованы 13 из 15 пунктов (15/13); два пункта исключены из-за отсутствия координат в МСК в архивных каталогах. Для задачи моделирования геоида сформирована выборка из 10 пунктов (15/10); четыре пункта исключены по признаку низкого качества ГНСС-наблюдений (повышенный RMSE вследствие выраженной многолучёвости под металлическими пирамидами). Дополнительно отмечен пункт с несогласованной нормальной высотой ($|\Delta N|$ превышает допуск); во избежание систематического влияния на высотную компоненту он не включён в расчётный набор для оценки геоида и разобран отдельно в подразделе по контролю качества. Отметим, что для ГНСС-решений характерен дисбаланс точности: горизонтальные компоненты (N, E) оцениваются стабильнее, чем высотная (U), вследствие геометрии созвездия по вертикали, влияния тропосферы, мультипути и особенностей фазовых центров антенн; это учитывалось при установлении порогов и интерпретации метрик качества (контроль σ_N , σ_E и σ_U проводился отдельно). Для обеспечения региональной устойчивости и глобальной сопоставимости координат применялись отдельные apr-файлы: при уравнивании сети для трансформации использовался `igs14_comb_eura.apr` с последующей финальной стабилизацией к глобальной опорной рамке по `itrfl4.apr`, для задачи моделирования геоида финальные координаты получены в жёсткой привязке к ITRF14 на основе `itrfl4.apr`, что минимизирует возможные смещения масштаба/ориентации и обеспечивает корректную редукцию высот к целевой эпохе.

Основная цель постобработки – уравнивание всех наблюдений и анализ качества данных с применением необходимых коррекций и моделей для учета систематических и случайных ошибок. Основное внимание уделяется процессу уравнивания наблюдений, внесению тропосферных, ионосферных и других ключевых поправок, а также анализу причин повышенных значений RMS на некоторых станциях.

Программа GAMIT использует метод двойных разностей для минимизации

систематических ошибок, возникающих в процессе наблюдений. Рассмотрим основные этапы обработки данных и ключевые коррекции, которые вносятся в процессе обработки.

Уравнивание наблюдений. Метод уравнивания наблюдений заключается в минимизации остаточных ошибок в решении системы уравнений, которая включает ГНСС-наблюдения для всех станций сети. Используется метод наименьших квадратов (МНК) для вычисления конечных координат станций и других параметров. В процессе уравнивания учитываются такие ошибки, как:

- Тропосферная задержка;
- Ионосферная задержка;
- Многопутные отражения сигналов;
- Спутниковые орбиты;
- Изменения в положении антенн.

Уравнивание всех наблюдений важно для достижения согласованного решения для сети станций и спутников, позволяющего получить высокую точность координат.

Коррекция тропосферной задержки. Тропосфера является одним из наиболее значимых источников ошибок в ГНСС-наблюдениях, так как ее влияние может варьироваться в зависимости от атмосферных условий и высоты спутника над горизонтом. GAMIT использует как эмпирические модели, так и метеорологические данные для оценки тропосферной задержки.

Используются такие модели, как Global Mapping Function (GMF) или Vienna Mapping Function (VMF), которые обеспечивают высокую точность оценки тропосферной задержки в зависимости от высоты спутников. Это позволяет корректировать задержку сигнала на тропосферу и улучшать качество определения координат.

Ионосферные поправки. Ионосфера оказывает влияние на скорость распространения радиосигнала, вызывая его замедление, особенно на низких частотах (например, L1). Для устранения этих воздействий GAMIT применяет данные наблюдений на двух частотах (L1 и L2), что позволяет рассчитывать так называемую "безионную комбинацию" (iono-free combination), эффективно устраняя влияние ионосферы на измерения.

Ионосферная коррекция особенно важна для высокоточных наблюдений, так как искажения, вызванные ионосферой, могут достигать значительных величин, особенно в периоды высокой солнечной активности.

Спутниковые орбиты и моделирование вращения Земли. Точность орбит спутников является еще одним ключевым фактором, влияющим на точность ГНСС-наблюдений. Для устранения ошибок, связанных с орбитами, используются точные эфемериды спутников, предоставляемые сервисом IGS (International GNSS Service). Эти данные позволяют

существенно снизить погрешности, связанные с неопределенностью орбит спутников.

Кроме того, в процессе уравнивания учитывается вращение Земли и приливные воздействия. GAMIT использует модели, такие как Solid Earth Tides и Ocean Tidal Loading, для коррекции координат станций с учетом смещений, вызванных приливами.

Многопутность и ее влияние на данные. Многопутность (multipath) возникает, когда сигнал спутника отражается от окружающих объектов, таких как здания, металлические конструкции или земля, и затем принимается антенной с задержкой. Это приводит к значительным искажениям данных, особенно при низких углах подъема спутников.

Для коррекции многопутных сигналов использует фильтры, исключаящие наблюдения на низких углах, а также специальные модели многопутности, которые помогают уменьшить остаточные ошибки. Однако в случае станций с расположенными вблизи металлических объектов, такими как пирамиды на триангуляционных пунктах, многопутность может оставаться значительной проблемой, что отражается в увеличенных значениях RMS.

Поправки на антенны и их калибровки. Для обеспечения высокой точности обработки данных важно учитывать характеристики антенн и приемников. GAMIT использует калибровочные данные для каждой антенны (например, параметры phase center variation, PCV), чтобы корректировать измерения. В случае смены оборудования или антенн в ходе наблюдений, программа автоматически вносит поправки для обеспечения согласованности данных.

Результаты обработки. Обработка данных была проведена для сети станций, включая Чибыл, Узбек, Горный гигант, Береговой, Карауылды, Каратумсык, Боролдай, Котырбулак, Курсай, Пригородный. Были собраны архивные данные выполненные Институтом ионосферы по статистическим ГНСС наблюдениям. Создана информационная база сырых файлов записи спутниковых измерений (RINEX files).

Были получены значения RMS для всех станций, что позволило оценить качество наблюдений и эффективность внесенных коррекций. Станции Чибыл и Карауылды показали хорошие результаты с низкими значениями RMS (6.0 и 6.1 мм соответственно), что свидетельствует о корректной работе фильтров и моделей. Для этих станций влияние многопутности оказалось минимальным благодаря использованию антенн типа choke-ring и корректировкам на тропосферу и ионосферу. Однако станции Боролдай и Порт-Артур продемонстрировали значительно более высокие значения RMS (24.7 и 25.6 мм), что связано с сильным влиянием многопутности, вызванной наличием металлических пирамид. Несмотря на применение всех стандартных корректировок в GAMIT, многопутность оказала значительное влияние на точность данных на этих станциях. В целом, обработка данных

прошла успешно для большинства станций, за исключением тех, где присутствовали значительные внешние помехи. Качество первичной обработки и значения RMS показаны в таблице 3.3.1.

Таблица 3.3.1 – Значения RMS для 10 станции

№	Станция	Среднее RMS (мм)	Максимум RMS (мм)	Минимум RMS (мм)	Влияние многопутности
1	Чибыл	6.0	7	4	Низкое
2	Карауылды	6.1	8	4	Низкое
3	Боролдай	24.7	36	20	Высокое
4	Узбек	5.6	7	5	Низкое
5	Береговой	7.6	9	5	Среднее
6	Котырбулак	4.3	6	3	Низкое
7	Пригородный	16.9	25	13	Среднее
8	Курсай	4.8	6	4	Низкое
9	Горный гигант	7.6	11	5	Высокое
10	Каратумсык	6.1	7	4	Низкое

Первичная обработка данных ГНСС-наблюдений в ПО GAMIT показала высокую эффективность уравнивания наблюдений с использованием точных моделей орбит, тропосферы, ионосферы и коррекций на многопутность. Станции с минимальным влиянием внешних факторов, таких как многопутность, показали стабильные и точные результаты, что свидетельствует о корректности обработки. В целом, результаты показывают, что GAMIT успешно справляется с задачей минимизации ошибок в данных ГНСС-наблюдений, однако в условиях сложных отражающих объектов требуются дополнительные меры для повышения точности.

3.4. Уравнивание геодезической сети и получение высокоточных координат и высот пунктов

Уравнивание данных в GLOBK. Основным инструментом уравнивания данных было программное обеспечение GLOBK, которое позволило минимизировать систематические ошибки, улучшить точность временных рядов и получить финальные координаты для всех станций.

Для повышения точности уравнивания были использованы данные глобальных

станций сети IGS, таких как BADG, LHAZ, URUM, и NOVM. Эти станции служили стабильными референсными точками для коррекции данных локальных станций.

Точность полученных координат оценивалась на основе WRMS (взвешенная среднеквадратическая ошибка) и остаточных ошибок для каждой из координатных компонент (восток, север, высота).

Таблица 3.4.1 - Остаточные ошибки WRMS по трем компонентам

№	Станция	Остаточные ошибки по трем компонентам WRMS, м		
		Восток (WRMS)	Север (WRMS)	Высота (WRMS)
1	Чибыл	0.019	0.0517	0.0492
2	Узбек	0.0191	0.0533	0.0497
3	Горный гигант	0.0051	0.0136	0.0137
4	Береговой	0.0183	0.0515	0.0481
5	Карауылды	0.0189	0.0510	0.0477
6	Каратумсык	0.0074	0.0190	0.0171
7	Боролдай	0.0182	0.0508	0.0476
8	Котырбулак	0.0013	0.0034	0.0033
9	Курсай	0.0014	0.0035	0.0034
10	Пригородный	0.0096	0.0275	0.0242

Чибыл и Узбек показали высокую точность по всем координатам с минимальными остаточными ошибками, что указывает на стабильные данные ГНСС-наблюдений. Котырбулак и Курсай имеют наименьшие значения WRMS, что свидетельствует о крайне высокой точности уравниваемых координат. Боролдай и Береговой показали чуть более высокие значения WRMS, однако остаточные ошибки остаются в пределах допустимых норм. Данные уравнивания демонстрируют высокую точность полученных координат для всех станций, что свидетельствует о корректности метода обработки. Как видно из таблицы 3.4.1, все станции продемонстрировали высокую точность уравнивания, с минимальными остаточными ошибками по компонентам восток и север. Средние значения WRMS составили около 0.02 м, что подтверждает высокое качество уравнивания данных.

3.5. Обоснование выбора априорных файлов (apf)

Основы Международной Земной Системы Координат (ITRS) и Международной

Земной Референцной Рамки (ITRF). Международная Земная Система Координат (ITRS) представляет собой концептуальную основу, разработанную для создания референцных рамок, которые могут быть использованы для геодезических измерений, проводимых на поверхности Земли или в непосредственной близости от нее [45]. Эта система координат является геоцентрической и использует Международную систему единиц (СИ) для измерений [46]. В свою очередь, Международная Земная Референцная Рамка (ITRF) является физической реализацией ITRS [47]. Начало координат ITRF располагается в центре масс всей Земли, включая океаны и атмосферу [48].

ITRF создается путем объединения данных, полученных с использованием различных космических геодезических техник, таких как радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой (VLBI), лазерная дальнометрия спутников (SLR), глобальные навигационные спутниковые системы (GNSS) и доплеровское радиопозиционирование и интегрированная орбитография по спутнику (DORIS) [49]. Каждая новая версия ITRF, например, ITRF2014, представляет собой улучшенную реализацию, включающую в себя новые данные наблюдений, а также усовершенствованные математические модели и методы обработки [50]. ITRF служит фундаментальной основой для построения национальных геодезических систем и является метрологической базой для любой пространственной информации, включая картографирование, трехмерное моделирование и геоинформационные системы (ГИС) [51].

Поскольку ITRF постоянно развивается, каждая его новая реализация стремится предоставить наиболее точное и актуальное представление геодезического каркаса Земли на основе доступных данных и методологий. Следовательно, различные версии ITRF могут иметь незначительные расхождения в координатах и скоростях опорных станций. Объединение данных, полученных с помощью нескольких космических геодезических техник, обеспечивает надежность и точность ITRF, так как каждая техника обладает своими уникальными преимуществами и ограничениями в наблюдении различных аспектов формы и движения Земли [48].

Роль Международной Службы GNSS (IGS). Международная Служба GNSS (IGS) является международной организацией, которая занимается сбором и анализом данных, поступающих от глобальных навигационных спутниковых систем, таких как GPS, GLONASS, Galileo и BeiDou [52]. Основной целью IGS является предоставление высокоточных геодезических продуктов, которые используются в широком спектре научных и прикладных задач. Эти продукты включают в себя точные эфемериды спутников, координаты наземных станций, параметры вращения Земли и ионосферные данные [47].

Продукты IGS создаются таким образом, чтобы быть согласованными и выровненными по отношению к Международной Земной Референцной Рамке (ITRF) [47].

IGS играет ключевую роль в построении ITRF, обеспечивая связь между различными космическими геодезическими техниками, так как многие станции IGS оборудованы приемниками GNSS, а также могут быть частью сетей VLBI, SLR и DORIS [52]. Кроме того, IGS поддерживает собственную реализацию ITRF, такую как IGS14, которая тесно связана с соответствующей версией ITRF, в данном случае с ITRF2014 [48].

Для обеспечения высокоточной обработки GNSS данных IGS также публикует файлы калибровок антенн в формате ANTEX [53]. Эти файлы содержат информацию о смещениях и вариациях фазового центра антенн спутников и наземных приемников, что необходимо для достижения миллиметровой точности в геодезических измерениях.

Хотя продукты IGS и выровнены по ITRF, IGS может применять свои собственные стратегии обработки и критерии при создании своих референчных рамок. Это может привести к незначительным различиям между официальной реализацией ITRF, поддерживаемой Международной службой вращения Земли и систем координат (IERS), и реализацией IGS. IGS стремится к высокой внутренней согласованности своих продуктов и может отдавать приоритет определенным аспектам данных или сети станций при создании своей референчной рамки.

Подробное Описание Файла ITRF14.apr. Содержание и Назначение файла.apr. Файлы с расширением .arg являются важными компонентами программного обеспечения GLOBK, которое входит в состав широко используемого пакета GAMIT/GLOBK для обработки данных GNSS [54, 55]. Эти файлы служат для хранения априорной информации о координатах геодезических станций, которая используется в процессе уравнивания и определения окончательных координат и скоростей станций [54].

Содержимое .arg файла обычно представляет собой структурированный список станций, где для каждой станции указаны ее координаты в декартовой системе координат (X, Y, Z) на определенную эпоху, а также, опционально, могут быть включены компоненты скорости станции (VX, VY, VZ) [54]. Формат файла является текстовым, что позволяет просматривать и редактировать его с помощью стандартных текстовых редакторов.

Априорная информация, содержащаяся в .arg файле, играет ключевую роль в процессе обработки данных в GLOBK. Она служит в качестве начального приближения для положения станций и помогает программе Kalman filter, используемой в GLOBK, более эффективно сходиться к оптимальному решению [56]. Точность и согласованность этой априорной информации могут существенно повлиять на качество итогового геодезического решения. Чем точнее априорные координаты соответствуют истинному положению станций, тем более надежным и точным будет окончательный результат обработки.

Специфика файла itrfl4.apr. Файл itrfl4.apr представляет собой априорный файл

координат, который основан на реализации Международной Земной Референцной Рамки ITRF2014 [57]. Это означает, что координаты станций, содержащиеся в этом файле, определены в соответствии с системой отсчета ITRF2014, которая является одной из наиболее точных и авторитетных глобальных геодезических референционных рамок [48].

Вероятно, файл `itrfl4.apr` содержит координаты большого количества геодезических станций, которые были использованы Международной службой вращения Земли и систем координат (IERS) при определении ITRF2014 [49]. Эпоха, на которую приводятся координаты в файле, скорее всего, близка к 2010.0 году, так как это является стандартной референцной эпохой для ITRF2014 [49].

ITRF2014 отличается от предыдущих реализаций ITRF улучшенным моделированием нелинейных движений земной коры, включая сезонные вариации положения станций и постсейсмические деформации, вызванные крупными землетрясениями [48]. Определение ITRF2014 основано на данных, полученных с помощью четырех основных космических геодезических техник: VLBI, SLR, GNSS и DORIS, что обеспечивает высокую точность и надежность референцной рамки [48]. Начало координат ITRF2014 определено как центр масс Земли, масштаб установлен на основе средних значений шкал, полученных по данным SLR и VLBI, а ориентация согласована с ITRF2008.

Таким образом, файл `itrfl4.apr` представляет собой всеобъемлющий набор априорных координат, отражающий официальную реализацию IERS референцной рамки ITRF2014 на определенную эпоху. Это делает его фундаментальным ресурсом для любых геодезических работ, целью которых является достижение согласованности с этим глобальным стандартом.

Подробное Описание Файла `igs14_comb.apr`. Комбинированные файлы координат IGS. Международная Служба GNSS (IGS) играет важную роль в предоставлении высокоточных геодезических продуктов, включая комбинированные файлы координат [47]. Эти файлы создаются путем объединения результатов обработки данных GNSS, полученных различными аналитическими центрами IGS. Такой подход позволяет получить более надежные и точные оценки координат станций, так как комбинирование решений от нескольких независимых центров способствует снижению влияния систематических ошибок и повышению общей точности.

Комбинированные файлы координат IGS, такие как `igs14_comb.apr`, обычно содержат координаты и скорости большого числа глобальных GNSS станций, входящих в сеть IGS [58]. Эти станции распределены по всему миру и обеспечивают плотное покрытие, необходимое для различных геодезических и геофизических исследований. Файл `igs14_comb.apr` основан на референцной рамке IGS14, которая, в свою очередь, тесно связана и выровнена по отношению к Международной Земной Референцной Рамке ITRF2014 [48].

Помимо координат и скоростей станций, комбинированные файлы IGS могут также включать информацию о разрывах (дисконтинуитетах) в рядах наблюдений.²¹ Эти разрывы могут быть связаны с различными событиями, такими как изменения оборудования на станциях, землетрясения или другие геофизические явления, которые могут привести к резким смещениям положения станций. Информация о таких дисконтинуитетах важна для корректной обработки временных рядов координат и скоростей станций.

Таким образом, файл `igs14_comb.apr` представляет собой консолидированный и широко используемый набор координат для станций IGS, что делает его практичным выбором для обработки GNSS данных при работе с сетью IGS или при использовании ее в качестве опорной.

Специфика файла igs14_comb.apr. Файл `igs14_comb.apr` представляет собой комбинированный априорный файл координат IGS, который выровнен по референцной рамке IGS14 [47]. Как уже упоминалось, IGS14 является реализацией IGS, которая тесно связана с ITRF2014 и использует ее в качестве своей основы. Файл `igs14_comb.apr` содержит координаты и скорости большого количества глобальных станций IGS, охватывая значительный период времени, например, с 1992 по 2013 год.

Важной особенностью файла `igs14_comb.apr` является то, что при его использовании совместно с файлом `igs14_comb.eq`, обеспечивается согласованный учет инструментальных изменений, которые могли происходить на станциях сети IGS с течением времени [47]. Файл `igs14_comb.eq` содержит информацию об изменениях оборудования, таких как типы приемников и антенн, а также о других событиях, которые могут повлиять на точность и согласованность GNSS наблюдений.

Широкий временной охват файла `igs14_comb.apr` указывает на то, что он предназначен для обработки исторических данных GNSS в рамках референцной рамки IGS14, обеспечивая тем самым согласованную систему отсчета на протяжении длительного периода времени. Включение большого числа станций и значительного временного интервала делает этот файл полезным инструментом для долгосрочных геодезических исследований и анализов, связанных с сетью IGS.

Ключевые Различия Между ITRF14.apr и IGS14_comb_eura.apr. Файл `itrfl4.apr` напрямую связан с официальной реализацией Международной Земной Референцной Рамки ITRF2014, которая поддерживается Международной службой вращения Земли и систем координат (IERS). Основная цель этого файла заключается в предоставлении фундаментальной глобальной референцной рамки для выполнения высокоточных геодезических измерений и научных исследований, требующих привязки к международному стандарту.⁶

С другой стороны, файл `igs14_comb_eura.apr` является продуктом Международной Службы GNSS (IGS). Его цель заключается в предоставлении практического и широко используемого набора координат станций, входящих в глобальную сеть IGS. Эти координаты выровнены по ITRF2014 через промежуточную референсную рамку IGS14 и предназначены в первую очередь для обработки данных GNSS.

Таким образом, хотя оба файла основаны на ITRF2014, `itrfl4.apr` представляет собой ядро официальной реализации IERS, в то время как `igs14_comb_eura.apr` является специализированным продуктом IGS, разработанным для нужд сообщества, занимающегося обработкой данных GNSS, с особым акцентом на станции, входящие в сеть IGS.

Набор Станций и Обработка. Файл `itrfl4.apr` потенциально может содержать более широкий набор станций, включая те, которые наблюдаются с помощью различных космических геодезических техник, таких как VLBI, SLR, DORIS и GNSS [49]. Эти техники совместно используются для определения и поддержания ITRF, что обеспечивает его высокую точность и глобальный охват [48].

