

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И. Сатпаева»

Горно-металлургический институт имени О.А. Байконурова

Кафедра «Маркшейдерское дело и геодезия»

Куаныш Абдулхак Муратулы

Сравнительный анализ методов построения модели локального геоида

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

6B07303 – Геопространственная цифровая инженерия

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И. Сатпаева»

Горно-металлургический институт имени О.А. Байконурова

Кафедра «Маркшейдерское дело и геодезия»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
НАО «КазНТУ им.К.И.Сатпаева»
Горно-металлургический институт
им. О.А. Байконурова

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой
«Маркшейдерское дело и
геодезия»,
к.т.н., ассист. профессор
Г.Мейрамбек
«04» 06 2025 г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: «Сравнительный анализ методов построения модели локального геоида»

6B07303 – Геопространственная цифровая инженерия

Выполнил

Куаныш А.М.

Рецензент

К.т.н., ассист. проф.-исследователь,

КазНТУ

Кузнецова И. А.
«04» 06 2025 г.

Подпись
заверяю
HR департамент

Кузнецовой И. А.
«04» 06 2025 г.

Научный руководитель
PhD, ассоц. профессор

Кенесбаева А.
«04» 06 2025 г.

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И. Сатпаева»

Горно-металлургический институт имени О.А. Байконурова

Кафедра «Маркшейдерское дело и геодезия»

6B07303 – Геопространственная цифровая инженерия

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
«Маркшейдерское дело и
геодезия»

к.т.н., доцент, профессор

Г. Мейрамбек

«06» 06 2025 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломной работы

Обучающемуся Куаныш Абдулхак Муратулы

Тема: «Сравнительный анализ методов построения модели локального геоида»

Утверждена приказом Проректора по академическим вопросам №26-П/О от 29.01.2025 г.

Срок сдачи законченной работы «30» мая 2025г.

Исходные данные к дипломной работе: Материал, накопленный во время производственной практики, и данные лекций

Краткое содержание дипломной работы:

- Подготовка гравиметрических данных и данные геометрического нивелирования.
- Создание локальной модели геоида геометрическим и гравиметрическим методами.
- Провести сравнительный анализ методов построения локального геоида.

Перечень графического материала: представлены 20 слайдов презентации работы

Рекомендуемая основная литература:

- «Процедура определения локальной Гравиметрического-геометрической модели геоида» Eteje S. O., Oduyebo O. F., Olulade Sunday A.
- Кузьмин В. И. Гравиметрия: учебное пособие. –Новосибирск: СГГА, 2015. –256 с.
- Майоров А.Н. Разработка технологии и создание модели квазигеоида с использованием спутниковых данных: дис. канд. техн.наук. – М., 2008. – 108 с.

ГРАФИК
подготовки дипломной работы

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Общие понятие о моделях геоида	27.02.2025	Примечание нет
Методы вычисления моделей геоида	19.03.2025	Примечание нет
Сравнительный анализ построения локальной модели геоида	09.04.2025	Примечание нет

Подписи
консультантов и норм контролера на законченную дипломную работу с указанием относящихся к ним разделов работы

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф.(уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Общие понятие о моделях геоида	Кенесбаева А. PhD, ассоц.профессор	04.06.25	
Методы вычисления моделей геоида	Кенесбаева А. PhD, ассоц.профессор	04.06.25	
Сравнительный анализ построения локальной модели геоида	Кенесбаева А. PhD, ассоц.профессор	04.06.25	
Норм контролер	Кенесбаева А. PhD, ассоц.профессор	04.06.25	

Научный руководитель

Кенесбаева А.

Задание принял к исполнению обучающийся

Куаныш А.М.

Дата

«05» 06 2025 г

АНДАТПА

Бұл дипломдық жұмыста Алматының геодинамикалық полигоның мысалында локалдық геоид моделін құрудың әртүрлі әдістеріне салыстырмалы талдау жүргізілді. Жұмыста жазасалды— геоид моделін құруда гравиметриялық және геометриялық әдістердің тиімділігін бағалап, нақты жағдайларға сәйкес келетін оңтайлы тәсілді анықтау.

Зерттеу барысында гравиметриялық әдіс Стокс формуласы негізінде аномалиялар өрісін пайдалану арқылы, ал геометриялық әдіс GPS-өлшеулері мен нивелирлік деректерді қолдану арқылы іске асырылды. Алынған нәтижелер Golden Surfer бағдарламасы арқылы визуализацияланып, 3D модельдер жасалды.