В отличие от этого, файл `igs14_comb_eura.apr` фокусируется преимущественно на станциях, входящих в глобальную сеть IGS, которые являются GNSS станциями. Обработка данных для создания `igs14_comb_eura.apr` выполняется аналитическими центрами IGS с использованием исключительно данных GNSS. Кроме того, суффикс "_eura" указывает на то, что к этому файлу была применена дополнительная обработка, специфичная для Евразийской тектонической плиты.

Различие в используемых техниках наблюдений и ориентация `igs14_comb_eura.apr` на GNSS могут привести к различиям в наборе включенных станций и точности их координат по сравнению с `itrfl4.apr`, который может опираться на данные нескольких геодезических техник.

Таблица 3.5.1. - Ключевые Атрибуты Файлов

Атрибут (Attribute)	<code>itrfl4.apr</code>	<code>igs14_comb_eura.apr</code>
Происхождение (Origin)	Международная служба вращения Земли и систем координат (IERS)	Международная служба GNSS (IGS)
Основа (Based on)	ITRF2014	IGS14 (выровнена по ITRF2014)
Набор станций (Station Set)	Потенциально включает станции, наблюдаемые VLBI, SLR, DORIS и GNSS	В основном GNSS станции, входящие в сеть IGS
Обработка (Processing)	Отражает официальную реализацию ITRF2014	Комбинированное решение IGS с применением обработки для Евразийской

Основное назначение (Primary Use)	Обеспечение фундаментальной глобальной референцной рамки	плиты Стабилизация решений относительно Евразийской плиты при обработке GNSS данных в GLOBK
Суффикс "_eura" ("_eura" Suffix)	Отсутствует	Указывает на обработку, связанную с Евразийской плитой

Значение Суффикса "_eura" в Файле igs14_comb_eura.apr, указание на региональную обработку. Суффикс "_eura", присутствующий в названии файла igs14_comb_eura.apr, является важным индикатором того, что данный файл представляет собой специализированную версию igs14_comb.apr, к которой была применена определенная обработка, ориентированная на Евразийскую тектоническую плиту. Эта дополнительная обработка может включать в себя применение известной скорости вращения, характерной для Евразийской плиты, к координатам станций, содержащимся в исходном файле igs14_comb.apr.

В контексте использования программного обеспечения GLOBK, особенно при работе с программой glorg, файл igs14_comb_eura.apr может быть использован совместно с командой plate для определения и стабилизации решения относительно стабильного региона, в данном случае - Евразийской плиты. Это позволяет проводить анализ геодезических данных таким образом, чтобы движение станций рассматривалось относительно этой конкретной тектонической плиты, что может быть особенно полезно при изучении деформаций внутри плиты или на ее границах.

Таким образом, суффикс "_eura" указывает на то, что файл igs14_comb_eura.apr был адаптирован для анализа, сфокусированного на Евразийской плите, вероятно, путем учета ее специфических характеристик движения и деформации.

Использование для стабилизации региональных решений. При использовании программы glorg для стабилизации геодезического решения, применение файла igs14_comb_eura.apr позволяет эффективно выровнять это решение относительно стабильной Евразийской тектонической плиты. Это особенно ценно при анализе региональных сетей GNSS станций, расположенных в Европе или Азии, где учет движения Евразийской плиты является важным фактором для получения корректных и интерпретируемых результатов.

Качество стабилизации, достигаемое при использовании файла igs14_comb_eura.apr, должно быть эквивалентно стабилизации, полученной с использованием стандартного файла igs14_comb.apr с опцией No-Net-Rotation (NNR). Это связано с тем, что применение региональной обработки не изменяет относительное движение между станциями, а лишь

обеспечивает их согласованное движение в рамках выбранной тектонической плиты.

Использование файла `igs14_comb_eura.apr` упрощает процесс реализации референцной рамки, привязанной к Евразийской плите, в программном обеспечении GLOBK. Вместо того чтобы вручную выбирать и ограничивать координаты определенных станций для определения стабильной плиты, этот предварительно обработанный файл предоставляет удобный и согласованный способ достижения необходимой стабилизации, что в конечном итоге может повысить точность и интерпретируемость региональных геодезических исследований.

Использование файлов в программном обеспечении GAMIT/GLOBK, роль .apr файлов в GLOBK. В программном обеспечении GLOBK файлы с расширением `.apr` играют ключевую роль, выступая в качестве входных файлов, которые содержат априорные (предварительные) оценки координат геодезических станций [67]. GLOBK использует эти априорные координаты в процессе обработки данных GNSS для выполнения калмановской фильтрации и оценки различных параметров, включая окончательные координаты и скорости станций, а также другие геофизические параметры.

Кроме того, при использовании программы `glorg`, которая является частью пакета GLOBK и предназначена для определения и стабилизации референчных рамок, файлы `.apr` могут быть использованы для задания набора опорных станций. `Glorg` минимизирует невязки между априорными координатами этих станций и их оценками, полученными в процессе обработки, тем самым определяя и стабилизируя референцную рамку для всего решения.

Таким образом, файл `.apr` является важным инструментом для задания начальных условий и ограничений в процессе обработки данных с использованием GLOBK. Он направляет процесс уравнивания к получению физически обоснованного и стабильного решения в определенной системе отсчета.

Использование `itrfl4.apr` и `igs14_comb_eura.apr`. Файл `itrfl4.apr` может быть непосредственно использован в GLOBK для реализации Международной Земной Референцной Рамки ITRF2014 [59]. Пользователь может выбрать определенный набор станций из этого файла в качестве опорных для определения стабильной глобальной референцной рамки в своем анализе.

Файл `igs14_comb_eura.apr`, как уже обсуждалось, предоставляет удобный способ реализации референцной рамки, которая стабилизирована относительно Евразийской тектонической плиты. Это может быть особенно полезно при региональных исследованиях, сфокусированных на Европе или Азии, где важно учитывать движение этой крупной тектонической плиты.

3.6 Формирование базы гравиметрических данных (комбинирование наземных и глобальных данных) для территории исследования

Гравиметрия занимает важное место в системе наук о Земле, поскольку она позволяет решать, как фундаментальные геодезические задачи, связанные с определением геометрии и размеров планеты, так и прикладные геофизические задачи, включая изучение внутренней структуры Земли и оценку геодинамических процессов. Точное знание гравитационного поля необходимо как в глобальном масштабе — для создания единой высотной системы, — так и на региональном уровне, например, при поиске природных ресурсов.

Наземные гравиметрические данные играют важную роль в создании локальной модели геоида. Они обеспечивают точную информацию о гравитационных аномалиях, которые связаны с вариациями плотности подповерхностных пород и топографическими особенностями. На территории юго-восточного Казахстана, которая характеризуется сложной геологической структурой и активной тектонической деятельностью, использование высокоточных наземных данных имеет решающее значение для моделирования локальной модели геоида. Использование глобальных моделей недостаточно для точных расчетов на локальном уровне, особенно в районах с резкими изменениями рельефа и плотности пород [60]. В этой связи наземные гравиметрические данные, полученные в результате многолетних наблюдений, являются основным источником информации для создания локальной модели геоида.

В рамках данного исследования, при подготовке входных данных для построения локальной модели геоида была выполнена обширная работа по интеграции наземных гравиметрических измерений. Была проведена масштабная обработка и оцифровка исторических советских гравиметрических карт. Эти карты были получены в результате десятилетий систематических гравиметрических съёмок, проводившихся на территории Республики Казахстан в различных масштабах, с применением как относительных, так и абсолютных гравиметров как СН-3, ГАК и ГР-2К. Около 90% площади страны покрыто съемками масштаба 1:200 000 с использованием гравиметров СН-3, ГАК и ГР-2К, а перспективные регионы исследованы съемками масштаба 1:50 000 и крупнее. Эти карты создавались в редукции Буге с плотностью промежуточного слоя 2,30 г/см³ и 2,67 г/см³, а к ним прилагались данные о значениях аномалий в свободном воздухе, высотах и поправках за рельеф на пунктах наблюдений. При создании карт масштаба 1:200 000 использовались данные съёмки масштабов 1:25 000 – 1:50 000, выполненных на территории карты на момент ее составления [61, 62].

Для создания локальной модели геоида исследуемого региона была использована электронная база данных (ЭБД) оцифрованных гравиметрических карт по номенклатурным

листам: L-43-XXXIV, L-43-XXXV, L-44-XXXVI, L-44-XXXI, K-43-IV, K-43-V, K-43-VI, K-44-I, K-43-X, K-43-XI, K-43-XII, K-44-VII. Каталог ЭБД состоит из 8571 оцифрованных точек. Картограмма оцифрованных гравиметрических карт 1:200 000 масштаба исследуемого региона показана на рисунке 3.6.1.

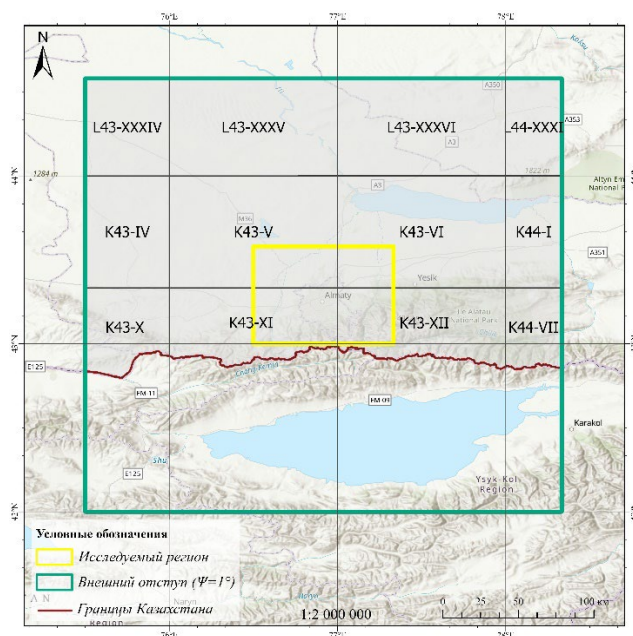


Рисунок 3.6.1 – Картограмма оцифрованных гравиметрических карт масштаба 1:200 000 для исследуемой территории

Процесс оцифровки наземных гравиметрических карт. Оцифровка гравиметрических данных позволяет интегрировать их в современные геоинформационные системы (ГИС) и использовать для дальнейших расчетов и создания моделей. Процесс оцифровки данных включает в себя несколько ключевых этапов: сканирование, геореференцирование, фильтрацию, интерполяцию и оценку качества данных. Все эти этапы необходимы для того, чтобы данные были подготовлены для последующего использования в моделировании локальной модели геоида.

На первом этапе выполняется сканирование бумажных карт с разрешением 600 dpi. Высокое разрешение необходимо для точного воспроизведения всех деталей, таких как изолинии и контрольные точки. Это особенно важно, поскольку искажения при сканировании могут негативно повлиять на точность модели геоида [63]. Сканирование должно проводиться с учетом рекомендаций по сохранению высокой точности исходных данных, чтобы обеспечить их дальнейшее использование в высокоточных расчетах и моделировании.

После сканирования выполняется привязка отсканированных карт данных к глобальной системе координат WGS 84 с использованием контрольных точек с известными координатами. Привязка данных к глобальной системе координат является важным этапом, поскольку она обеспечивает возможность дальнейшего использования данных в рамках глобальных моделей и систем координат [64]. Для привязки карт использовалось не менее четырех точек, равномерно распределенных по всей площади листа. В качестве привязочных точек выбирались пересечения прямоугольной координатной сетки. При необходимости применялись методы трансформации с использованием «второго и третьего полинома». Привязка растровых изображений проводилась в системе координат Пулково 1942 в соответствующей зоне проекции Гаусса-Крюгера. Контроль качества привязки осуществлялся в соответствии с требованиями технического задания, согласно которым ошибка геопривязки не должна превышать 0,1-0,3 мм в масштабе исходной карты. Если отклонения растровой сетки от цифровой сетки в масштабе 1:200 000 были меньше 0,3 мм, растровое изображение передавалось исполнителям для дальнейшей векторизации.

Оцифровка гравиметрических карт и заполнение атрибутивных таблиц. Оцифровка выполнялась на основе гравиметрических карт масштаба 1:200 000 в редукции Буге с плотностью промежуточного слоя $2,67 \text{ г/см}^3$ с учетом поправки за рельеф. Значения высот и поправок за рельеф, при их наличии, вносились в специальные поля атрибутивной таблицы. Гравиметрические карты в редукции Буге с плотностью $2,30 \text{ г/см}^3$ оцифровывались только в том случае, если отсутствовали карты с плотностью слоя $2,67 \text{ г/см}^3$ и поправкой за рельеф, либо карты высот.

Этап контроля качества. Для контроля введенных значений аномалий силы тяжести создавалась цифровая модель методом «Kriging» с шагом $250 \times 250 \text{ м}$. Полученная модель накладывалась на исходный растровый слой для сравнения. В случае существенных расхождений между положением изоаномалей модели и их аналогами на карте или при появлении "выбросов" (outliers), выявлялась причина несоответствия (обычно это ошибки при оцифровке), и при необходимости в базу данных вносились корректировки. На этом же этапе отмечались пункты, которые не учитывались при построении модели, и в поле «Condition_for_observation_point» таким пунктам присваивалось значение "F".

Поскольку оцифровка карт проводилась в системе координат Пулково 1942 в соответствующей зоне проекции Гаусса-Крюгера, финальные данные были преобразованы из прямоугольной системы координат Гаусса-Крюгера в географическую систему WGS84 с использованием параметров преобразования Pulkovo_1942_To_WGS_1984_16. После трансформации все результаты оцифровки были объединены в единую базу данных.

Для повышения точности построения локальной модели геоида была проведена оцифровка и анализ гравиметрических карт масштаба 1:200 000. Однако в ряде случаев плотности наземных измерений оказалось недостаточно для полного и точного моделирования гравитационного поля, особенно в труднодоступных и горных районах, где не проводились гравиразведочные работы. Для решения этой проблемы и обеспечения корректной интерполяции использовались глобальные гравиметрические данные модели WGM2012 с сеткой 5x5 минут, в количестве 393 точек (рисунок 3.6.2). Эти данные помогли восполнить недостаток информации для приграничных регионов и зон, находящихся за пределами Казахстана, где наземные измерения отсутствовали.

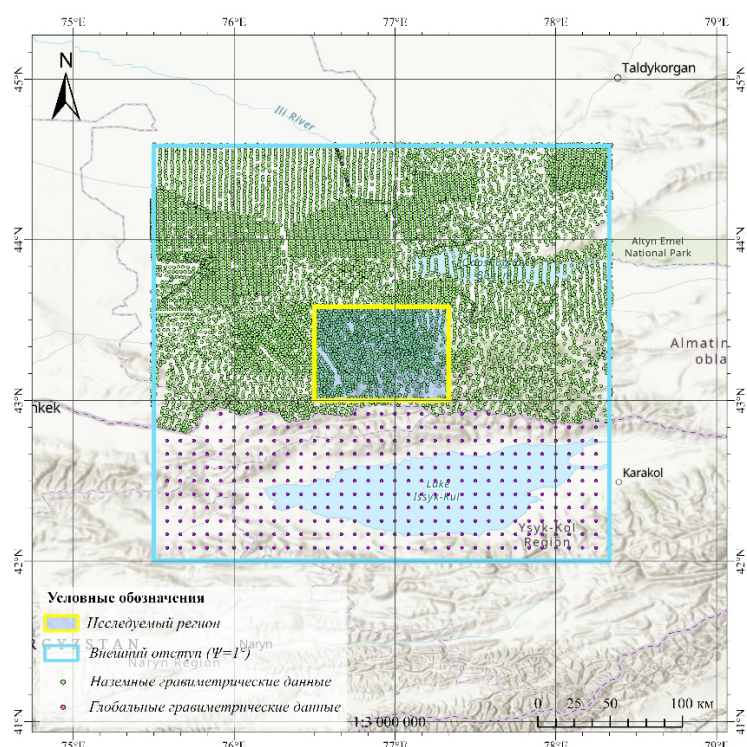
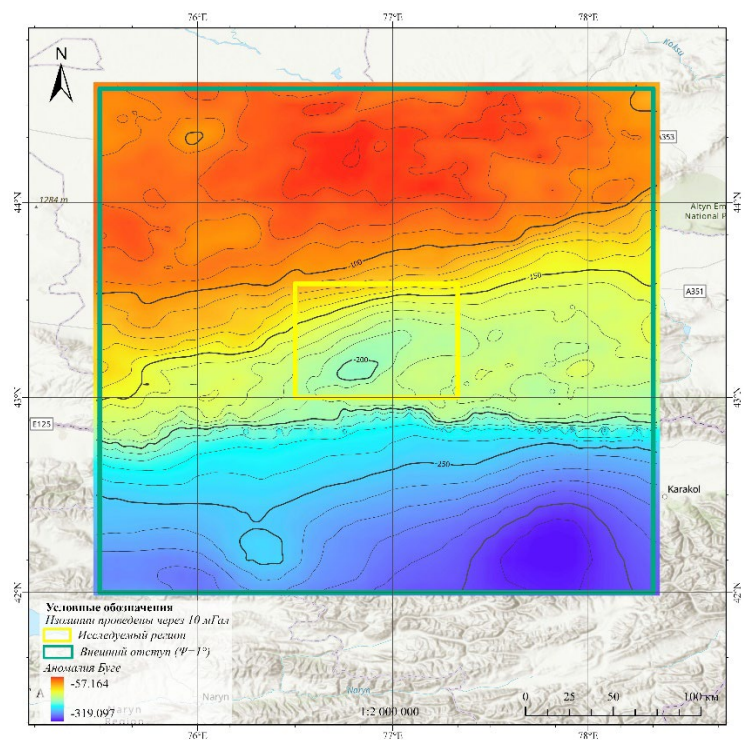
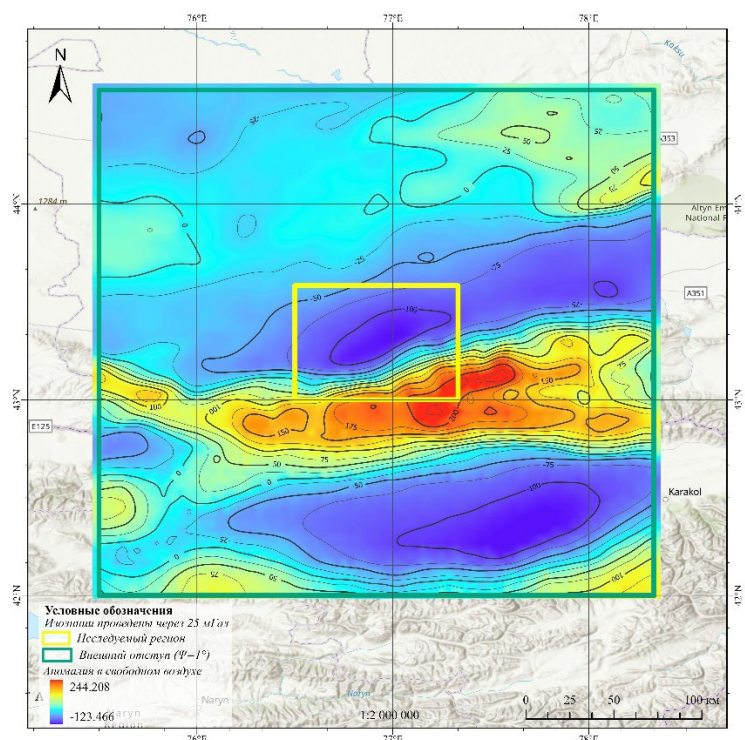


Рисунок 3.6.2 – Комбинирование наземных гравиметрических данных с глобальными

На рисунке 3.6.3 представлены аномалии Буге и в свободном воздухе, полученные на основе комбинации наземных и глобальных гравиметрических данных для исследуемого региона.



a)



b)

Рисунок 3.6.3 – Карта аномалий а) Буге и б) в свободном воздухе, полученных на основе комбинации наземных и глобальных гравиметрических данных, мГал

Интеграция глобальных данных позволила восполнить пробелы и обеспечить целостное и непрерывное покрытие всей территории. Это обеспечило более точную

интерполяцию гравитационных аномалий и повысило точность локальной модели геоида, что особенно важно для регионов с резкими изменениями рельефа и недостаточной плотностью данных.

На основе выполненной оцифровки и обработки гравиметрических карт была создана детализированная цифровая модель гравитационного поля. Эти данные послужили основой при построении локальной модели геоида модифицированными методами формул Стокса. Созданная цифровая модель является важным шагом в процессе создания точной локальной модели геоида и актуальной цифровой гравиметрической карты Казахстана.