Салыстыру нәтижелері екі әдістің де өз артықшылықтары бар екенін көрсетті: гравиметриялық әдіс жоғары дәлдік береді, бірақ көп өлшеу мен күрделі есептеуді талап етеді; ал геометриялық әдіс жылдам және практикалық жағдайда тиімді. Сонымен қатар, EGM2008 сияқты жаһандық геоид модельдерімен алынған нәтижелердің салыстырылуы локалдық модельдердің дұрыстығын растады.

АННОТАЦИЯ

В данной дипломке проведен сравнительный анализ различных методов построения локальной модели геоида на примере Алматинского геодинамического полигона. Целью работы была оценка эффективности гравиметрического и геометрического методов при построении модели геоида и определение оптимального подхода, соответствующего конкретным условиям.

В ходе исследования гравиметрический метод был реализован с использованием формулы Стокса с использованием поля аномалий, а геометрический метод — с использованием данных GPS-измерений и нивелирования. Полученные результаты визуализированы с помощью программы Golden Surfer, созданы 3D-модели.

Результаты сравнения показали, что оба метода имеют свои преимущества: гравиметрический метод обеспечивает высокую точность, но требует большого количества измерений и сложных расчетов; геометрический метод быстр и эффективен в практических условиях. Кроме того, сравнение полученных результатов с глобальными моделями геоида, такими как EGM2008, подтвердило корректность локальных моделей.

ANNOTATION

In this thesis, a comparative analysis of various methods for building a local geoid model using the example of the Almaty geodynamic polygon was conducted. The work aimed to evaluate the effectiveness of gravimetric and geometric methods in building a geoid model and determine the optimal approach that corresponds to specific conditions.

During the study, the gravimetric method was implemented using the Stokes formula using an anomaly field, and the geometric method was implemented using GPS measurements and leveling data. The results obtained were visualized using the Golden Surfer program, and 3D models were created.

The comparison results showed that both methods have their advantages: the gravimetric method provides high accuracy, but requires a large number of measurements and complex calculations; while the geometric method is fast and effective in practical conditions. In addition, a comparison of the results obtained with global geoid models such as EGM2008 confirmed the correctness of the local model

Содержание

Введение	7
1 Общие понятия о моделях геоида	8
1.1 Использование глобальных геоидов	8
1.2 Региональные и локальные модели геоида	9
1.3 Геоидная модель, используемая Казахстаном	12
2 Методы вычисления моделей геоида	15
2.1 Критика классической теории Стокса	15
2.2 Геометрический метод изучения геоида	16
2.3 Разница между геоидом и квазигеоидом	17
2.4 Анализ глобальных моделей геоида от Центра ICGEM	20
3 Сравнительный анализ построения локальной модели геоида	25
3.1 Подготовка исходных данных для расчета для модели геоида	25
3.2 Алматинского ГДП расчет гравиметрическим методом	29
3.3 Алматинского ГДП расчет геометрическим методом	33
Заключение	36
Список используемой литературы	37
Приложение А	38
Приложение Б	39
Приложение В	40

ВВЕДЕНИЕ

Геоид (от греч. *geo* — Земля и *eidos* — форма, вид) представляет собой замкнутую фигуру, совпадающую с одной из уровенных поверхностей гравитационного потенциала и принимаемую в геодезии за среднюю поверхность Мирового океана, продолженную под материковыми территориями. Эта поверхность широко используется в качестве референтной при определении высот.

В современном геодезическом обеспечении ключевым направлением является построение детализированных и точных моделей геоида. Такие модели необходимы для широкого спектра научных и прикладных задач — от топографических съёмок до мониторинга тектонических процессов. Современные достижения в области спутниковой гравиметрии, глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS) и высокоточного нивелирования значительно повысили точность региональных моделей геоида.

Различные подходы к построению геоида отличаются методологией, требуемыми исходными данными и точностью получаемых результатов. Это делает актуальным их сравнительный анализ, особенно в условиях конкретных геодинамических активных регионов, где точность высотных отметок критически важна.

Настоящее исследование направлено на выявление наиболее эффективного метода построения локальной модели геоида, адаптированного к условиям определённой территории. Работа ориентирована на решение прикладных задач в таких сферах, как геодезия, кадастровые работы, инженерные изыскания и геодинамический мониторинг.

Цель исследования — провести сравнительный анализ существующих методов моделирования геоида и определить наиболее рациональный подход для построения высокоточной модели в условиях ограниченного объема и точности исходных данных.

В рамках исследования поставлены следующие задачи: изучить теоретические основы моделирования геоида; проанализировать ключевые методы построения регионального геоида: гравиметрический, геометрический (GPS/нивелирование), спутниковый и комбинированный.

Оценить точность и применимость каждого метода в зависимости от условий и исходной информации. Обосновать выбор оптимального подхода для построения локальной модели геоида.

Полученные результаты могут быть востребованы при выполнении инженерно-геодезических работ, проектировании инфраструктурных объектов, а также для проведения мониторинга современных вертикальных и горизонтальных движений земной поверхности.

1 Общие понятие о моделях геоида

1.1 Использование глобальных геоидов

Глобальные модели геоида имеют ключевую роль в таких как геодезия, навигации и геофизики. Они представляют собой математические модели, описывающие среднюю форму уровня моря с учетом гравитационного поля Земли. Навиационные глобальные геоиды, такие как EGM2008, GOCE, и EIGEN, используются в следующих отраслях: Высотное нормирование и геодезия. Глобальные геоиды позволяют преобразовать эллипсоидные высоты, полученные с помощью GNSS (GPS, ГЛОНАСС, Galileo), в физически обоснованные нормальные высоты. Используются для создания единой высотной системы и корректировки данных нивелирования. Навигация и спутниковые технологий. Улучшение точности навигационных систем, особенно в авиации и морском транспорте. Улучшение точности определения орбит спутников и космических аппаратов. Геофизические исследования Анализ изменений гравитационного поля Земли, связанных с тектоническими процессами и изменениями массы льда. Исследование движения мантийных потоков, влияющих на форму Земли. Наблюдение уровня моря и климата Использование глобальных геоидов для отслеживания изменений уровня океана и влияния глобального потепления. Исследование циркуляции океанов и распределения массы воды.

Современные глобальные геоиды, основанные на спутниковых миссиях (GRACE, GOCE), обеспечивают высокую точность, но требуют комбинирования с региональными данными для детализированной модели рельефа. В настоящее время самым распространенным видом модели глобальных геоидов являются модели, которые представлены в виде набора полностью нормированных коэффициентов C_{nm} , $\bar{S}_{nm}$ разложения потенциала силы тяжести по сферическим функциям. Ондуляцию геоида N в точке со сферическими координатами r , φ , λ можно вычислить по следующей формуле:

$$N = \frac{GM}{ry} \left[1 + \sum_{n=2}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r} \right)^n \bar{P}_{nm}(\sin \varphi) (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \right] \quad (1.1)$$

где r , φ , λ - сферические координатами точки во внешнем гравитационном поле, a - большая полуось эллипсоида $\bar{C}_{nm}$, $\bar{S}_{nm}$ - нормализованные гармонические коэффициентами, $\bar{P}_{nm}(\sin \varphi)$ - нормализованные присоединенные функции Лежандра, связанные с ненормализованными присоединенными функциями Лежандра:

$$\bar{P}_{nm}(\sin \varphi) = \left[\frac{(n-m)!(2n+1)k}{(n+m)!} \right]^{\frac{1}{2}} P_{nm}(\sin \varphi) \quad (1.2)$$

которые выражаются через полиномы Лежандра $P_n(\sin \varphi)$ степени n :

$$P_{nm}(\sin \varphi) = (\cos \varphi)^m \frac{d^m}{d(\sin \varphi)^m} [P_n(\sin \varphi)] \quad (1.3)$$

$$P_{nm}(\sin \varphi) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{d(\sin \varphi)^n} (\sin^2 \varphi - 1)^n \quad (1.4)$$

Нормализованные гармонические коэффициенты $\bar{C}_{nm}$, $\bar{S}_{nm}$ связаны с ненормализованными коэффициентами:

$$\begin{bmatrix} \bar{C}_{nm} \\ \bar{S}_{nm} \end{bmatrix} = \left[\frac{(n+m)!}{(n-m)!(2n+1)k} \right]^{1/2} \begin{bmatrix} C_{nm} \\ S_{nm} \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

Ускорение силы тяжести γ определяется по формуле Сомильяна:

$$a\gamma_e \cos^2 B + b\gamma_p \sin^2 B \quad (1.6)$$

где a и b - большая и малая полуоси эллипсоида,

а γ_e и γ_p - соответственно ускорения силы тяжести на экваторе и на полюсе. С числовыми значениями формула приводится к виду:

$$\gamma = \frac{978032.67714 (1+0.00193185138639 \sin^2 B)}{(1-0.00669437999013 \sin^2 B)^{\frac{1}{2}}} 10^{-5} (\text{мгал}) \quad (1.7)$$

Реализации общеземных систем координат сопровождаются выводом параметров разложения потенциала тяготения и высот геоида над эллипсоидом, соответствующим данной системе координат.