3.7. Анализ и оценка точности цифровых моделей рельефа (ЦМР)

Качество создаваемого геоида напрямую зависит от исходных данных [65]. Характерная для страны сложная географическая особенность рельефа (равнина, высокогорье, низменность, плоскогорье, холмы) и большая территория, обуславливают необходимость прибегания к оценке качества используемых данных. Одним из источников ошибок при обработке аномалий силы тяжести, моделировании геоида, а также введении поправок за топографию и аналитическое продолжение вниз (DWC) является качество цифровой модели рельефа (ЦМР) [66]. В связи с этим, остро стоит вопрос подбора и оценки качества глобальных ЦМР. Оценка качества ЦМР может выполняться как с применением наземных данных, так и без них. Внешние оценки используют эталонные данные для сравнения, в то время как внутренние оценки анализируют свойства и ошибки, присущие данным [67].

Точность любой ЦМР зависит от ряда факторов, таких как точность, плотность и распределение исходных данных, сложность моделируемого рельефа, разрешение сетки и метод интерполяции. Таким образом, точность модели не измеряется одним параметром, она пространственно изменчива, как и факторы, которые ее определяют.

Ошибки ЦМР могут привести к неточностям непосредственно в гравитационных аномалиях, при интерполяции гравитационных аномалий Буге, а также распространяться на модель геоида через топографические поправки и поправки продолжения вниз при применении формулы Стокса [68].

Как известно ЦМР подвержены различным типам ошибок, точность высот также варьируется в зависимости от географического положения объекта исследования. Учитывая участие ЦМР во многих частях процесса моделирования геоида, точность ее имеет решающее значение и должна оцениваться для определения оптимальной модели для определенной местности.

В свете существующего многообразия ЦМР, выбор наиболее подходящей модели для создания геоида становится ключевой задачей, требующей тщательного сравнения и анализа различных моделей (Таблица 3.7.1). Это подчеркивает необходимость комплексного подхода к оценке и выбору исходных данных для обеспечения максимальной точности моделирования геоида.

Таблица 3.7.1 Технические характеристики и сравнительные характеристики широко используемых глобальных ЦМР

DEM	Full Name	Key Features / Use Case	Based On	Creation Years	Resolution	Grid Cell Size	Source
Copernicus	Copernicus Global 30m	High-resolution global DEM, open access	WorldDEM™	2010–2015	1 arc-sec (30 m)	1" × 1" (30 × 30 m)	OpenTopography
MERIT	Multi-Error-Removed Improved Terrain DEM	Hydrologically improved DEM, reduced biases from SRTM and AW3D	SRTM v2.1, AW3D-30m	2017	3 arc-sec (~90 m)	5" × 5" (~90 × 90 m)	MERIT_DEM
FABDEM	Forest and Buildings Removed Copernicus	Terrain-only model; improved accuracy in forested/urban areas	Copernicus GLO-30	2023	1 arc-sec (30 m)	1" × 1" (30 × 30 m)	FABDEM V1.2 – University of Bristol
SRTM30	Shuttle Radar Topography Mission	30 m radar DEM; baseline for terrain mapping.	Interferometric pairs of radar images obtained in 2000 filming from aboard the reusable space Shuttle	2003 – 2011	3 arc-sec (90 m)	3" × 3" (90 × 90 m)	Earth Explorer
NASADEM	NASA Digital Elevation Model	Enhanced SRTM with updated radar calibration, void fill, and auxiliary data	SRTM	2020	1 arc-sec (30 m)	1" × 1" (30 × 30 m)	NASADEM – OpenTopography

Проведен сравнительный анализ ЦМР Copernicus, MERIT, FABDEM, SRTM30 и NASADEM для идентификации наиболее подходящей модели для моделирования геоида на территориях исследования на основе критериев качества и точности (Рисунок 3.7.1).

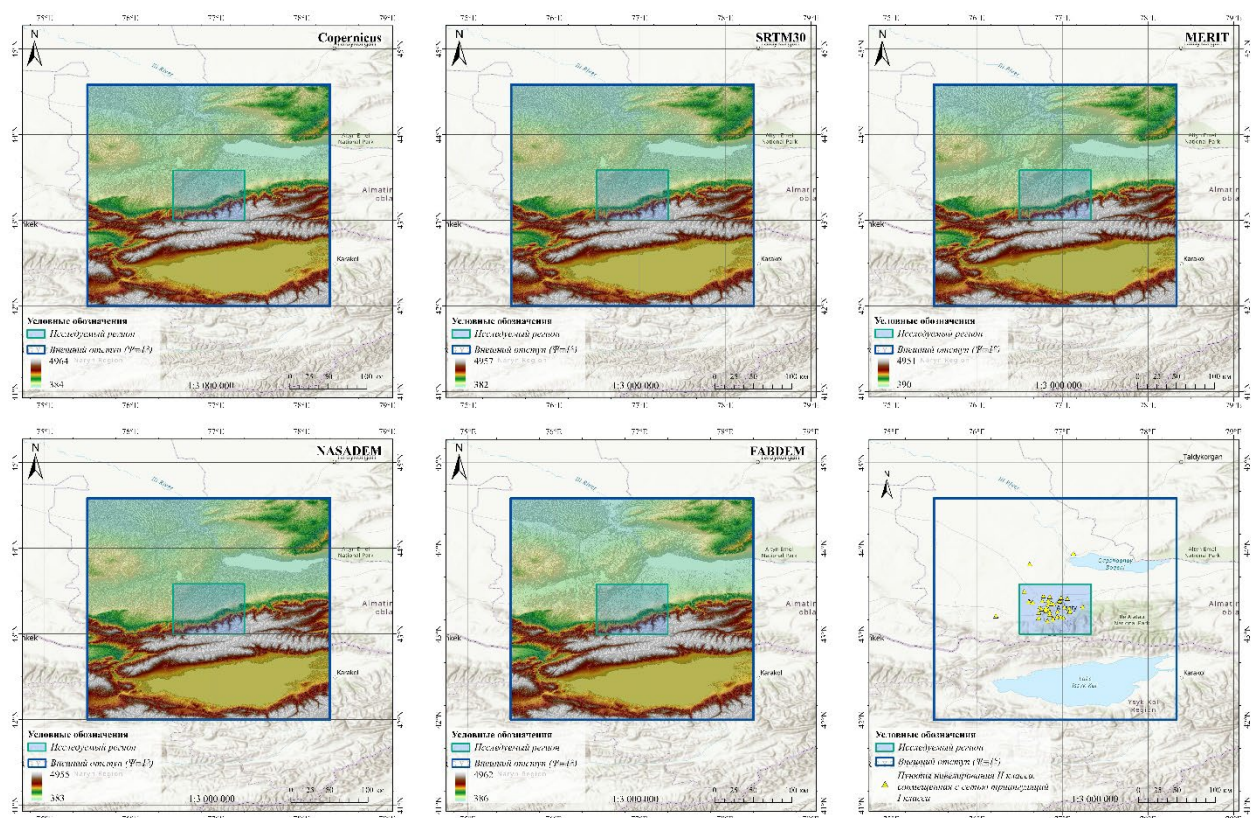


Рисунок 3.7.1 – Визуализация моделей ЦМР. Контрольные пункты ГНСС/Нивелирования

По умолчанию система глобального позиционирования (GPS) вычисляет высоту на основе вертикальной системы отсчета WGS84 [69]. Для сравнения эталонных данных высот GPS (геодезических высот - h) с ЦМР следует учитывать преобразование вертикальных датумов (также известное как сопоставление датумов). Высоты из цифровой модели рельефа (H_{DEM}) были интерполированы на координатах контрольных пунктов GPS с известными эллипсоидальными высотами h_{GNSS} и пересчитаны в высоты h_{DEM} для оценки точности с учётом значения высоты геоида N_{GGM} , соответствующих вертикальному датуму модели. Так как цифровая модель рельефа изначально формировалась в системе эллипсоидальных высот (h_{GNSS}), однако в ряде случаев значения преобразуются в высоты H_{DEM} путём использования глобальной гравитационной модели (ГГМ) и соответствующих высоты геоида N_{GGM} . Связь между геодезической (h), ортометрической (H) высотой и высотой геоида (N) в каждой заданной точке определялась с помощью выражения:

$$h_{DEM} = H_{DEM} + N_{GGM} \quad (2.1)$$

В данной работе значения N_{GGM} высот геоида по модели EGM96, EGM2008 были рассчитаны с помощью онлайн сервиса ICGEM [70].

Для вычисления разности между высотами топографической поверхности и ЦМР существуют два основных подхода:

- интерполированием высот поверхности ЦМР в заданных точках топографической поверхности с известными отметками ГНСС;
- интерполированием высот топографической поверхности в узлах сетки матрицы высот ЦМР.

В данной работе для оценки ЦМР использовались пункты ГГС (совмещенные с линией нивелирования I, II и III классов) с известными эллипсоидальными и нормальными высотами. Основной набор данных содержит 40 ГНСС/нивелирных реперных точек. Эти данные находятся в открытом доступе в официальном геопортале «Государственное геодезическое обеспечение» Национальной инфраструктуры пространственных данных (НИПД) [71] и входят в состав официальной национальной системы координат (QazTRF-23).

Отметки высот поверхностей ЦМР в заданных точках с подписанными отметками земной поверхности рассчитывались путем интерполирования матрицы высот модели по координатам точки на эллипсоиде WGS-84 [64].

В рамках статистической обработки данных была применена аддитивная модель ошибок для анализа разностей высот, полученных с помощью ЦМР h_{DEM} , и фактического высотой рельефа h_{GNSS} :

$$\Delta h = h_{GNSS} - h_{DEM} \quad (2.2.)$$

Таблица 3.7.2 Статистика различий между h_{GNSS} и h_{DEM} , м

	Fabdem	Copernicus	SRTM30	NasaDem	Merit
min	-3,798	-6,012	-5,366	-6,904	-7,929
max	6,691	5,748	11,685	12,136	24,149
mean	0,937	-0,090	2,333	1,250	0,880
std	2,337	2,526	4,068	4,124	6,226
rmse	2,491	2,496	4,645	4,260	6,211

В таблице 3.7.2 приведены статистические показатели оценки вертикальной точности, которые показывают, что измерения ГНСС имеют наилучшее согласие с моделью FABDEM и Copernicus, за ним по точности следуют: NASADEM, SRTM30, MERIT, (Рисунок 3.7.2).

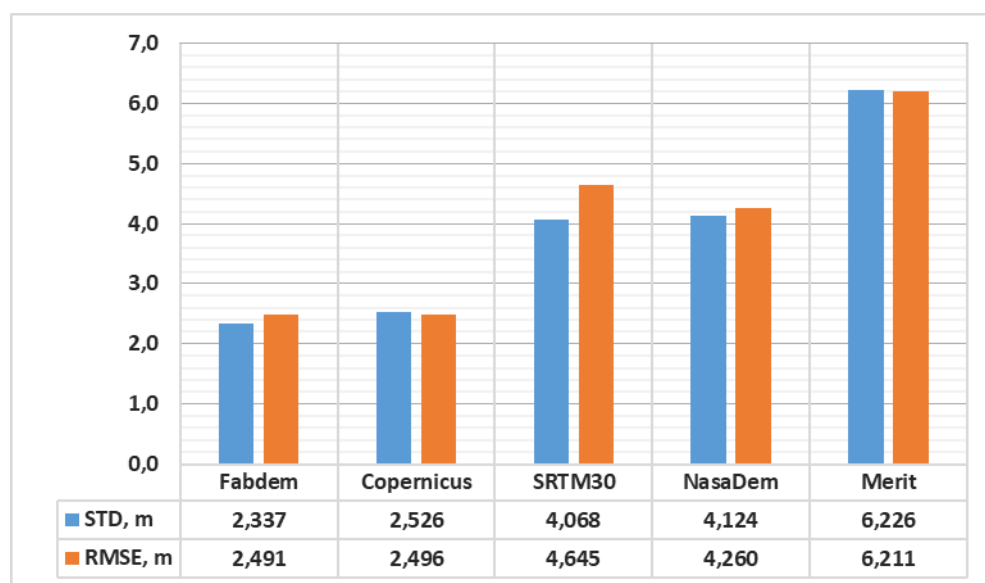


Рисунок 3.7.2 – График параметров статистики по значения RMSE и STD ошибок в различных местностях экспериментальной зоны

Оценка стандартного отклонения и корень из средней квадратической ошибки продемонстрировала хорошие значения для ЦМР FABDEM и Copernicus с значениями STD – 2.337 м и 2.526 м, RMSE – 2.491 м и 2.496 м.

Copernicus DEM представляет собой цифровую модель поверхности (DSM) с разрешением 1 угловая секунда, созданную на основе данных, полученных в период с декабря 2010 года по январь 2015 года в ходе миссии TanDEM-X, объединяющей два радарных спутника (Рисунок 3.7.3). Основной целью миссии TanDEM-X являлось создание глобальной, согласованной и высокоточной DSM с использованием технологии интерферометрии с синтезированной апертурой (SAR). Данная технология позволяет получать трехмерную информацию о поверхности Земли путем анализа разницы фаз между сигналами, полученными с двух разнесенных антенн. В результате миссии были созданы продукты DSM с различным разрешением (0.4", 1" и 3"), предназначенные для широкого круга пользователей. DSM Copernicus с разрешением 3" была выпущена в 2019 году, а версия с разрешением 1" стала доступна в конце 2020 года. Модель с наивысшим разрешением (0.4") доступна для коммерческого использования с 2016 года.

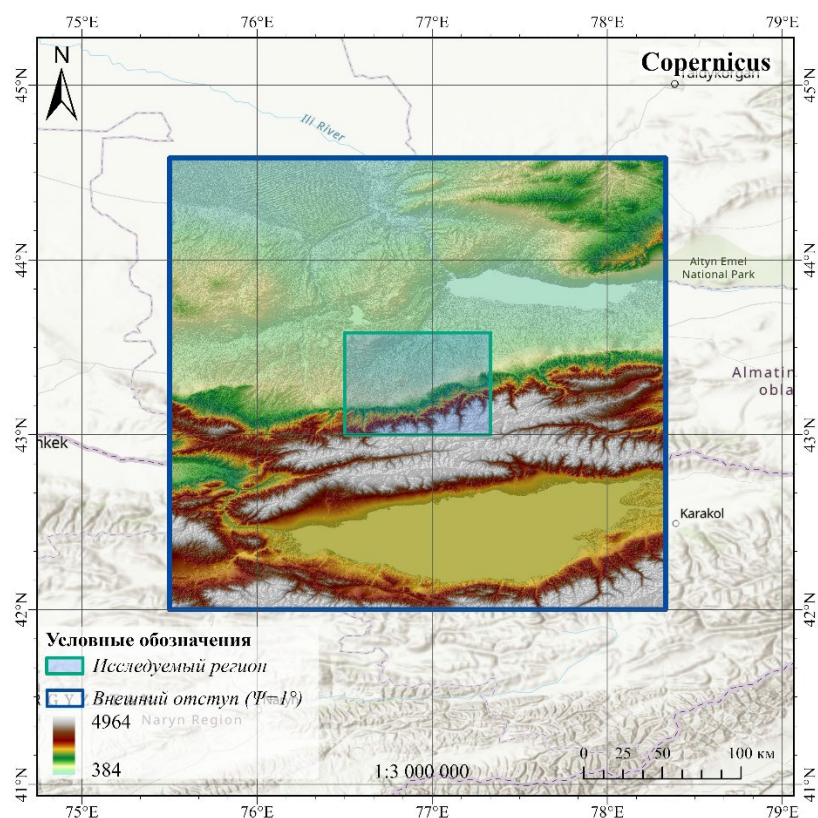


Рисунок 3.7.3 – Цифровая модель рельефа Copernicus

Copernicus DEM проходит значительную постобработку для повышения качества и соответствия требованиям различных приложений. Эта постобработка включает в себя коррекцию рельефа, гидрологическую обработку и удаление артефактов. В частности, осуществляется удаление шипов и отверстий, выявление и заполнение пустот (пропусков в данных), редактирование берегов и береговых линий для более точного представления водных объектов, а также коррекция неправдоподобных структур рельефа и случайных смещений. Эти процедуры направлены на повышение согласованности и реалистичности модели рельефа.

Оценка точности Copernicus DEM, проведенная путем сравнения с данными измерений ICESat (Ice, Cloud, and land Elevation Satellite), показала вертикальную среднеквадратичную ошибку (RMSE) в 1.68 метра. Следует отметить, что данная оценка отражает точность модели в целом, и локальные значения ошибок могут варьироваться в зависимости от рельефа местности, типа поверхности и других факторов.

Copernicus DEM предоставляется в географических координатах с горизонтальной системой отсчета World Geodetic System 1984 (WGS84) и вертикальной системой отсчета Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). WGS84 является широко используемой геодезической системой координат, определяющей положение точек на земной поверхности.

EGM2008 представляет собой модель гравитационного поля Земли, используемую для определения высот относительно геоида.

Copernicus DEM представляет собой ценный ресурс для различных геопространственных приложений, требующих высокоточной информации о рельефе. Благодаря высокому разрешению, глобальному покрытию и качественной постобработке, Copernicus DEM может использоваться для решения широкого круга задач, включая моделирование геоида, анализ гравитационных аномалий, мониторинг изменений земной поверхности и планирование инженерных сооружений. Важно учитывать, что Copernicus DEM является DSM (Digital Surface Model), то есть отражает высоту поверхности, включая растительность и искусственные объекты. В связи с этим, при использовании Copernicus DEM для задач, требующих информации о “голом” рельефе (DTM - Digital Terrain Model), необходимо учитывать влияние растительного покрова и других объектов на точность результатов [72].

FABDEM (Forest And Buildings removed Copernicus DEM) – цифровая модель местности (DEM), представляющая собой производный продукт от Copernicus DEM GLO-30 и разработанная с целью удаления из модели высот влияния лесов и зданий. FABDEM версии 1.0 имеет разрешение 1 угловая секунда (приблизительно 30 метров) и нацелена на предоставление более точного представления “голого” рельефа земной поверхности (Рисунок 3.7.4).

Ключевой задачей при создании FABDEM являлось устранение искажений, вносимых в модель высот наличием растительного покрова (в основном лесов) и искусственных сооружений (зданий), что позволяет получить DEM, более точно отражающую естественный рельеф. Для достижения этой цели была применена технология машинного обучения, в частности, метод случайного леса, который позволил эффективно идентифицировать и удалить влияние растительности и зданий из исходной модели Copernicus GLO-30.

В процессе удаления лесов из модели использовались данные высоты лесного полога, полученные от Глобального исследования динамики экосистем (GEDI) – глобального инструмента для измерения структуры лесов, установленного на Международной космической станции. Данные GEDI, основанные на наборе данных Global Forest Canopy Height 2019, использовались для широт в диапазоне от 52°N до 52°S. Для областей, лежащих за пределами охвата GEDI, применялись данные лазерной альтиметрии высоты полога, полученные со спутника ICESat-2 (Ice, Cloud, and land Elevation Satellite).

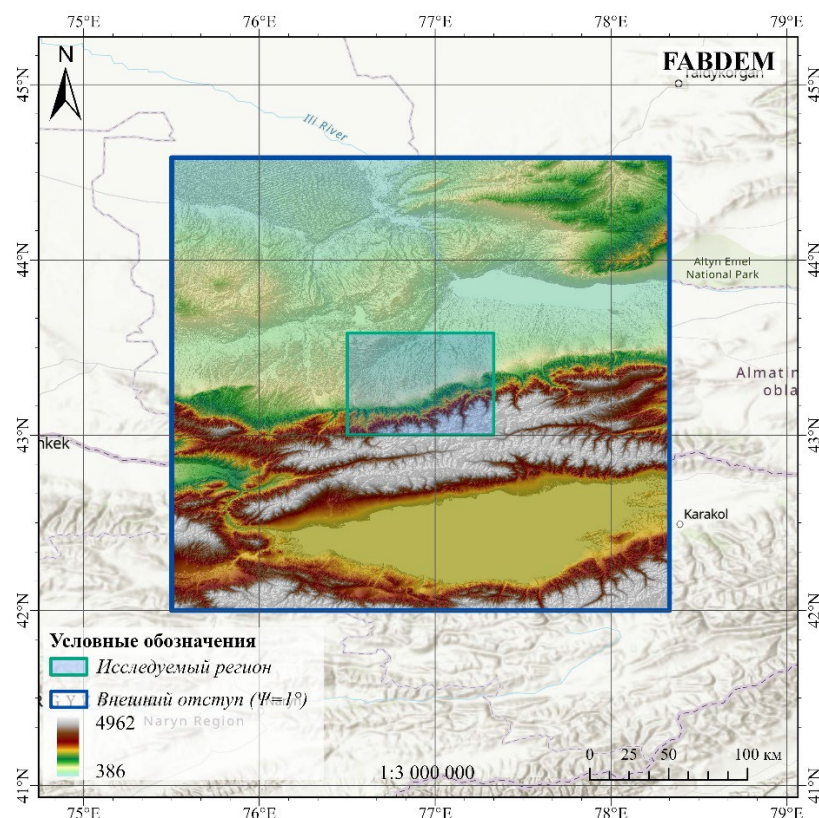


Рисунок 3.7.4 – «Почищенная» цифровая модель рельефа Copernicus

В обоих случаях для ограничения высот лесного полога использовались данные Copernicus Global Land Service 3 эпохи 2015 года о покрытии полога, что позволило повысить точность определения границ лесных массивов. Леса удалялись из модели в тех случаях, когда высота леса превышала 3 метра, а покрытие деревьями составляло более 10%.