1.2 Региональные и локальные модели геоида

Региональные модели геоида строятся для крупных территорий (например, отдельных стран или континентов) с целью повышения точности определения высот и учета региональных гравитационных аномалий. Они основаны на глобальных моделях гравитационного поля, но дополнены региональными измерениями (гравиметрическими, GPS/нивелирования, спутниковыми, рисунок 1.1). Построение регионального геоида возможно несколькими методами:

Гравиметрический метод. Использует измерения гравитационного ускорения с наземных, воздушных и спутниковых наблюдений. Позволяет моделировать гравитационные аномалии, учитывая строение земной коры. Применяются методы сферических гармоник, коллокации, быстрого преобразования Фурье (FFT).

Геометрический метод (GPS/нивелирование). Заключается в измерении разности между эллипсоидными высотами, полученными с помощью GNSS, и

нормальными высотами, полученными с помощью геометрического нивелирования. Прост в реализации, но требует наличия плотной сети нивелирных пунктов. *Комбинированный метод*. Совмещает гравиметрические данные с GPS/нивелированием. Повышает точность модели за счет коррекции геоидной поверхности на основе полевых измерений. Используются методы статистической обработки, такие как метод коллокации, фильтр Кальмана.

Примеры региональных моделей геоида

-EGG2008 (Европа) – региональная модель геоида для Европы, основанная на данных GOCE и гравиметрических измерениях.

-OSGM15 (Великобритания) – модель, используемая для определения высот в британской системе координат.

-USGG2012 (США) – модель геоида, применяемый для точных геодезических измерений в Северной Америке.

-RGG2017 (Россия) – российская гравиметрическая модель геоида, основанная на данных спутниковых миссий и наземных измерений.

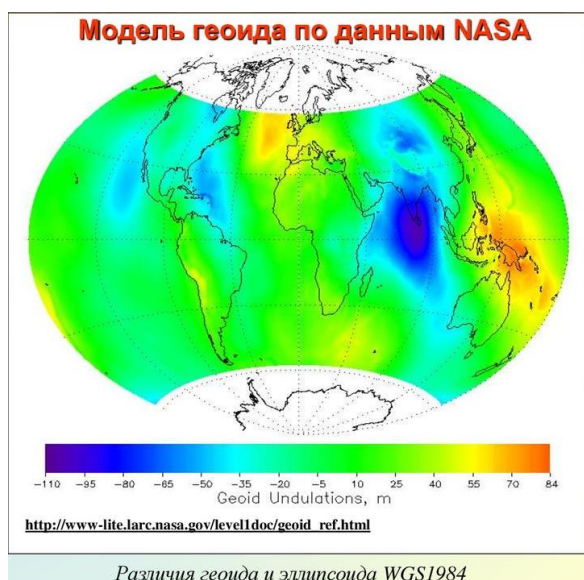


Рисунок 1.1- Модель геоида по данным NASA

Локальные модели геоида предназначены для небольших территорий (от отдельных городов до отдельных инженерных объектов). Они обеспечивают максимальную точность, необходимую для строительства, геодезического мониторинга и кадастровых работ (рисунок 1.2). Методы построения локального геоида: геометрический метод (GPS/нивелирование).

Метод используется для точного определения высотных отметок относительно геоида. Требуется создания плотной сети опорных пунктов с точными высотами. Гравиметрический метод. Применяется для учета локальных аномалий гравитационного поля. Использует высокоточные наземные гравиметрические измерения. Интерполяционные методы (сплайны, метод коллокации). Используются при недостаточности данных и позволяют построить модель геоида на основе ограниченного числа измерений.

-Применение локальных моделей.

-Строительство – корректировка высотных отметок для проектирования инфраструктуры (мостов, тоннелей, плотин). Геодезическое обеспечение кадастровых работ – повышение точности определения высотных координат. Мониторинг осадок и деформаций сооружений – наблюдения за изменением рельефа и конструкций.