Таким образом, FABDEM представляет собой специализированную цифровую модель местности, разработанную для задач, требующих точного представления «Почищенного» ЦМР и минимизации влияния растительности и искусственных сооружений [73].

3.8 Оценка и подбор глобальной модели геопотенциала (ГГМ)

Международный центр глобальных моделей Земли (ICGEM), это сервис по сбору и архивированию всех существующих статических и временных моделей глобального гравитационного поля, по предоставлению интерактивного онлайн-сервиса для вычисления функций гравитационного поля, свободно доступного для широкой общественности. На сегодняшний день в базе доступны 180 зарегистрированных ГГМ, с кратким описанием наборов данных, используемых при расчете моделей, которые способствуют выбору оптимальных и подходящих ГГМ для необходимых территорий.

Глобальные модели геопотенциала создаются на основе данных, полученных в ходе специализированных спутниковых миссий, таких как CHAMP, GRACE, GOCE и LAGEOS, а

также с помощью метода комбинирования наземных, спутниковых, данных альтиметрии. [74, 75]. Сервисом ICGEM перед публикацией новых глобальных моделей проводится исследование, с целью определения точности, в которой рассматриваются два метода сравнения. Первый метод базируется в сравнении с другими более известными, зарекомендовавшими себя как надежные глобальные модели, по спектру с использованием амплитуд степени сигнала. Второй метод заключается в сравнении с набором высот геоида, полученных с помощью ГНСС/Нивелирования для локальных регионов.

Таблица 3.8.1 – Средние квадратические значения высот геоида полученных путем ГНСС -нивелирование минус ГТМ (ICGEM) [70].

№	ГТМ	Nmax	Территория исследования и количество пунктов оценки, (единицы измерения указаны в метрах)							
			Австра- лия 7224	Брази- лия 1154	Канада 2706	Европа1047	Япония 816	Мек- сика 4898	США 6169	Итог 24014
176	XGM2019e_2159	2,19	0.097	0.208	0.139	0.127	0.09	0.173	0.248	0.1732
152	GECO	2,19	0.095	0.233	0.142	0.123	0.08	0.186	0.246	0.1763
167	SGG-UGM-1	2,159	0.092	0.241	0.141	0.121	0.076	0.189	0.245	0.1764
177	SGG-UGM-2	2,19	0.091	0.234	0.139	0.121	0.074	0.19	0.249	0.1775
148	EIGEN-6C4	2,19	0.091	0.234	0.137	0.121	0.079	0.197	0.247	0.178
139	EIGEN-6C3stat	1,949	0.095	0.237	0.14	0.121	0.078	0.197	0.247	0.1791
131	EIGEN-6C2	1,949	0.098	0.243	0.14	0.123	0.08	0.196	0.249	0.1805
125	EIGEN-6C	1,42	0.106	0.242	0.146	0.128	0.082	0.195	0.247	0.1816
161	XGM2016	719	0.104	0.213	0.16	0.14	0.125	0.178	0.263	0.184
176	XGM2019	760	0.103	0.213	0.159	0.14	0.125	0.178	0.264	0.1843
104	EGM2008	2,19	0.095	0.302	0.14	0.125	0.083	0.212	0.248	0.1877
154	GOCO05c	720	0.105	0.219	0.163	0.138	0.217	0.221	0.262	0.1968
153	GGM05C	360	0.175	0.276	0.219	0.225	0.282	0.253	0.321	0.2505
126	GIF48	360	0.177	0.293	0.214	0.229	0.275	0.27	0.319	0.2541
114	EIGEN-51C	359	0.186	0.308	0.24	0.248	0.312	0.323	0.335	0.2783
105	EIGEN-5C	360	0.203	0.389	0.287	0.266	0.339	0.403	0.341	0.3145
109	GGM03C	360	0.259	0.359	0.347	0.301	0.316	0.366	0.347	0.3249

В таблице 3.8.1 выделены модели, выбранные для локальной оценки, при выборе которых учитывались не только их точность, но и другие аспекты. К примеру, выбор модели EGM2008 обосновывается её актуальностью в Республике Казахстан. Между SGG-UGM-1 и

SGG-UGM-2 был выбран SGG-UGM-2 с учетом нескольких факторов: новизна, исходные данные, значение $N_{\max}$. По тому же принципу была отобрана модель EIGEN-6C4. На сегодняшний день самой точной моделью считается XGM2019e_2159, опубликованный в 2019 году (Таблица 3.8.2) [70].

Таблица 3.8.2 – Основные характеристики выбранных ГГМ [70].

№	Порядковый номер в базе ICGEM	Модель ГГМ	Год публикации	Степень/макс	Исходные данные
1	177	SGG-UGM-2	2020	2190	A, EGM2008, S(Goce), S(Grace)
2	176	XGM2019e_2159	2019	5540	A, G, S(GOCO06s), T
3	152	GECO	2015	2190	EGM2008, S(Goce)
4	148	EIGEN-6C4	2014	2190	A, G, S(Goce), S(Grace), S(Lageos)
5	104	EGM2008	2008	2190	A, G, S(Grace)

В колонке «Данные», отображены наборы данных, которые были использованы при разработке модели ГГМ: A обозначает альтиметрию, S обозначает спутники, такие как GRACE, GOCE, LAGEOS, G — наземные данные (включает наземные, корабельные и воздушные данные), T — топографию.

Сервис ICGEM также позволяет произвести расчеты высот геоида гравитационного поля на эллипсоидальных сетках, результаты которых показаны на рисунке 3.8.1. При подсчете высоты геоида использовались аппроксимированная высота геоида и топографические данные ETOPO1.

Оценка точности глобальных гравитационных моделей на мировом уровне позволяет оценить общее качество моделирования гравитационного поля Земли. Связи с тем, что для исследуемого региона и близлежащих территории отсутствуют пункты, которые участвовали в глобальной оценке, появляется необходимость в локальной оценке модели гравитационного поля.

Глобальная модель геопотенциала, по сути, представляет собой набор безразмерных, полностью нормализованных коэффициентов сферических гармоник и с их ошибками δC_{nm} и δS_{nm} , которые можно использовать для моделирования гравитационного поля Земли. Эти коэффициенты рассчитываются с использованием спутниковых данных или комбинации спутниковых и земных гравитационных данных [76]. В рисунке 3.8.1 приведены 5 отобранных ГГМ со значениями аномалии Буге.

Коэффициенты сферических гармоник можно использовать для расчета высоты геоида, аномалий силы тяжести, гравитационных возмущений и вертикальных отклонений, а

также других производных гравитационного поля. При оценке эффективности ГТМ для конкретного региона производные коэффициентов сферических гармоник сравниваются с наблюдаемыми величинами [68, 77, 78].

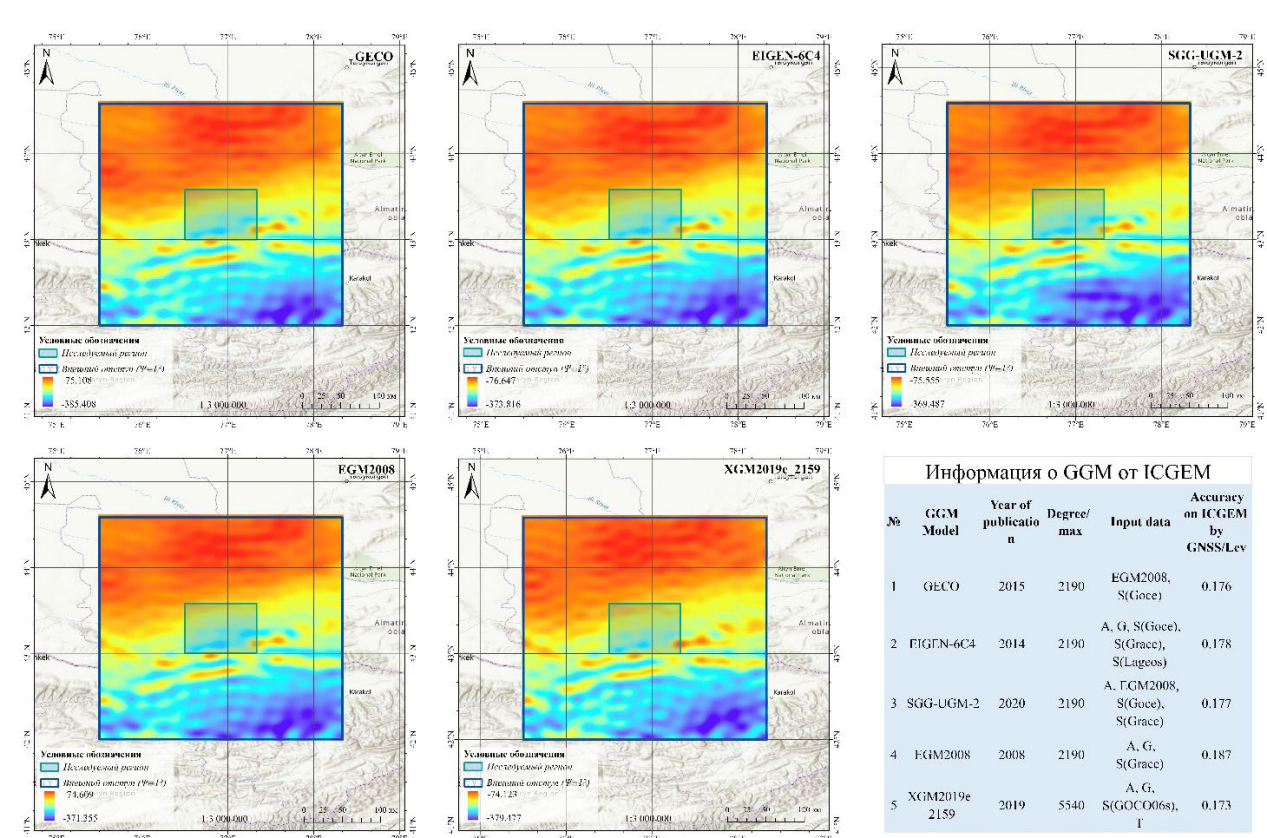


Рисунок 3.8.1 – Значения аномалии Буге отобранных Глобальных геопотенциальных моделей

Выполнена сравнительная оценка пяти глобальных геопотенциальных моделей (ГТМ) на основе независимого контрольного набора из 8571 наземного пункта гравиметрических наблюдений, равномерно распределённых по исследуемой территории. Для этих же пунктов с использованием сервиса ICGEM были интерполированы значения аномалии Буге, которые были сопоставлены с наземными измерениями [70]. Для оценки точности и степени соответствия были использованы статистические критерии, такие как среднеквадратическое отклонение (RMSE), стандартное отклонение (STD) и другие параметры (Таблица 3.8.3). По итогам сопоставления определена ГТМ, обеспечивающая наилучшее согласование с полевыми данными для исследуемой территории.

Таблица 3.8.3 - Статистика различий по значениям аномалии Буге между пунктами ГГМ и наземными пунктами

	EGM2008	SGG-UGM-2	XGM2019e_2159	EIGEN-6C4	GECO
min	-76.107	-79.184	-79.301	-78.387	-71.992
max	98.972	93.819	88.624	93.441	99.974
mean	18.140	18.247	17.204	18.196	18.504
std	13.715	13.169	13.354	13.180	14.489
rmse	22.740	22.503	21.778	22.468	23.501

В рисунке 3.8.2 приведены значения стандартного отклонения, полученные при подсчете разниц между наземными и глобальными данными.

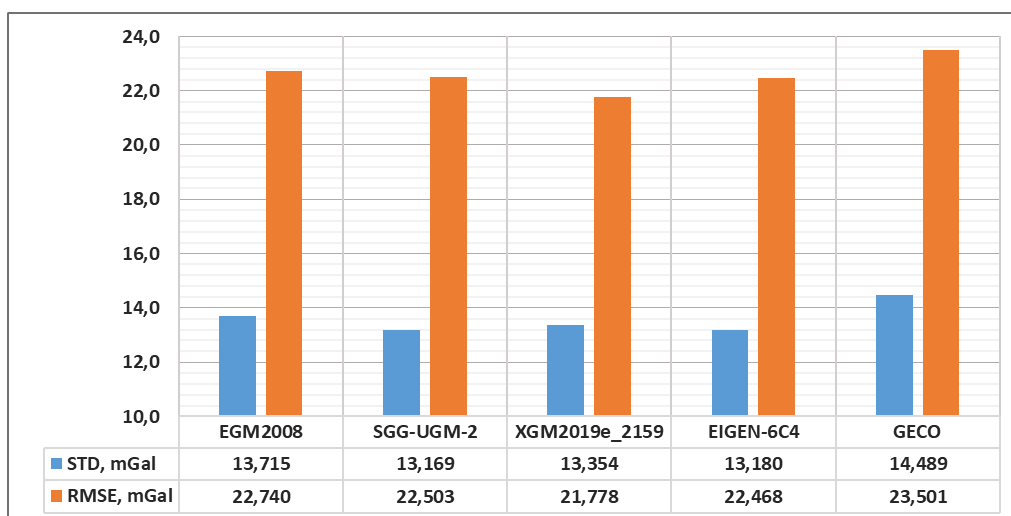


Рисунок 3.8.2 - Сравнение стандартного отклонения (STD) и среднеквадратичного отклонения (RMSE) между значениями аномалий Буге по различным ГГМ и наземными наблюдениями

Разности между глобальными и наземными значениями были проанализированы по статистическим критериям: среднеквадратическому отклонению (RMSE), стандартному отклонению (STD), минимальному и максимальному отклонениям, а также среднему значению. Результаты, представленные в таблице и на гистограмме, показывают, что наименьшее значение STD и RMSE продемонстрировала модель XGM2019e_2159 (STD = 13.354 mGal, RMSE = 21.778 mGal). модели GECO и EGM2008 демонстрируют немного более высокие значения ошибок.

3.9 Выводы по главе 3

Проведенные в рамках настоящего исследования мероприятия по рекогносцировке, спутниковым наблюдениям и уравниванию координат геодезических пунктов города

Алматы подтвердили актуальность комплексного подхода к модернизации местной геодезической сети на основе современных ГНСС-технологий и классических методов геодезии. Было выполнено обследование 17 пунктов сети триангуляции 1 класса, совмещенных с линией нивелирования 2 класса, что позволило сформировать прочную основу для высокоточной оценки локальной модели геоида.

На первом этапе была проведена тщательная обследование пунктов, в ходе которого было установлено их текущее состояние, географическое распределение, топографические особенности местности, а также обеспечено получение нормальных высот в системе БСВ-77. Такое сочетание данных по горизонтальному положению и высотному обеспечению позволило сформировать качественную входную информацию для последующего моделирования геоида и поиска параметров перехода.

Второй этап включал проведение статических спутниковых наблюдений продолжительностью 24 часа на 15 пунктах с использованием двухчастотных ГНСС-приемников. Благодаря использованию комплекса ПО GAMIT/GLOBK была обеспечена высокоточная постобработка данных, с внесением поправок на орбиты спутников, ионосферные и тропосферные эффекты, многолучевость и т.д. В результате получены уравниваемые координаты с высокими показателями точности — средние значения RMS не превышали 7 мм для большинства станций, за исключением пунктов, подверженных сильной многопутности. Несмотря на наличие таких помех, система корректировок GAMIT показала высокую устойчивость и позволила минимизировать влияние ошибок.

Заключительный этап обработки данных ГНСС был направлен на уравнивание координат в программном комплексе GLOBK. Использование совместного уравнивания с референсными станциями сети IGS и применение современных моделей для учета глобальных и локальных систематических эффектов обеспечили получение координатных решений с крайне малыми остаточными ошибками. Средние значения WRMS по компонентам (восток, север, высота) варьировались в пределах 0.0013–0.0533м, что демонстрирует высокий уровень точности и согласованности наблюдений. Особенно высокая точность достигнута на станциях Котырбулак, Курсай и Горный гигант, где влияние внешних помех минимально.

Таким образом, проведенная работа подтвердила возможность создания современной, устойчивой и высокоточной опорной геодезической сети на территории города Алматы, интегрированной в глобальные геодезические системы координат. Полученные координаты и высоты пунктов могут быть использованы как в задачах построения локальной модели геоида, так и в широком спектре инженерных и научно-исследовательских применений. Сформированная информационная база является надежной основой для последующих этапов

трансформации координат между локальной и глобальными системами и для построения высокоточной модели квазигеоида. Также важно учитывать, что выбор между использованием `itrf14.apr` и `igs14_comb_eura.apr` зависит от конкретных целей и задач анализа. Если требуется решение в глобальной референционной рамке ITRF2014, то более подходящим может быть использование файла `itrf14.apr`. Если же основное внимание уделяется анализу данных в Евразийском регионе и требуется стабилизация относительно этой плиты, то файл `igs14_comb_eura.apr` может оказаться более предпочтительным.

В ходе исследовательской работы была сформирована информационная база для построения локальной модели геоида и поиска параметров преобразования. Подготовка гравиметрических данных осуществлялась на основе комбинирования наземных измерений (оцифрованные гравиметрические карты 1:200 000 масштаба) и глобальных гравиметрических данных (WGM2012), что позволило обеспечить полное покрытие исследуемой территории и учесть область отступа для сферической шапки.

Дополнительно проведена оценка цифровых моделей рельефа (ЦМР) и глобальных гравитационных моделей (ГГМ), включавшая анализ их точности, согласованности и применимости к рассматриваемой территории. Это позволило выбрать оптимальные источники данных для расчёта топографических и длинноволновых поправок, а также определить вклад различных моделей в общую погрешность будущей геоидной аппроксимации.

Таким образом, в результате выполненных процедур подготовлен комплексный массив входных данных, включающий комбинированные гравиметрические сведения, проверенные цифровые модели рельефа и отобранные глобальные модели гравитационного поля, также определение с высокой точностью на пунктах АГС города Алматы и прилегающих территории эллипсоидальные координаты и высоты, что создаёт надёжную основу для последующего моделирования локального геоида и преобразования координат.

4. ТРАНСФОРМАЦИЯ КООРДИНАТ МЕЖДУ ЛОКАЛЬНОЙ И ГЛОБАЛЬНОЙ СИСТЕМАМИ КООРДИНАТ

Настоящая глава посвящена апробации и валидации методов двумерной трансформации координат между местной системой координат города Алматы (МСК Алматы) и системой (проекцией) UTM, согласованной с глобальной опорной рамкой WGS-84/ITRF, что позволяет определить и предложить обновлённые параметры преобразования между системами. Следует подчеркнуть, что между системами WGS 84 и ITRF принципиальных расхождений не существует. С момента введения глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS) система WGS 84 регулярно обновлялась и согласовывалась с реализациями Международной земной системы отсчёта (ITRF), что обеспечивается службами IGS и NGA. В актуальных версиях (начиная с WGS 84(G873) и далее) параметры WGS 84 полностью эквивалентны соответствующим реализациям ITRF с учётом эпохи наблюдений. Таким образом, использование терминов WGS 84 и ITRF в практических приложениях, связанных с GNSS-наблюдениями, является равнозначным, а все различия носят лишь технический характер, связанный с уточнением параметров и временной привязкой. Переход между глобальными системами WGS 84/ITRF и картографической проекцией UTM не представляет сложности, поскольку основан на прямых геодезических преобразованиях (проецировании координат с эллипсоида на плоскость). В таких случаях используются строго определённые параметры трансверсальной цилиндрической проекции, что исключает необходимость подбора эмпирических коэффициентов. В дальнейшем основное внимание в диссертации уделяется задаче - определению параметров трансформации между локальной системой координат МСК Алматы и системой UTM. Основная цель состоит в выборе и обосновании метода двумерной трансформации координат между МСК Алматы и системой UTM, обеспечивающего наивысшую достижимую точность планового положения и согласованность с глобальной опорной рамкой WGS-84/ITRF. Рассматриваются аппроксимационные математические модели как преобразование Гельмерта, аффинное и билинейное преобразование, а также полиномиальные и конформно-полиномиальная аппроксимация второго и третьего порядков [79-89].

В расчётах трансформации участвовали 13 пунктов астрономо-геодезической сети. По результатам обследования 2020 г. Выявлено, что из 17 пунктов 2 - BASS, PION были утрачены. Тем самым подтверждена сохранность 15 пунктов: ATA1, BERE, BORO, CHIB, GASO, GORN, KARK, KART, KOTU, KURK, KURS, PORT, PRGD, TAST, UZBK. Из этого набора два пункта TAST и KURK исключены из задачи трансформации из-за отсутствия

координат в МСК в архивных каталогах; таким образом, окончательный набор составил 13 пунктов (рисунок 4.1).

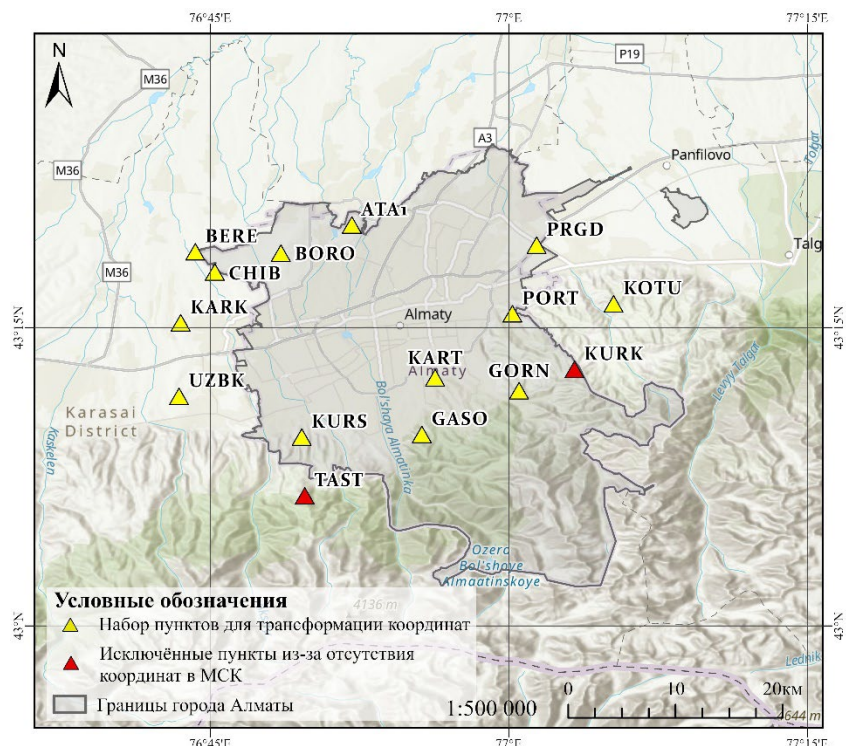


Рисунок 4.1. - Схема расположения геодезических пунктов, участвующих в трансформации координат

Параметры преобразования подбираются между МСК Алматы и глобальной UTM, поскольку неоднородности сосредоточены в локальной сети. В исследовательской работе использован комплекс аппроксимационных моделей плоской трансформации; ниже эти модели рассмотрены в порядке возрастания сложности параметризации.

4.1. Конформное преобразование Гельмерта (4-параметрическая модель)

Для нахождения параметров преобразования используется простейшая модель, известная как преобразование Гельмерта. Данная модель позволяет описать трансформацию через четыре параметра: координаты начала координат, угол поворота и масштаб.

$$\begin{aligned} u &= a_1x - b_1y + a_0; \\ v &= b_1x + a_1y + b_0. \end{aligned} \quad (4.1.1)$$

где (x,y) - координаты в исходной системе (МСК), (u,v) — координаты в целевой системе (UTM); a_0, b_0 - сдвиги, a_1, b_1 - совместно определяют общий масштаб и поворот.

Получены следующие значения параметров преобразования координат:

– Масштаб: $229.517 \text{ ppm} \pm 5.977 \text{ ppm} \rightarrow$

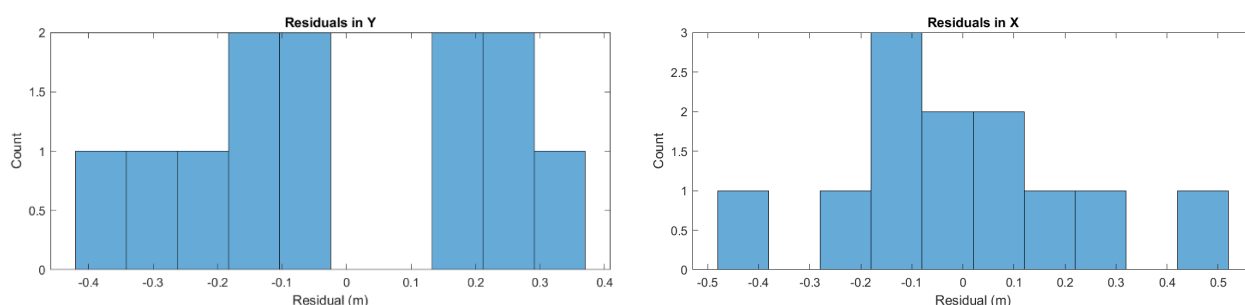
$m=1.000229517$ $m=1.000229517$ $m=1.000229517$ ($\approx 0.02295 \%$). Эффект масштаба: $\sim 0.23 \text{ м на } 1 \text{ км}$ ($\approx 2.30 \text{ м на } 10 \text{ км}$); неопределённость по масштабу: $\sim 0.006 \text{ м/км}$ ($\approx 0.06 \text{ м/10 км}$).

– Поворот: $-1.319761^\circ \pm 0.000342^\circ$ ($\approx -0.02304 \text{ рад} \pm 5.97 \times 10^{-6} \text{ рад}$).

Фиксируется существенное угловое рассогласование осей МСК и UTM порядка 1.32° .

– Сдвиги: $T_x = -768\,893.152 \pm 28.904 \text{ м}$, $T_y = -4\,776\,062.433 \pm 28.904 \text{ м}$.

Большие по модулю значения отражают различие начал координат (ложные восток/север UTM и локальное начало МСК) и не являются показателем точности.



Остаточные уклонения:

– $RMSE_X = 0.2551 \text{ м}$, $RMSE_Y = 0.2684 \text{ м}$ (DOF=9 по компоненте).

– Суммарный RMSE (план) = 0.2484 м (DOF=20 ≈ 12 опорных точек для 4-х параметров).

4.2. Билинейное преобразование.

Оценена билинейная аппроксимация двумерного преобразования (МСК в UTM) в нормализованной форме при центрировании по средним исходной системы: $(\bar{x}, \bar{y}) = (652\,230.765; 4\,791\,504.971)$. Средние целевой системы: $(-6\,301.822; 245.195)$.

$$\begin{aligned} u &= a_1x + a_2y + a_3xy + a_0; \\ v &= b_1x + b_2y + b_3xy + b_0. \end{aligned} \quad (4.2.1)$$

где (x, y) — исходные координаты (МСК), (u, v) — целевые (UTM); a_0, b_0 — сдвиги, линейные коэффициенты (a_1, a_2, b_1, b_2) .

Получены следующие значения коэффициентов:

$$u = a_0 + a_1 \cdot (X - \bar{x}) + a_2 \cdot (Y - \bar{y}) + a_3 \cdot (X - \bar{x})(Y - \bar{y})$$

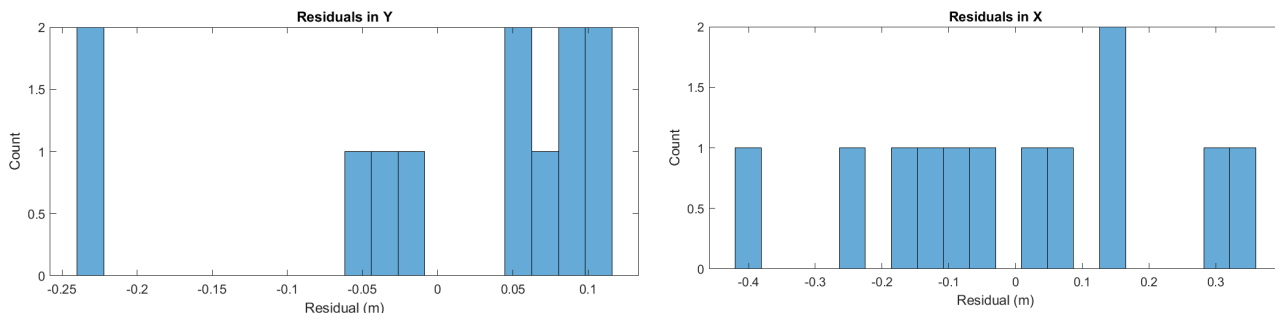
$$v = b_0 + b_1 \cdot (X - \bar{x}) + b_2 \cdot (Y - \bar{y}) + b_3 \cdot (X - \bar{x})(Y - \bar{y})$$

$$a_1 \approx 0.999960; a_2 \approx +0.023028; a_3 \approx 0; a_0 \approx 0.000050;$$

$$b_1 \approx -0.023040; b_2 \approx 0.999970; b_3 \approx 0; b_0 \approx 0.004679.$$

Ключевые выводы по коэффициентам.

Пара (a_2, b_1) соответствует повороту $\theta \approx 0.023$ рад $\approx 1.32^\circ$. a_1 и b_2 близки к 1.000, что указывает на единичный масштаб в окрестности центроида. Смешанные члены a_3 и b_3 статистически пренебрежимо малы (существенной билинейности не выявлено).



Остаточные уклонения:

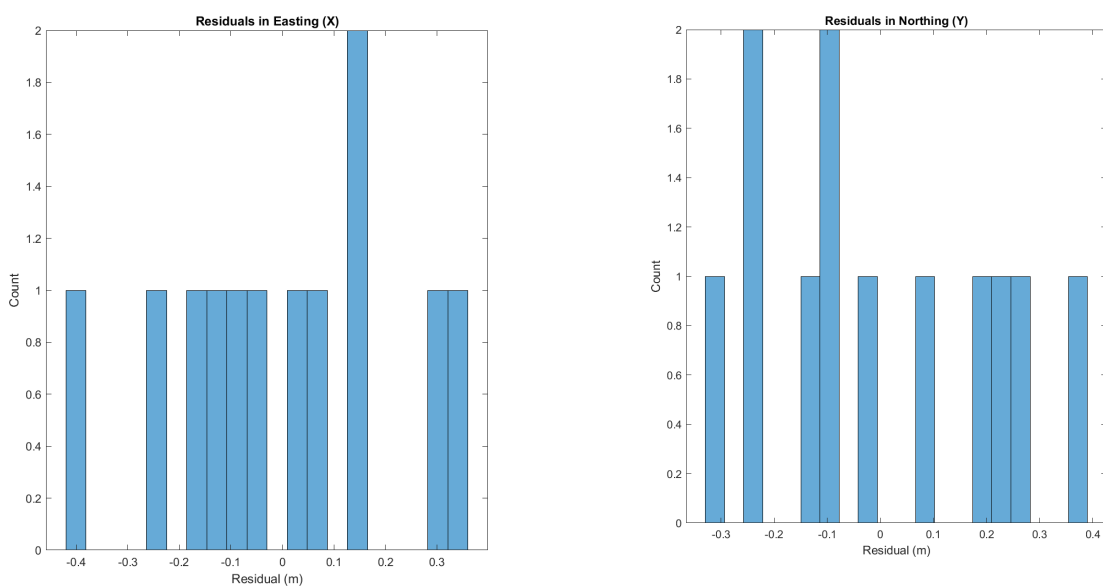
$RMSE_X = 0.2550$ м (DOF = 8); $RMSE_Y = 0.1409$ м (DOF = 8); Combined RMSE = 0.2060 м (DOF = 16).

Суммарная плановая погрешность после калибровки составляет ≈ 0.206 м. Отмечается выраженное улучшение по оси Y относительно конформной модели.

4.3 Аффинное преобразование координат.

Среди классических геометрических преобразований на плоскости наиболее полным является аффинное преобразование.

$$\begin{aligned} u &= a_1x + a_2y + a_0; \\ v &= b_1x + b_2y + b_0. \end{aligned} \quad (4.3.1)$$



Получены следующие значения параметров преобразования координат:

- Поворот (из столбца $[a_1, b_1]$): $\theta \approx -1.319971^\circ$.
- Нормы столбцов (эффективные масштабы): $s_1=1.000225419$ (225.4 ppm), $s_2=1.000240116$ (240.1 ppm).
- Анизотропия масштаба (s_2-s_1): 14.7 ppm.
- Неортогональность (скалярное произведение столбцов): $-1.334509e-05$ (-13.3 ppm)
- близко к нулю (shear пренебрежим).
- Средний масштаб $m \approx 1.000232768$ (232.8 ppm) $\rightarrow$ эффект ~ 0.233 м на 1 км.

Остаточные уклонения:

RMSE_X = 0.2404 м (DOF = 9); RMSE_Y = 0.2524 м (DOF = 9); Combined RMSE = 0.2465 м (DOF = 18).

Линейная часть близка к конформному подобию: единичный масштаб ($\approx +233$ ppm), поворот $\approx -1.320^\circ$, анизотропия масштаба ~ 15 ppm и сдвиг осей (shear) ~ 13 ppm — все величины малы. Остаточная плановая погрешность (Combined RMSE ≈ 0.247 м) сопоставима с результатом конформной модели, что указывает на отсутствие выраженных аффинных деформаций в данных.

4.4. Полиномиальное преобразование второго и третьего порядка.

Полиномиальное преобразование второго порядка. В отличие от предыдущих моделей, описывающих геометрические преобразования параметрами, имеющими геометрическую интерпретацию (сдвиг, поворот и т. д.), существует еще один случай, известный как полиномиальное преобразование. Среди этих преобразований наиболее популярным является полиномиальное преобразование второго порядка.

$$\begin{aligned} u &= a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 + a_0; \\ v &= b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2 + b_0, \end{aligned} \quad (4.4.1)$$

Остаточные уклонения:

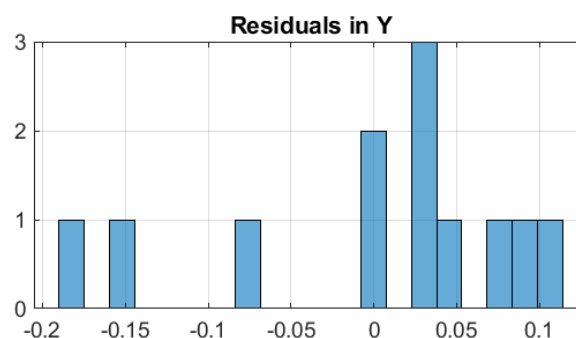
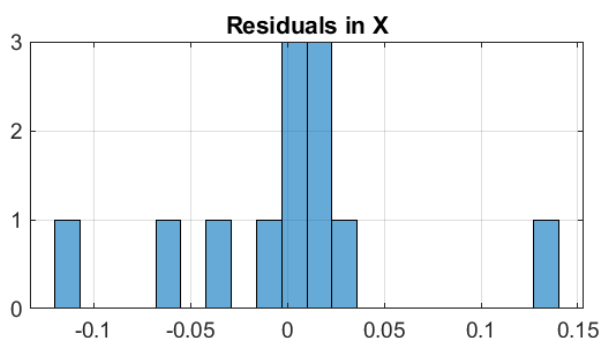
RMSE_X = 0.080742 м; RMSE_Y = 0.126333 м; Combined RMSE = 0.106017 м.
Средняя норма остатка = 0.084087 м; стандартное отклонение нормы = 0.067438 м; максимальная норма остатка = 0.207530 м.

Оценённые коэффициенты (в «реальных» единицах) и их значимость:

Для оси u (X')

	Оценка	$\pm 1\sigma$	Значимость
$X^0 \cdot Y^0$ (a0)	0.216769	0.080569	2.69 σ
$X^0 \cdot Y^1$ (a2)	150.327641	0.027366	5493.23 σ
$X^0 \cdot Y^2$ (a5)	0.045839	0.043083	1.06 σ
$X^1 \cdot Y^0$ (a1)	10698.368266	0.025717	416003.74 σ
$X^1 \cdot Y^1$ (a3)	0.048879	0.038309	1.28 σ

$X^2 \cdot Y^0$ (a4)	-0.283274	0.049659	5.70 σ
Для оси v (Y')			
	Оценка	$\pm 1\sigma$	Значимость
$X^0 \cdot Y^0$ (b0)	-0.098416	0.126063	0.78 σ
$X^0 \cdot Y^1$ (b2)	6526.501602	0.042819	152420.69 σ
$X^0 \cdot Y^2$ (b5)	0.105126	0.067410	1.56 σ
$X^1 \cdot Y^0$ (b1)	-246.486566	0.040238	6125.72 σ
$X^1 \cdot Y^1$ (b3)	-0.288539	0.059940	4.81 σ
$X^2 \cdot Y^0$ (b4)	0.007900	0.077699	0.10 σ



Полином второго порядка обеспечивает существенное снижение плановой ошибки: Combined RMSE ≈ 0.106 м, что значительно лучше по сравнению с конформной (≈ 0.248 м), аффинной (≈ 0.247 м) и билинейной (≈ 0.206 м) моделями. Это свидетельствует о наличии слабонелинейной составляющей в поле несоответствия между МСК и UTM.

Полиномиальное преобразование третьего порядка.

$$\begin{aligned}
 u &= a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 + a_6x^3 + a_7x^2y + a_8xy^2 + a_9y^3 + a_0; \\
 v &= b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2 + b_6x^3 + b_7x^2y + b_8xy^2 + b_9y^3 + b_0. \quad (4.4.2)
 \end{aligned}$$

Остаточные уклонения: RMSE_X = 0.035499 м; RMSE_Y = 0.157451 м; Combined RMSE = 0.114129 м. Нормы векторных остатков: mean $|r|$ = 0.044753 м; std $|r|$ = 0.050514 м; max $|r|$ = 0.154507 м.

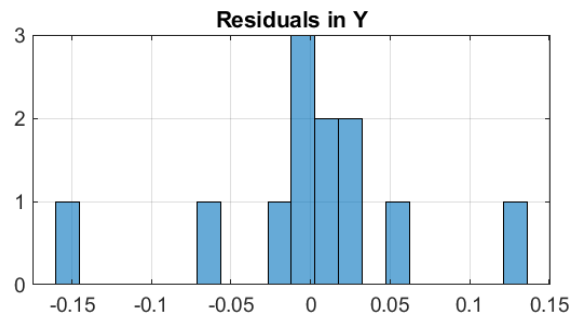
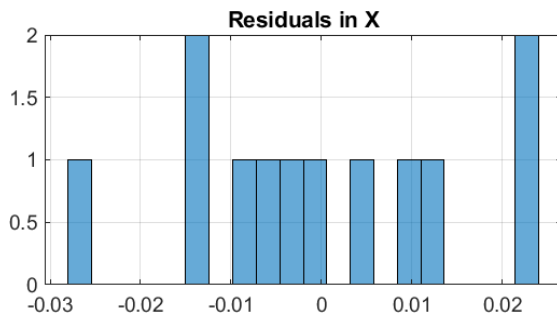
Оценённые коэффициенты (в «реальных» единицах):

Для оси u (X')

	Оценка	$\pm 1\sigma$	Значимость
$X^0 \cdot Y^0$	0.193564	0.041821	4.63 σ
$X^0 \cdot Y^1$	150.599379	0.062954	2392.21 σ
$X^0 \cdot Y^2$	0.001037	0.024508	0.04 σ
$X^0 \cdot Y^3$	-0.118284	0.029621	3.99 σ
$X^1 \cdot Y^0$	10698.557564	0.050581	211513.37 σ
$X^1 \cdot Y^1$	0.027456	0.018199	1.51 σ
$X^1 \cdot Y^2$	-0.059543	0.027285	2.18 σ
$X^2 \cdot Y^0$	-0.236368	0.030196	7.83 σ
$X^2 \cdot Y^1$	-0.127550	0.034386	3.71 σ
$X^3 \cdot Y^0$	-0.093794	0.029822	3.15 σ

Для оси v (Y')

	Оценка	$\pm 1\sigma$	Значимость
$X^0 \cdot Y^0$	-0.103457	0.185488	0.56 σ
$X^0 \cdot Y^1$	6526.208084	0.279220	23373.00 σ
$X^0 \cdot Y^2$	0.176543	0.108700	1.62 σ
$X^0 \cdot Y^3$	0.148239	0.131376	1.13 σ
$X^1 \cdot Y^0$	-246.666755	0.224343	1099.51 σ
$X^1 \cdot Y^1$	-0.272376	0.080720	3.37 σ
$X^1 \cdot Y^2$	0.045657	0.121018	0.38 σ
$X^2 \cdot Y^0$	-0.024587	0.133927	0.18 σ
$X^2 \cdot Y^1$	0.098053	0.152510	0.64 σ
$X^3 \cdot Y^0$	0.092600	0.132271	0.70 σ

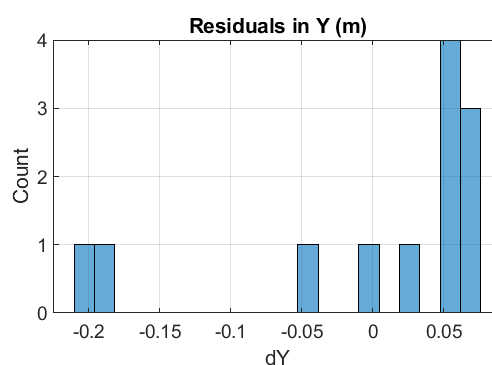
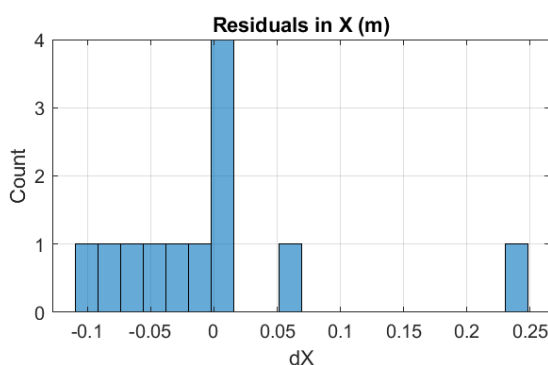


Комбинированный RMSE для кубической модели составляет ≈ 0.114 м и хуже, чем у квадратичной модели (≈ 0.106 м), несмотря на резкое улучшение по оси X (до ≈ 0.036 м). Ухудшение по оси Y (≈ 0.157 м против ≈ 0.126 м) при крайне малых степенях свободы (4) указывает на переобучение и нестабильность оценки отдельных коэффициентов.

4.5. Полиномиальный конформный метод преобразования второго и третьего порядка

Известно, что параметры полиномиального преобразования не имеют геометрического смысла, и преобразование не сохраняет форму для бесконечно малых областей. Другими словами, полиномиальное преобразование порядков выше единицы нарушает условие соответствия. Полиномиальное конформное преобразование лишено этого недостатка, однако не для областей конечного размера. Для нашего исследования мы использовали конформное полиномиальное преобразование второго и третьего порядка:

$$\begin{aligned} y_1 &= A_0 + A_1 x_1 + A_2 x_2 + A_3(x_1^2 - x_2^2) + A_4(2x_1 x_2) \\ y_2 &= B_0 - A_2 x_1 + A_1 x_2 - A_4(x_1^2 - x_2^2) + A_3(2x_1 x_2) \end{aligned} \quad (4.5.1)$$



Коэффициенты линейной части ($u_x, u_y; v_x, v_y$)

$$u_x = A = 0.999631 \pm 0.000003; \quad u_y = B = 0.014049 \pm 0.000003$$

$$v_x = C = -0.037767 \pm 0.000006; \quad v_y = D = 1.000025 \pm 0.000006$$

Сдвиги: $a_0 \approx 0.000000 \pm 0.000003$; $b_0 \approx 0.000001 \pm 0.000005$ (в нормализованных единицах).

Эффективный поворот (наилучшая конформная аппроксимация линейной части): $\theta \approx -1.484^\circ$.

Эффективный масштаб: $m \approx 1 + 233.9 \text{ ppm} \rightarrow \sim 0.234 \text{ м на 1 км}$.

Анизотропия масштаба (разность норм столбцов): -220.5 ppm (мала).

Коэффициенты квадратичных членов (в нормализованных единицах)

	u-коэф.	$\pm 1\sigma$	v-коэф.	$\pm 1\sigma$
$X^2 - Y^2 (a_3/b_3)$	-0.000014	0.000003	-0.000008	0.000004
$2XY (a_4/b_4)$	0.000000	0.000002	-0.000020	0.000004

Значимость: (u) $a_3 \sim 4.7\sigma$ (существенен), $a_4 \sim 0\sigma$ (незначим); (v) $a_3 \sim 2.0\sigma$ (пограничен), $a_4 \sim 5.0\sigma$ (значим). Итог: квадратичные члены улучшают аппроксимацию; при этом часть членов может быть урезана после LOOCV/AICс.

Остаточные уклонения: $RMSE_X = 0.1137 \text{ м}$; $RMSE_Y = 0.1239 \text{ м}$; Combined $RMSE = 0.1189 \text{ м}$.

Нормы векторных остатков: $\text{mean } |r| = 0.1003 \text{ м}$; $\text{std } |r| = 0.0838 \text{ м}$; $\text{max } |r| = 0.3224 \text{ м}$.

Полиномиально-конформное преобразование второй степени существенно улучшает точность относительно линейных моделей, уступая общей квадратичной модели ($\sim 0.106 \text{ м}$), но обеспечивая конформность (сохранение углов) и меньшую склонность к переобучению.

Полиномиально-конформное третьей степени.

Остаточные уклонения: $RMSE_X = 0.1288 \text{ м}$; $RMSE_Y = 0.1441 \text{ м}$; Combined $RMSE = 0.1367 \text{ м}$. Нормы векторных остатков: $\text{mean } |r| = 0.0953 \text{ м}$; $\text{std } |r| = 0.0842 \text{ м}$; $\text{max } |r| = 0.3179 \text{ м}$.

Получены следующие значения параметров преобразования координат:

$$u_x = 0.999632; \quad u_y = 0.014049; \quad v_x = -0.037767; \quad v_y = 1.000025.$$

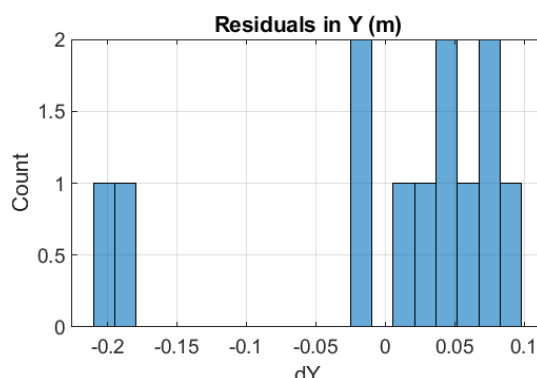
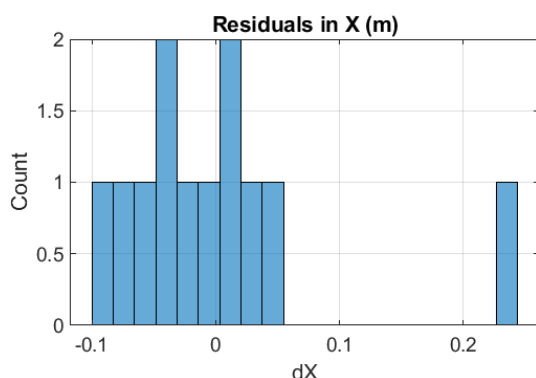
Эффективный поворот: $\theta \approx -1.484^\circ$. Эффективный масштаб: $m \approx 1 + 234.4 \text{ ppm}$ ($\sim 0.234 \text{ м/км}$).

Анизотропия масштаба (разность норм столбцов): -221.5 ppm . Скалярное произведение столбцов (неортогональность): $-2.372411\text{e-}02$ (близко к нулю).

Коэффициенты высоких порядков ($\pm 1\sigma$, нормализованные единицы)

	u-оценка	$\pm 1\sigma$	v-оценка	$\pm 1\sigma$
Quadratic 1 (Re/Im)	-0.000015 (5.0 σ)	0.000003	-0.000008 (1.6 σ)	0.000005
Quadratic 2 (Re/Im)	0.000000 (0.0 σ)	0.000003	-0.000020 (4.0 σ)	0.000005
Cubic 1 (Re/Im)	0.000000 (0.0 σ)	0.000002	0.000001 (0.2 σ)	0.000004
Cubic 2 (Re/Im)	-0.000001 (0.5 σ)	0.000002	-0.000001 (0.3 σ)	0.000003

Комбинированный RMSE для модели 3-го порядка составляет $\approx 0.137 \text{ м}$ и существенно уступает квадратичной полиномиальной модели общего вида ($\approx 0.106 \text{ м}$) и полиномиально-конформной 2-й степени ($\approx 0.119 \text{ м}$).



С учётом метрик точности и экономичности параметров целесообразно принять в качестве рабочей именно полиномиально-конформную модель 2-го порядка, а 3-й порядок рассматривать как избыточный для данной опорной базы.

4.5. Сравнительный анализ точности методов трансформации координат

Результаты и анализ определения параметров преобразования для первой подгруппы моделей представлены ниже. Для определения параметров преобразования были выбраны 13 точек с известными координатами в обеих системах координат предоставили подтверждающие данные о том, что этого количества достаточно для надежной трансформации. Основное требование к точности преобразования m_x , m_y состоит в том, что она должна быть ограничена диапазоном 0,05 м для каждой оси. Статистическая значимость была принята на уровне 99%. Это означает, что коэффициент вероятности t равен 2,5. Этот

критерий использовался для проверки качества преобразования. Предельные отклонения Δ_x , Δ_y после преобразования должны быть равны или меньше значений:

$$\Delta_x, \Delta_y \leq tm_x, tm_y. \quad (4.5.1)$$

Данные, полученные в результате исследования аппроксимационных моделей, представлены в таблице 4.5.1.

Таблица 4.5.1. Качество преобразования аппроксимационных моделей

Модель	Парам.	RMSE_X (м)	RMSE_Y (м)	RMSE_comb (м)	DOF (comb.)
Гельмерт (конформн.)	4	0.2551	0.2684	0.2484	20
Аффинная	6	0.2404	0.2524	0.2465	18
Билинейная	8	0.2550	0.1409	0.2060	16
Полиномиальная, 2-й	12	0.0807	0.1263	0.1060	12
Полиномиальная, 3-й	20	0.0355	0.1575	0.1141	4
Полин.-конформн., 2-й	10	0.1137	0.1239	0.1189	14
Полин.-конформн., 3-й	14	0.1288	0.1441	0.1367	10

Результаты для линейных моделей (Гельмерт, аффинная) показывают совмещённый плановый RMSE порядка 0,25 м. Это указывает на наличие в поле несоответствия «МСК-UTM» слабонелинейной составляющей, не описываемой ни подобием, ни общей аффинной деформацией. Билинейная модель даёт улучшение до $\approx 0,206$ м.

Полиномиальная модель 2-го порядка обеспечивает наилучший результат - Combined RMSE $\approx 0,106$ м при достаточной избыточности (DOF = 12). Это согласуется с предположением о физически обоснованной, плавной слабонелинейности поля преобразования на рассматриваемой территории. Полиномиальная модель 3-го порядка демонстрирует близкий совмещённый RMSE ($\approx 0,114$ м), но при резко сокращённых степенях свободы (DOF = 4) и ухудшении точности по оси Y; такая комбинация признаков типична для переобучения и делает модель 3-го порядка методически менее надёжной.

Из конформных вариантов полиномиально-конформная модель 2-й степени даёт $\approx 0,119$ м, обеспечивая сохранение прямых углов при умеренной сложности параметризации. Повышение порядка до степени 3 приводит к ухудшению метрик ($\approx 0,137$ м) при меньших DOF, что для имеющегося объёма опоры следует считать избыточным. Во всех случаях область валидности ограничивается выпуклой оболочкой опорных пунктов; применение вне этой области допускается только при дополнительной оценке погрешности (перекрёстная проверка, анализ пространственной структуры остатков).

Если условие конформности не является обязательным, целесообразно принять общую полиномиальную модель 2-го порядка как обеспечивающую минимальную плановую погрешность (Combined RMSE $\approx 0,106$ м). Если требуется сохранение углов и согласованность с инженерной практикой (конформные преобразования), рекомендуется полиномиально-конформная модель 2-го порядка с Combined RMSE $\approx 0,119$ м. В обоих случаях область валидности ограничивается выпуклой оболочкой использованных опорных пунктов; применение вне этой области допускается только при дополнительной оценке погрешности.

4.5 Выводы по главе 4

В ходе апробации аппроксимационных методов трансформации координат между глобальной основой WGS-84/ITRF (в проекции UTM) и локальной системой координат, исторически применявшейся в геодезической практике г. Алматы (МСК Алматы), показало, что в пределах городской территории присутствует слабонелинейная составляющая поля несоответствия, не устранимая линейными преобразованиями. Исходная опорная база была актуализирована по результатам обследования 2020 г. (17 пунктов; 2 утрачены; 15 сохранены; в расчётах использованы 13 пунктов), что позволило выполнить сопоставление моделей на сопоставимых данных.

Анализ традиционных аппроксимационных схем выявил ограниченность линейных моделей: конформное преобразование Гельмерта (4 параметра) и аффинная модель (6 параметров) обеспечили сопоставимые значения совмещённой плановой погрешности $RMSE_{comb} \approx 0,248$ м и $\approx 0,247$ м соответственно. Билинейная модель дала улучшение до $\approx 0,206$ м.

Максимальная точность достигнута при использовании общей полиномиальной модели 2-го порядка: $RMSE_X \approx 0,081$ м, $RMSE_Y \approx 0,126$ м, $RMSE_{comb} \approx 0,106$ м при достаточной избыточности (DOF = 12). Полученный результат согласуется с предположением о плавной слабонелинейности преобразования в пределах выпуклой оболочки опорных пунктов. Переход к полиномиальной модели 3-го порядка не дал

дополнительного улучшения по совмещённой метрике ($\approx 0,114$ м) и сопровождался резким снижением степеней свободы ($\text{DOF} = 4$) и ухудшением точности по оси Y, что методически понимании считается как переобучение.

Из конформных подходов полиномиально-конформная модель 2-го порядка демонстрирует сбалансированное соотношение «точность/свойства геометрии»: $\text{RMSE}_{\text{comb}} \approx 0,119$ м при углосохранении и умеренной сложности параметризации. Повышение порядка до 3-го приводит к ухудшению метрик ($\approx 0,137$ м, меньшие DOF) и для объёма доступной опоры рассматривается как избыточное.

Учитывая результаты преобразования моделей, можно вынести рекомендации: для задач, где конформность не обязательна, возможно применение полиномиальной модели 2-го порядка как обеспечивающей минимальную плановую погрешность ($\text{RMSE}_{\text{comb}} \approx 0,106$ м). При обязательном условии сохранении углов целесообразна полиномиально-конформная модель 2-го порядка ($\approx 0,119$ м). Область достоверности параметров ограничена расстоянием от использованных пунктов; применение вне пределов допустимо только после отдельной оценки погрешности. Для достижения требования по точности $\leq 0,05$ м требуются дополнительные организационно-технические и методические действия, направленные на снижение систематических составляющих и повышение устойчивости оценивания параметров модели.

5 ПОСТРОЕНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ГЕОИДА ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА АЛМАТЫ

5.1 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:

$$N = \frac{R}{4\pi\gamma} \iint_{\sigma} S(\psi) \Delta g d\sigma \quad (5.1.1)$$

где R – средний радиус Земли, ψ – геоцентрический угол, Δg – гравитационная аномалия, d – бесконечно малый элемент поверхности единичной сферы, – 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:

$$S(\psi) = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{2n+1}{n-1} P_n(\cos\psi) \quad (5.1.2)$$

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 [90]. 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 [91] 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.

5.2 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 Съёбергом с 1984 годам [92, 93, 94, 95]. 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 [96]. В другом исследовании метод КТН использовался для определения геоида в Польше, также применяя LSMSA с добавочными коррекциями для вычисления новой гравиметрической модели геоида [97]. Кроме того, метод КТН использовался в исследовании, посвященном определению геоида для территории Ирана, хотя основной упомянутой методикой был метод Молоденского [98]. 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 [99]. Также метод КТН использовался для локального определения геоида, комбинируя сферические гармонические коэффициенты, аномалии гравитации и топографические данные для достижения высокой точности в Эфиопии, Швеции, странах Балтики [100] и Иране [101] 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 предоставляет приблизительную высоту геоида $\bar{N}$:

$$\bar{N} = \frac{c}{2\pi} \iint_{\sigma_0} S^L(\psi) \Delta g d\sigma + c \sum_{n=2}^M b_n \Delta g_n^{GGM} \quad (5.2.1)$$

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:

$$S^L(\psi) = S(\psi) - \sum_{n=2}^L \frac{2n+1}{2} s_n P_n(\cos \psi) \quad L \geq M \quad (5.2.2)$$

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

$$b_n = (Q_n^L + s_n^*) \frac{c_n}{c_n + d c_n} \quad for \quad 2 \leq n \leq M \quad (5.2.3)$$

Коэффициенты усечения, далее выражаются как:

$$Q_n^L = Q_n - \sum_{k=2}^L \frac{2k+1}{2} s_k e_{nk} \quad (5.2.4)$$

где Q_n — коэффициенты усечения Молоденского:

$$Q_n = \int_{\psi_n}^{\pi} S(\psi) P_n(\cos \psi) \sin(\psi) d\psi \quad (5.2.5)$$

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

$$e_{nk}(\psi_0) = \int_{\psi_n}^{\pi} P_n(\cos \psi) P_k(\cos \psi) \sin(\psi) d\psi \quad (5.2.6)$$

Аномалия силы тяжести ГГМ:

$$\Delta g_n^{GGM} = \frac{GM}{a^2} \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} (n-1) \sum_{m=-n}^n c_{nm} Y_{nm}(\bar{\phi}, \lambda) \quad (5.2.7)$$

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 [102]:

$$\bar{N} = c \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{2}{n-1} - Q_n^L - S_n^* \right) (\Delta g_n + \epsilon_n^T) + c \sum_{n=2}^M (Q_n^L + S_n^*) (\Delta g_n + \epsilon_n^S) \quad (5.2.8)$$

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

Параметры модификации:

$$s_n^* = \begin{cases} s_n & \text{if } 2 \leq n \leq L \\ 0 & n > L \end{cases} \quad (5.2.9)$$

«Истинная» геоидальная высота на основе спектральной формы N :

$$N = c \sum_{n=2}^{\infty} \frac{2\Delta g_n}{n-1} \quad (5.2.10)$$

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

$$m_{\tilde{N}}^2 = E \left\{ \frac{1}{4\pi} \iint_{\sigma} (\tilde{N} - N)^2 d\sigma \right\} \quad (5.2.11)$$

или

$$m_{\tilde{N}}^2 = c^2 \left\{ \sum_{n=2}^M (b_n^2 dc_n) + \sum_{n=2}^{\infty} [b_n^* - Q_n^L(\psi_0) - s_n^*]^2 c_n + \sum_{n=2}^{\infty} \left[\frac{2}{n-1} - Q_n^L(\psi_0) - s_n^* \right]^2 \sigma_n^2 \right\} \quad (5.2.12)$$

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.

$$b_n^* = \begin{cases} b_n & \text{if } 2 \leq n \leq L \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.2.13)$$

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

$$c_n = \frac{1}{4\pi} \iint_{\sigma} \Delta g_n^2 d\sigma \quad (5.2.14)$$

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

$$\sigma_n^2 = E \left\{ \frac{1}{4\pi} \iint_{\sigma} (\varepsilon_n^T)^2 d\sigma \right\} \quad (5.2.15)$$

$$ddc_n = E \left\{ \frac{1}{4\pi} \iint_{\sigma} (\varepsilon_n^S)^2 d\sigma \right\} \quad (5.2.16)$$

где ε_n^T — спектральная ошибка наземных гравитационных аномалий;

ε_n^S — спектральная ошибка спутниковых 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 (5.2.12) по s_n . Результат дифференцирования затем приравнивается к нулю и параметры

модификации s_n разрешаются методом наименьших квадратов, образуя системы линейных уравнений [101]:

$$\sum_{r=2}^L a_{kr} s_r = h_k, \quad k = 2, 3, \dots, L \quad (5.2.17)$$

где a_{kr}, h_k – коэффициенты модификации.

$$a_{kr} = d_k \delta_{kr} - \frac{2r+1}{2} d_k e_{kr} - \frac{2k+1}{2} d_k e_{kr} + \frac{2k+1}{2} \frac{2r+1}{2} \sum_{n=2}^{\infty} e_{nk} e_{nr} d_n \quad (5.2.18)$$

$$h_k = \frac{2\sigma_k^2}{k-1} - Q_k d_k + \frac{2k+1}{2} \sum_{n=2}^{\infty} \left(Q_n e_{nk} d_n - \frac{2}{n-1} e_{nk} \sigma_n^2 \right) \quad (5.2.19)$$

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 (5.2.18) предполагает инверсию матрицы $matrix = [a_{kr}]$, что становится плохим условием с увеличением размера L . Это требует применения математических регуляризаций процедуры. Исследования, сделанные А.Эллман [101] и Агрэн [103], 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 5.2.1. [104].

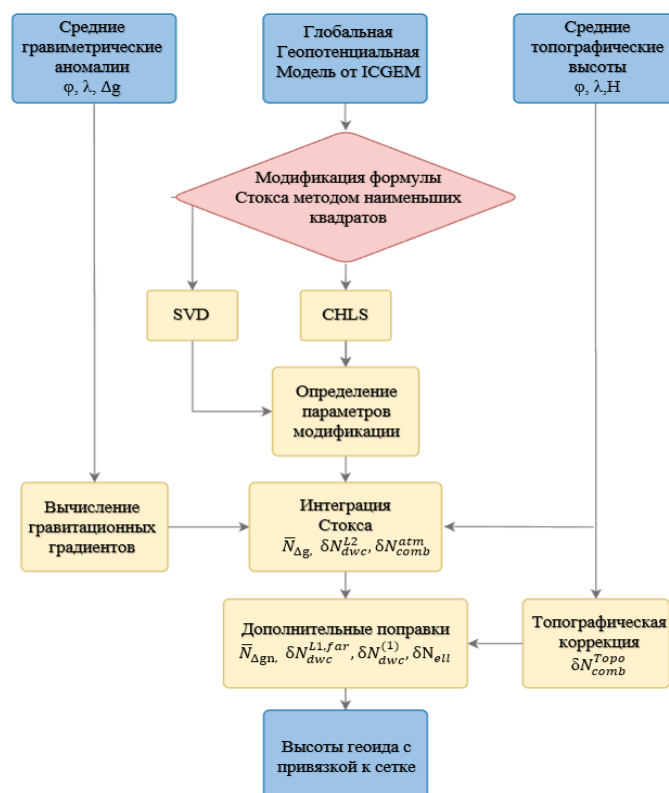


Рисунок 5.2.1 - Блок-схема алгоритма вычисления [104]

Расчеты модели геоида включали использование коэффициентов сферических гармоник XGM2019 до степеней 120, 200, 300, 400, 500, 630, 760 с комбинацией дисперсии ошибок наземных гравиметрических данных $C(0)$ - 0.5, 1, 3, 6, 9, 16 мГал². Результаты представлены в таблице 5.2.1, рисунок 5.2.2.

Таблица 5.2.1 Статистика подбора комбинации коэффициентов сферических гармоник с дисперсией ошибок наземных гравиметрических данных

	C(0), мГал ² .									
	16		9		6		3		1	
Mmax	STD, м	RMSE, м	STD, м	RMSE, м	STD, м	RMSE, м	STD, м	RMSE, м	STD, м	RMSE, м
760	0,1380	0,5744	0,1100	0,4682	0,0916	0,4038	0,0668	0,3141	0,0470	0,1967
630	0,1085	0,3899	0,0860	0,3525	0,0719	0,3217	0,0539	0,267	0,0414	0,1721
500			0,0595	0,2444	0,0492	0,2218	0,0409	0,1883	0,0377	0,1184
400							0,0404	0,1528	0,0407	0,0655
300									0,0439	0,0455
200									0,0446	0,7003
180									0,0502	0,7990

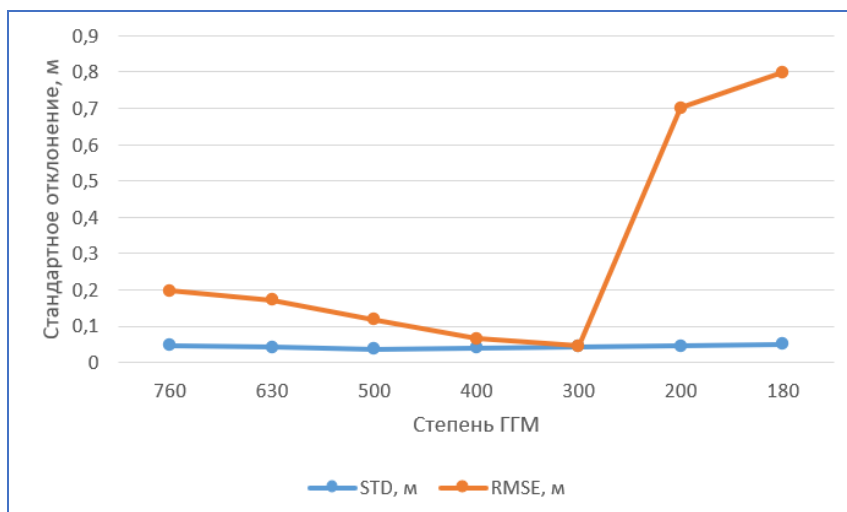


Рисунок 5.2.2 - График изменения статистики с уменьшением степени ГГМ с дисперсией ошибок наземных гравиметрических данных $C(0)=1 \text{ мГал}^2$

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:

$$\bar{N}_1 = \frac{c}{2\pi} \int_{\sigma_0} S^L(\psi) \Delta g d\sigma \quad (5.2.20)$$

Для определения длинноволнового компонента был использован второй член уравнения (5.2.1):

$$\bar{N}_2 = c \sum_{n=2}^M b_n \Delta g_n^{GGM} \quad (5.2.21)$$

Для моделирования предварительной модели высот геоида коротковолновой $\bar{N}_1$ и длинноволновой $\bar{N}_2$ компоненты были объединены (Рисунок 5.2.3).

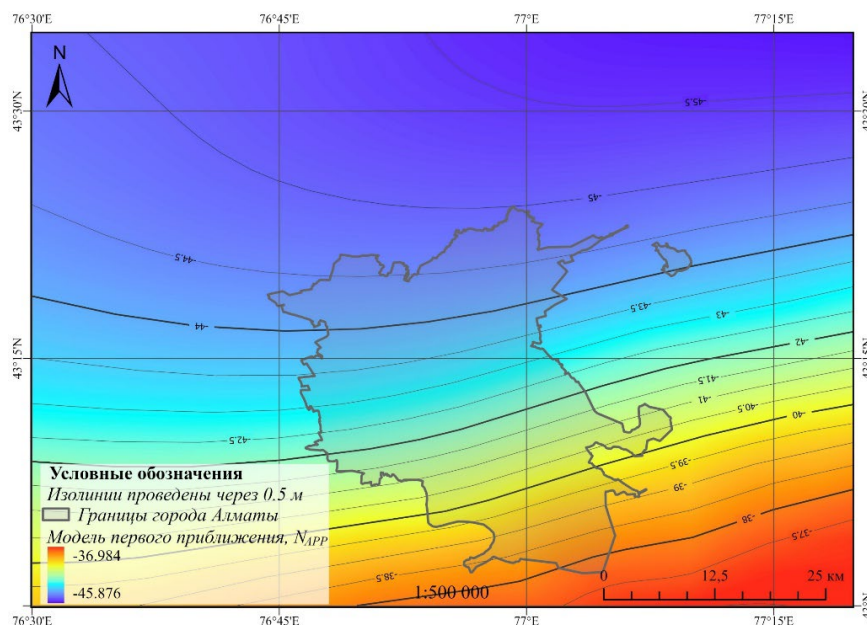


Рисунок 5.2.3 – Приблизительные высоты геоида без учета поправок Napp, м

Для вычисления геоида по формуле Стокса 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) [105]. Вычислительная процедура высот геоида может быть обобщена следующей формулой:

$$\tilde{N} = \tilde{N}^0 + N_{comb}^{Toro} + N_{DWC} + N_{comb}^a + N_e \quad (5.2.22)$$

где δN_{comb}^{Toro} – 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 приближительным значениям высот геоида следующим образом:

$$\delta N_{comb}^{Toro} = \delta N_{dir} + \delta N_{indir} = -\frac{2\pi G \rho}{\gamma} \left[H^2 + \frac{2}{3R} H^3 \right] \quad (5.2.23)$$

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 [103]:

$$N_{DWC}(P) = N_{DWC}^{(1)}(P) + N_{DWC}^{L1, Far} + N_{DWC}^{L2}(P) \quad (5.2.24)$$

где

$$\delta N_{DWC}^{(1)} = H_P \left(\frac{\Delta g(P)}{\gamma} + 3 \frac{N_P^0}{r_P} - \frac{1}{2\gamma} \frac{\partial \Delta g}{\partial r} \Big|_P H_P \right) \quad (5.2.25)$$

и

$$\delta N_{DWC}^{L1, Far} = c \sum_{n=2}^M (S_n^* + Q_n^L) \left[\left(\frac{R}{r_P} \right)^{n+2} - 1 \right] \Delta g_n(P) \quad (5.2.26)$$

и

$$\delta N_{DWC}^{L2} = \frac{c}{2\pi} \iint_{\sigma_0} S_L(\psi) \left(\frac{\partial \Delta g}{\partial r} \right) (H_P - H_Q) d\sigma_Q \quad (5.2.27)$$

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:

$$\left. \frac{\partial \Delta g}{\partial r} \right|_P = \frac{R^2}{2\pi} \iint_{\sigma_0} \frac{\Delta g_Q - \Delta g_P}{l_0^3} d\sigma_Q - \frac{2}{R} \Delta g(P) \quad (5.2.28)$$

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 [106, 107]. При точном определении геоида это сферическое приближение должно учитываться некоторым поправочным коэффициентом (эллипсоидальной поправкой):

$$\delta N_s(P) = \frac{R}{2\gamma} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{2}{n-1} - s_n^* - Q_n^L \right) \left(\frac{\alpha-R}{R} \Delta \tilde{g}_n^{EGM}(P) + \frac{\alpha}{R} (\delta g_s)_n \right) \quad (5.2.29)$$

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

$$(\delta g_s)_n = \frac{e^2}{2\alpha} \sum_{m=-n}^n \{ [3 - (n+2)F_{nm}] T_{nm} - (n+1)G_{nm} T_{n-2,m} - (n+7)E_{nm} T_{n+2,m} \} Y_{nm}(P) \quad (5.2.30)$$

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 [108]. В схеме LSMSA комбинированный атмосферный эффект можно аппроксимировать до порядка N с помощью [109]

$$\delta N_{comb}^a(P) = -\frac{2\pi R \rho_0}{\gamma} \sum_{n=2}^M \left(\frac{2}{n-1} - s_n - Q_n^L \right) H_n(P) - \frac{2\pi R \rho_0}{\gamma} \sum_{n=M+1}^{\infty} \left(\frac{2}{n-1} - \frac{n+2}{2n+1} Q_n^L \right) H_n(P) \quad (5.2.31)$$

где ρ_0 — плотность атмосферы на уровне моря, H_n — гармоника Лапласа степени n для топографической высоты. Высота N произвольной степени v может быть представлена любой точкой на поверхности с широтой и долготой (ϕ, λ),

$$H^V(\varphi, \lambda) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=-n}^n H_{nm}^V Y_{nm}(\varphi, \lambda) \quad (5.2.32)$$

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

$$H_{nm}^V = \frac{1}{4\pi} \iint_{\sigma} H^V(\varphi, \lambda) Y_{nm}(\varphi, \lambda) d\sigma \quad (5.2.33)$$

Результаты вычисления поправочных коэффициентов приведены на рисунке 5.2.4.

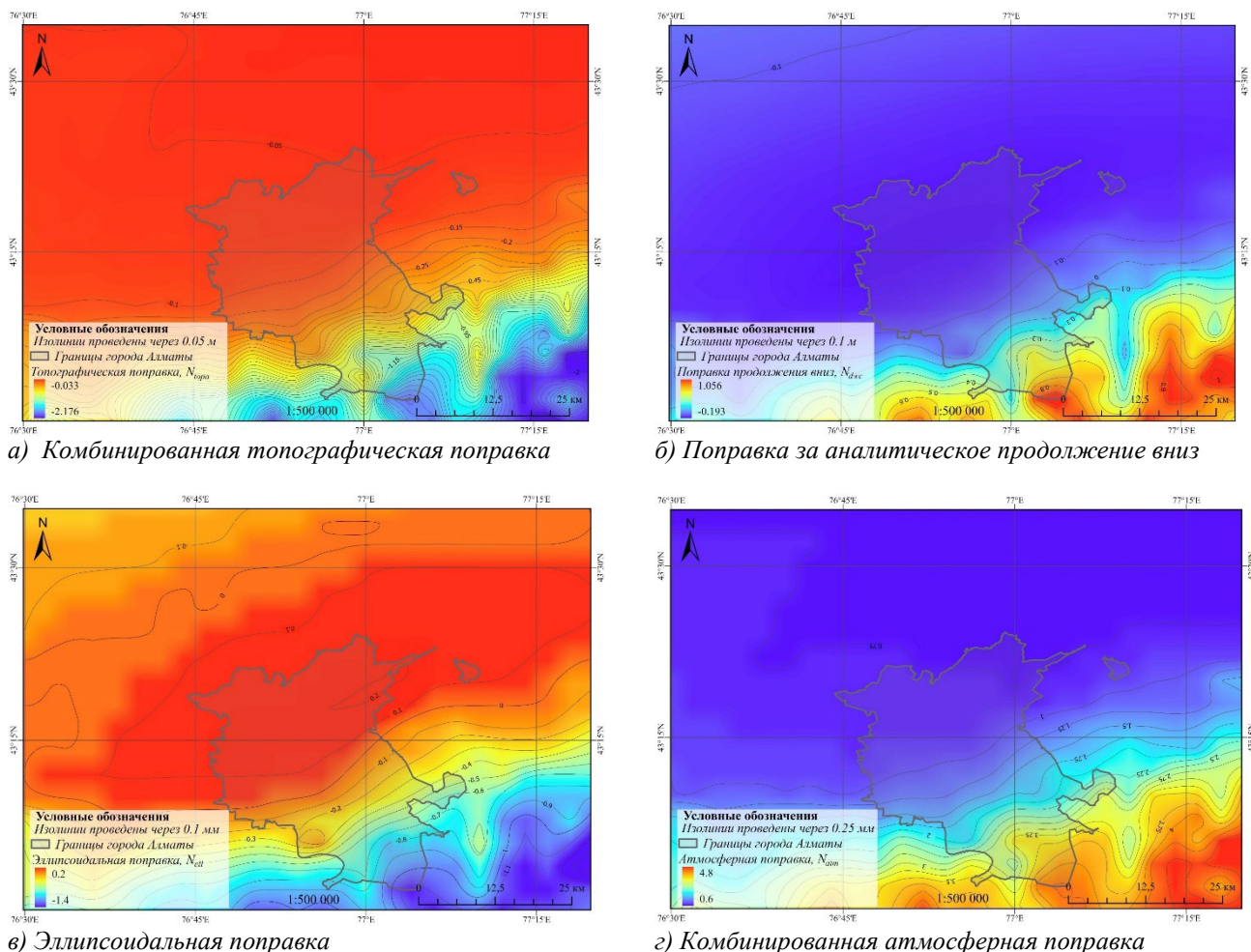


Рисунок 5.2.4 - Поправки к приблизительным высотам геоида с использованием

а) топографическая поправка, м б) поправка за аналитическое продолжения, м
вниз, в) эллипсоидальная поправка, мм г) атмосферная поправка, мм

Топографическая коррекция показана на рисунке 5.2.4 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 5.2.4 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 5.2.4в)). 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 5.2.4 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.

На рисунке 5.2.5 представлен результат расчетов высот геоида на территорию исследования по методу «Модификации формулы Стокса методом наименьших квадратов с добавочными поправками (LSMSA)».

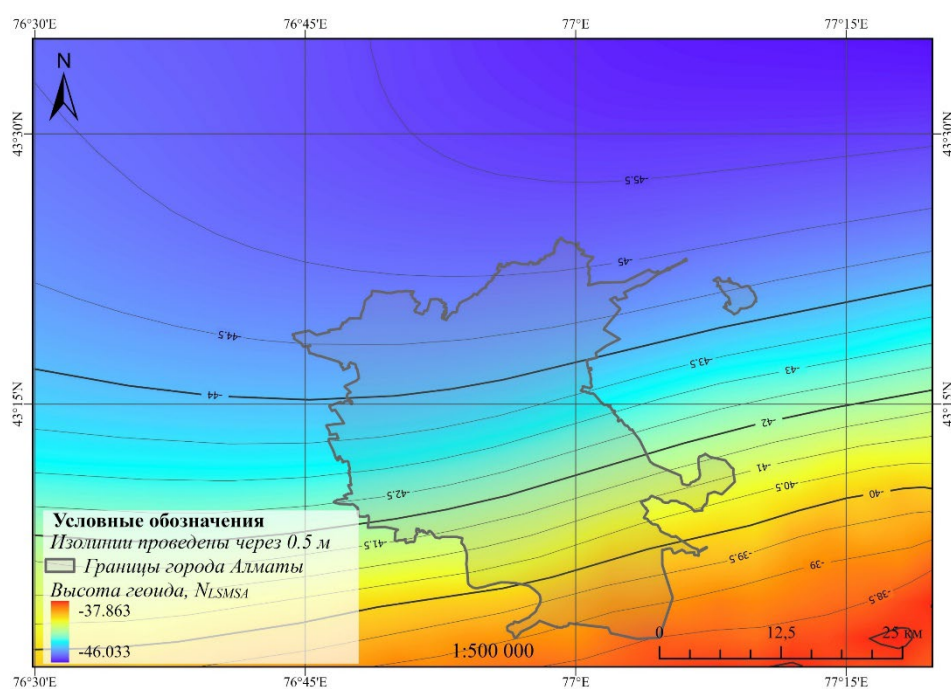


Рисунок 5.2.5 – Высота геоида по методу Модификации формулы Стокса методом наименьших квадратов N_{LSMS} , м

Вычисленные высоты геоида на тестовом участке по методу LSMSA варьируется в диапазоне от - 46.033 м до - 37.863 м, среднее значение составляет - 42.493м.

5.3. Результаты построения геоида и оценка точности

Гравиметрические модели геоида были рассчитаны для исследуемого региона, ограниченного координатами 43° и $43,58^{\circ}$ северной широты, $76,5^{\circ}$ и $77,33^{\circ}$ 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 была

разработана три модели геоида: N_{LSMS} , с использованием сферических гармонических коэффициентов геопотенциальной модели XGM2019e, цифровой модели рельефа GLO-30 и 8571 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, аномалии высот $\zeta_{GNSS/Lev}$ были пересчитаны в высоты геоида $N_{GNSS/Lev}$ в соответствии с методикой пересчета, изложенной в работе Хейсканена и Морица [110]. Согласно Хейсканену и Морицу, аномалия высоты ζ и высота геоида N связаны соотношением:

$$\zeta - N = H^y - H = -\frac{\bar{g} - \bar{\gamma}}{\bar{\gamma}} H^o \quad (5.3.1)$$

где H^o и H^y — нормальная и ортометрическая 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 [111,112], поэтому разницу между квазигеоидом и геоидом можно вычислить, приблизив этот член простой аномалией силы тяжести Буге (Δg_B) в точке вычисления таким образом, что:

$$\zeta - N = H^y - H = -\frac{\Delta g_B}{\gamma_0} H \quad (5.3.2)$$

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 разработанной модели была оценена через интерполяцию высот геоида на контрольные 10 точек ГНСС/Нивелирования, приведенных в рисунке 5.3.1.

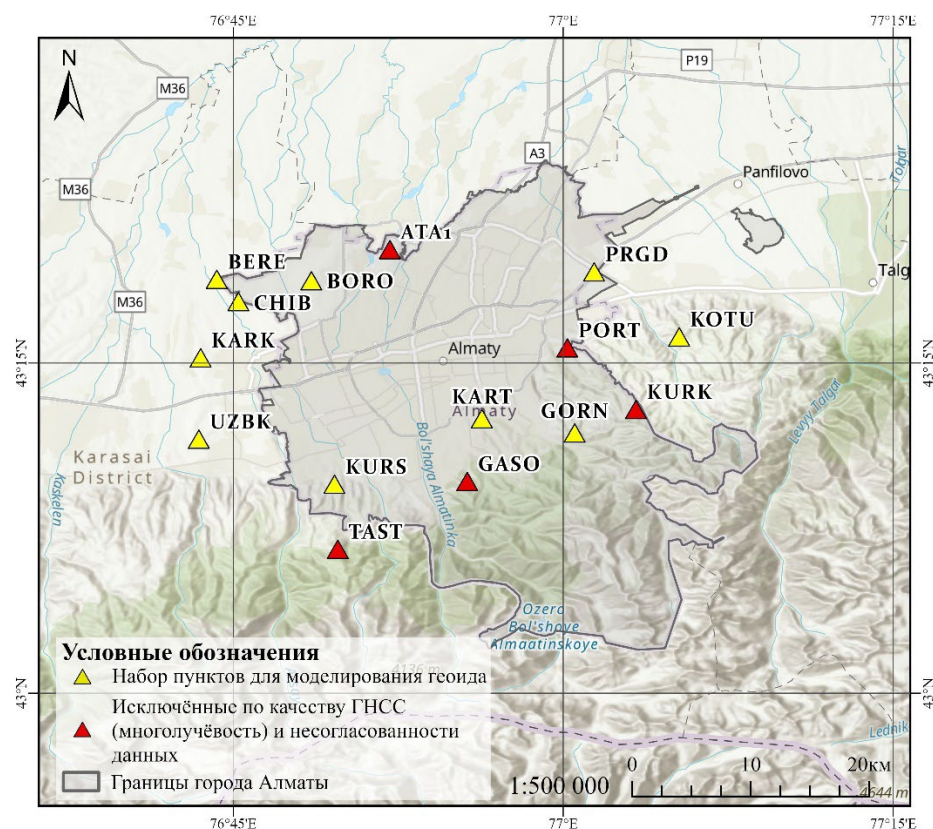


Рисунок 5.3.1 – Контрольные пункты

Для оценки ошибок моделей в контрольных точках использовались различия между высотами геоида, полученными из модели (N_{geoid}), и высотами, измеренными методом ГНСС/нивелирования ($N_{\text{GNSS/Lev}}$). 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 моделью геоида и высотами геоида, полученными с помощью ГНСС/Нивелирования в точках наблюдения:

$$N_{\text{GNSS/Lev}} - N_{\text{model}} - \varepsilon = x_1 + x_2 \cos \varphi \cos \lambda + x_3 \cos \varphi \sin \lambda + x_4 \sin \varphi \quad (5.3.3)$$

где x_1 , x_2 , x_3 и x_4 - четыре параметра, φ — широта, λ — долгота. Статистика отклонений представлена в таблице 5.3.1.

Таблица 5.3.1. - Статистика различий между высотами геоида по данным GNSS/нивелирования и значениями, рассчитанными по локальной модели LSMSA и глобальным геопотенциальным моделям (EGM2008, XGM2019e_2159)

Метод	Min, м	Max, м	Mean, м	STD, м	RMSE, м
N _{LSMSA}	-0,1263	0,0310	-0,0184	0,0439	0,0455
N _{EGM2008}	-0,0286	0,3591	0,1648	0,1242	0,2026
N _{XGM2019e_2159}	-0,3495	-0,0354	-0,1505	0,1042	0,1801

Сравнение статистик отклонений показывает, что разработанная модель N_{LSMSA} демонстрирует наилучшие характеристики по всем метрикам точности. Значения среднеквадратической ошибки (RMSE = 0,0455 м) и стандартного отклонения (STD = 0,0439 м) подтверждают высокую согласованность модели с независимыми данными GNSS/нивелирования. Среднее смещение составляет всего –0,0184 м, что свидетельствует об отсутствии выраженной систематической ошибки (Рисунок 5.3.2).

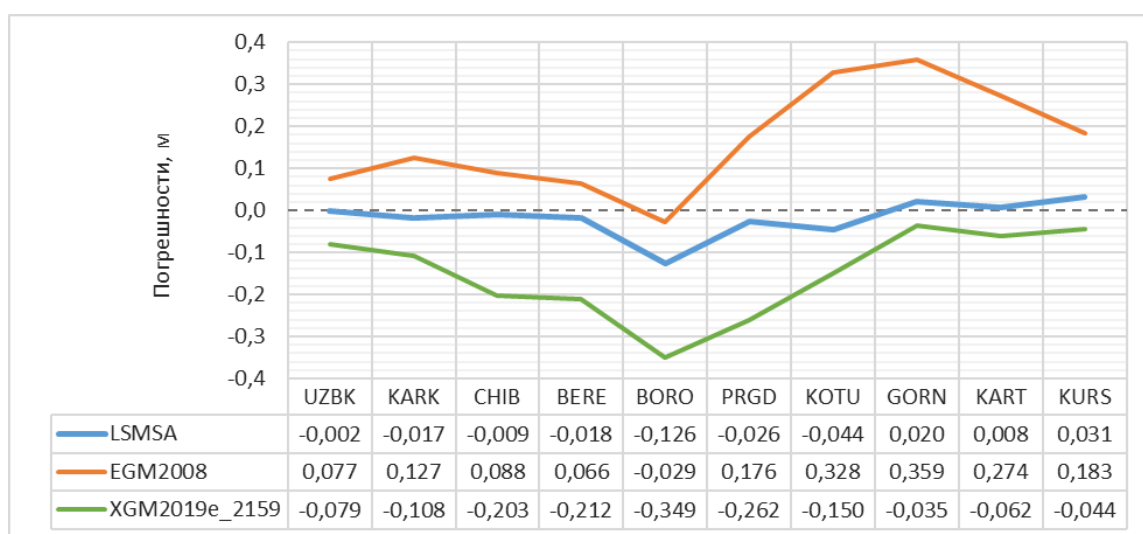


Рисунок 5.3.2 – Погрешности локальной модели LSMSA и глобальных моделей EGM2008, XGM2019e_2159

Для модели EGM2008, несмотря на ее широкое применение в инженерной практике Казахстана, характерно заметное положительное смещение (Mean = +0,1648 м) и значительно худшие показатели точности (RMSE = 0,2026 м). Это указывает на ограниченную применимость данной глобальной модели в условиях сложного рельефа региона.

Модель XGM2019e_2159, обладающая более современными спутниковыми данными, показывает отрицательное смещение ($-0,1505$ м) и $RMSE = 0,1801$ м, что также существенно уступает локально построенной модели NLSMSA.

5.4. Выводы по главе 5

В главе проведено обоснование выбора метода построения локальной модели геоида. Показано, что метод LSMSA (Least-Squares Modification of Stokes' Formula with Additive corrections) является наиболее подходящим для условий Алматы, так как позволяет интегрировать данные разной природы — наземные гравиметрические измерения, глобальные геопотенциальные модели и цифровые модели рельефа.

Выполнена реализация алгоритма построения локальной модели геоида по методу LSMSA с использованием коэффициентов сферических гармоник глобальной модели XGM2019e, цифровой модели рельефа GLO-30 и более 8 тыс. пунктов наземных гравиметрических данных. В расчетную схему включены обязательные коррекции: топографическая, атмосферная, продолжения вниз (DWC) и эллипсоидальная. Их учет позволил снизить систематические ошибки и повысить согласованность модели с геодезическими наблюдениями.

Результаты вычислений показали, что высоты геоида в пределах тестового участка изменяются от -46.033 м до -37.863 м, при среднем значении -42.493 м. Эти значения согласуются с особенностями геофизического строения региона и подтверждают корректность выбранной методики.

Для оценки точности локальной модели геоида проведено сравнение с независимыми данными GNSS/нивелирования. Разработанная модель NLSMSA показала высокую точность: $RMSE = 0,0455$ м и $STD = 0,0439$ м. Для сравнения: глобальная модель EGM2008 имеет $RMSE = 0,2026$ м, а современная XGM2019e_2159 - $RMSE = 0,1801$ м. Таким образом, локальная модель превосходит глобальные решения по всем метрикам качества.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности метода LSMSA для построения локальных моделей геоида в условиях сложного рельефа и гравиметрической неоднородности. Локальная модель для Алматы может быть использована как надежная опорная поверхность для преобразования ГНСС-высот в нормальные высоты, что особенно важно в контексте модернизации государственной высотной системы Казахстана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

В ходе работы были протестированы различные методы трансформации координат, включая преобразование Гельмерта, аффинный, билинейный, полиномиальный второго и третьего порядка, а также конформное полиномиальное преобразования. Оценка показала, что наилучший результат обеспечивает общая полиномиальная модель второго порядка. При достаточной избыточности уравнивания ($\text{DOF} = 12$) она даёт $\text{RMSE}_X \approx 0,081$ м, $\text{RMSE}_Y \approx 0,126$ м и совмещённую ошибку $\text{RMSE}_{\text{comb}} \approx 0,106$ м. Такой уровень согласуется с изначальной гипотезой о плавной, слабо нелинейной природе преобразования в пределах выпуклой оболочки опорных пунктов: глобальная систематика эффективно снимается параметрически, а остаточная вариабельность описывается низкоразрядной нелинейностью без переусложнения модели. Среди конформных подходов наиболее сбалансированным вариантом оказалась полиномиально-конформная модель второго порядка. Она сохраняет углы, остаётся умеренно параметризованной и обеспечивает $\text{RMSE}_{\text{comb}} \approx 0,119$ м. Повышение порядка до третьего, напротив, приводит к деградации метрик ($\sim 0,137$ м) и сокращению степеней свободы, что при наличии ограниченного числа надёжных пунктов признано избыточным. С практической точки зрения это означает следующее. Если углосохранение не является жёстким требованием, целесообразно применять полиномиальную модель второго порядка как минимизирующую плановую погрешность ($\text{RMSE}_{\text{comb}} \approx 0,106$ м). В задачах, где конформность обязательна, предпочтение следует отдавать полиномиально-конформному варианту того же порядка ($\approx 0,119$ м). При этом область надёжной экстраполяции ограничена выпуклой оболочкой использованных пунктов: выход за её пределы допустим лишь после отдельной валидации. Для достижения целевого порога точности $\leq 0,05$ м потребуются дополнительный комплекс мер - от повышения качества исходных данных и уплотнения опорной сети в критических зонах до подавления локальных систематик и применения более устойчивых процедур оценивания параметров.

Моделирование локального геоида методом LSMSA продемонстрировало минимальную ошибку ($\text{RMSE} = 0.0455$ м) по сравнению с глобальными моделями, такими как EGM2008 и XGM2019e_2159, 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/P23000000208>
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. Закон РК «О геодезии, картографии и пространственных данных» № 166-VII от 21.12.2022. Adilet
34. Постановление Правительства РК от 14.03.2023 № 208 «Об установлении государственных систем отсчёта и картографических проекций». cis-legislation.com
35. Приказ МЦРИАП РК № 107/НҚ от 27.03.2023 «Инструкция по созданию и развитию государственных геодезических, нивелирных и гравиметрических сетей». Adilet
36. Приказ и.о. МЦРИАП РК № 127/НҚ от 31.03.2023 «Правила отнесения к государственным геодезическим сетям и применения CORS». Adilet
37. GGO: описание QazTRF-23 (эпоха ITRF2014, охват, связь с СК-42). ggo.gov.kz
38. Ведомственные сообщения/СМИ о запуске QazTRF-23 и национальной CORS-сети с 01.01.2025. Sputnik КазахстанНовости Mail
39. Геопортал НИПД (map.gov.kz) — публикация ЕЦКО и ортофотомозаики. gov.kz
40. Методические руководства по трансформациям координат: IOGP 373-7-2; Deakin R.E.
41. Постановление Правительства РК от 14.03.2023 № 208 «Об установлении государственных систем отсчёта и картографических проекций».
42. Приказ МЦРИАП РК от 27.03.2023 № 107/НҚ «Об утверждении Инструкции по созданию и развитию государственных геодезических, нивелирных и гравиметрических сетей».
43. 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.

44. 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.

45. International Terrestrial Reference System and Frame - Wikipedia, accessed May 19, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/International_Terrestrial_Reference_System_and_Frame

46. What is ITRF and ITRS? - Tersus GNSS, accessed May 19, 2025, https://www.tersus-gnss.com/tech_blog/What-is-ITRF-and-ITRS

47. IGS Reference Frames: Status and Future Improvements 1 - National Geodetic Survey, accessed May 19, 2025, <https://www.ngs.noaa.gov/CORS/Articles/igs-refframe.pdf>

48. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling non-linear station motions - ResearchGate, accessed May 19, 2025, https://www.researchgate.net/publication/305416077_ITRF2014_A_new_release_of_the_International_Terrestrial_Reference_Frame_modeling_non-linear_station_motions_ITRF2014

49. Itrf2014 - ITRF, accessed May 19, 2025, <https://itrf.ign.fr/en/solutions/itrf2014>

50. International Terrestrial Reference Frame (ITRF) | Guidance, accessed May 19, 2025, <https://www.linz.govt.nz/guidance/coordinate-systems-used-new-zealand/geodetic-datums/international-terrestrial-reference-frame-itrf>

51. Supporting the ITRF - International GNSS Service, accessed May 19, 2025, <https://igs.org/itrf/>

52. Coordinate Transformation - Scripps Orbit and Permanent Array Center, accessed May 19, 2025, <https://sopac-csrc.ucsd.edu/index.php/coord-transformation/>

53. ANTEX - GSSC, accessed May 19, 2025, <https://gssc.esa.int/education/library/resource-formats/antex/>

54. Reference frames - GAMIT/GLOBK, accessed May 19, 2025, http://geoweb.mit.edu/gg/courses/201807_Bishkek/pdf/41-ref_frames.pdf

55. Reference Manual - GAMIT/GLOBK, accessed May 19, 2025, http://geoweb.mit.edu/gg/docs/GAMIT_Ref.pdf

56. Precision analysis of IGS long baseline Processing based on GAMIT/GLOBK - Coordinates, accessed May 19, 2025, <https://mycoordinates.org/precision-analysis-of-igs-long-baseline-processing-based-on-gamitglobk/>

57. ITRF2014, WGS84 and NAD83 | GEOG 862: GPS and GNSS for Geospatial Professionals, accessed May 19, 2025, <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1804>

58. (PDF) How to use IGS antenna phase center corrections? - ResearchGate, accessed May 19, 2025,

https://www.researchgate.net/publication/242578641_How_to_use_IGS_antenna_phase_center_corrections

59. ITRF2014 - EPSG:9000, accessed May 19, 2025, <https://epsg.io/9000>
60. 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. – Т. 60. – С. 1-4.
61. Исагалиева А.К. Геофизические критерии геодинамического районирования нефтегазоносных районов юга Прикаспийской впадины//Диссертация на соискание степени доктора философии (PhD).— Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева. — Алматы: 2023. — 160 с.
62. Абетов А.Е, Узбеков А.Н. Аномалии гравитационного поля Центрального Казахстана. // Геология и охрана недр. – Алматы. – С. 51–61.
63. Heiskanen W. A., Moritz H. Physical geodesy //Bulletin Géodésique (1946-1975). – 1967. – Т. 86. – №. 1. – С. 491-492.
64. Müller J., Torge W. Geodesy. – De Gruyter., 2012.
65. Jalal, S. J., Musa, T. A., Din, A. H. M., Aris, W. A. W., Shen, W., Pa'suya, M. F. Influencing factors on the accuracy of local geoid model //Geodesy and geodynamics. – 2019. – Т. 10. – №. 6. – С. 439-445.
66. Kiamehr R., Sjöberg L. E. Effect of the SRTM global DEM on the determination of a high-resolution geoid model: a case study in Iran //Journal of Geodesy. – 2005. – Т. 79. – С. 540-551.
67. Polidori L., El Hage M. Digital elevation model quality assessment methods: A critical review //Remote sensing. – 2020. – Т. 12. – №. 21. – С. 3522.
68. Shoganbekova D., Fan H., Pentayev T. Gravimetric geoid model over Kazakhstan //15th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2015. – 2015. – С. 283-290.
69. Kaplan E. D., Hegarty C. (ed.). Understanding GPS/GNSS: principles and applications. – Artech house, 2017.
70. Официальный веб-сайт – International Centre for Global Earth Models (ICGEM) [Электронный ресурс] – URL: <http://icgem.gfz-potsdam.de/home>
71. Официальный веб-сайт – Информационная система «Государственное геодезическое обеспечение» [Электронный ресурс] – URL: <https://ggo.gov.kz/>
72. Li H. et al. Global DEMs vary from one to another: an evaluation of newly released Copernicus, NASA and AW3D30 DEM on selected terrains of China using ICESat-2 altimetry data //International Journal of Digital Earth. – 2022. – Т. 15. – №. 1. – С. 1149-1168.
73. Marsh C. B., Harder P., Pomeroy J. W. Validation of FABDEM, a global bare-earth

elevation model, against UAV-lidar derived elevation in a complex forested mountain catchment //Environmental Research Communications. – 2023. – T. 5. – №. 3. – C. 031009.

74. Liang, W., Li, J., Xu, X., Zhang, S., & Zhao, Y. A high-resolution Earth's gravity field model SGG-UGM-2 from GOCE, GRACE, satellite altimetry, and EGM2008 //Engineering. – 2020. – T. 6. – №. 8. – C. 860-878.

75. Pail R. Space Gravity Missions: CHAMP, GRACE, GRACE-FO, and GOCE, Satellite Projects //Encyclopedia of Geodesy. – Springer International Publishing, 2023. – C. 1-9.

76. Hofmann-Wellenhof B., Moritz H. Physical geodesy. – Springer Science & Business Media, 2005.

77. El Shouny, A., Al-Karagy, E. M., Mohamed, H. F., & Dawod, G. M. Gis-based accuracy assessment of global geopotential models: A case study of Egypt //American Journal of Geographic Information System. – 2018. – T. 7. – №. 4. – C. 118-124.

78. Pham, H. T., Claessens, S., Kuhn, M., & Awange, J. Performance evaluation of high/ultra-high-degree global geopotential models over Vietnam using GNSS/leveling data //Geodesy and Geodynamics. – 2023. – T. 14. – №. 5. – C. 500-512.

79. Deakin, R. E. (2004). Coordinate transformations in surveying and mapping (Technical report). School of Geospatial Science, RMIT University. https://www.mygeodesy.id.au/documents/COTRAN_1.pdf MyGeodesy

80. Gao, Y. (2017). Analysis of coordinate transformation with different polynomial models (Bachelor's thesis, Universität Stuttgart). <https://elib.uni-stuttgart.de/items/27d27e98-4083-4eaa-864c-aa71f86ce783> Электронная библиотека U Stuttgart

81. Ghilani, C. D., & Wolf, P. R. (2010). Adjustment computations: Spatial data analysis (5th ed.). John Wiley & Sons. Wiley

82. Gil, J., & Mrówczyńska, M. (2012). Methods of artificial intelligence used for transforming a system of coordinates. Geodetski list, 66(4), 321–336. <https://hrcak.srce.hr/102917> Hrčak

83. Kohli, A., & Jenni, L. (2008, June). Transformation of cadastral data between geodetic reference frames using finite element method. In FIG Working Week 2008 (Stockholm, Sweden). https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2008/papers/ts02a/ts02a_05_kohli_jenni_2623.pdf FIG

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

85. Mikhail, E. M. (1976). Observations and least squares. IEP – A Dun-Donnelley Publisher. Amazon

86. Öcalan, T. (2019). Investigation on the effects of number of common points in 2D

transformation problem. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 4(2), 58–62.
<https://doi.org/10.26833/ijeg.446962> Dergipark

87. International Association of Oil & Gas Producers (IOGP). (2019). *Geomatics Guidance Note 7, part 2: Coordinate conversions & transformations including formulas* (Report No. 373-7-2).
<https://www.iogp.org/wp-content/uploads/2019/09/373-07-02.pdf> IOGP

88. 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>

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

90. Kaplan E. D., Hegarty C. (ed.). *Understanding GPS/GNSS: principles and applications*. – Artech house, 2017.

91. Майоров А. Н. О выборе преобразования формулы Стокса //Научно-технический сборник по геодезии, аэрокосмическим съемкам и картографии. Физическая геодезия. Москва, ЦНИИГАиК. – 1996.

92. 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.

93. Sjöberg L. E. Refined least squares modification of Stokes' formula //Manuscripta geodaetica. – 1991. – T. 16. – №. 6. – С. 367-375.

94. Sjöberg L. E. A general model for modifying Stokes' formula and its least-squares solution //Journal of geodesy. – 2003. – T. 77. – С. 459-464.

95. Sjöberg L. E. A solution to the downward continuation effect on the geoid determined by Stokes' formula //Journal of geodesy. – 2003. – T. 77. – С. 94-100.

96. Janpaule I. Application of KTH method for determination of latvian geoid model //The International Scientific Conference „Innovative Materials, Structures and Technologies”. – 2014. – С. 64-68.

97. Kuczynska-Siehien 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. – С. 19-26.

98. Abdollahzadeh M., Alamdari M. Application of Molodensky's Method for Precise Determination of Geoid in Iran //Journal of Geodetic Science. – 2011. – T. 1. – №. 3. – С. 259-270.

99. Bae T. S. et al. Update of the precision geoid determination in Korea //Geophysical prospecting. – 2012. – T. 60. – №. 3. – С. 555-571.

100. Ellmann A. The geoid for the Baltic countries determined by the least squares modification of Stokes formula: дис. – Infrastruktur, 2004.
101. 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.
102. 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.
103. Ågren J. Regional geoid determination methods for the era of satellite gravimetry: numerical investigations using synthetic earth gravity models: дис. – Infrastruktur, 2004.
104. 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.
105. 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.
106. 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.
107. 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.
108. Moritz H. Geodetic reference system 1980 //Bulletin Géodésique. – 1992. – T. 66. – №. 2. – C. 187-192.
109. Sjöberg L. E. A discussion on the approximations made in the practical implementation of the remove–compute–restore technique in regional geoid modelling //Journal of Geodesy. – 2005. – T. 78. – C. 645-653.
110. Heiskanen W. A., Moritz H. Physical geodesy //Bulletin Géodésique (1946-1975). – 1967. – T. 86. – №. 1. – C. 491-492.
111. Sjöberg, Lars E.. "On the geoid and orthometric height vs. quasigeoid and normal height" Journal of Geodetic Science, vol. 8, no. 1, 2018, pp. 115-120. <https://doi.org/10.1515/jogs-2018-0011>
112. Sjöberg L. E., 2010, A strict formula for geoid-to-quasigeoid separation. J Geod (2010) 84: 699-702