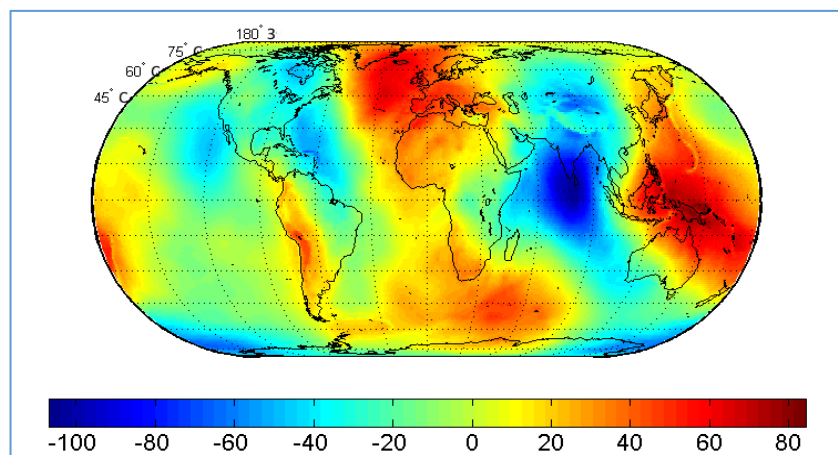


Рисунок 1.2- Волнистость геоида (модель геоида EGM96)

Как известно, ондуляция геоида в региональных моделях геоида представлена в виде значений, которые заданы в узлах регулярной сетки. Данные модели высот создают на базе гравиметрических данных, которые представляют территорию в несколько десятков градусов по широте и долготе с шагом сетки несколько минут. В целях вычисления аномалий высот по региональной модели в исследуемой точке достаточно выбрать значения в близлежащих узлах сетки и произвести интерполирование. В качестве примеров региональных моделей геоида можно привести модели GEOID90, GEOID93, GEOID96, которые были созданы Национальной геодезической службой США на территорию страны и территорию соседних областей.

В качестве локальной модели аномалий высот подразумевается совокупность значений высот (рисунок 1.3), которые определены в итоге сравнения геодезических высот h с нормальными H на пунктах спутниковой сети:

$$N = h - H \quad (1.8)$$

В аномалии высот локального геоида целиком входят ошибки эллипсоидальной высоты исходного пункта ГНСС - сети, которая может достигать нескольких десятков метров. В случаях правильной передачи координат по пунктам сети данная погрешность на всех точках будет постоянной, а превышения высот геоида $\Delta N_{AB} = \Delta h_{AB} - \Delta H_{AB}$ будут иметь высокую точность, что в свою очередь позволит использовать вычисленные значения в целях изучения фигуры Земли.

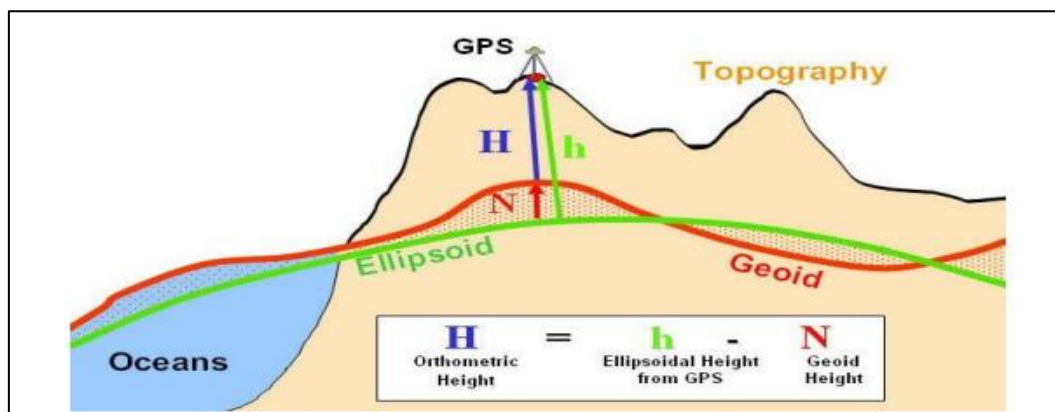


Рисунок 1.3– Соотношение между ортометрическими, геоидными и эллипсоидными высотами

Геометрический метод. В данном методе при наличии четырех и более опорных пунктов с известными нормальными (из нивелирования) и геодезическими (по ГНСС-наблюдениям) высотами образуются разности, для каждой из них может быть составлено выражение вида:

$$N_A(x, y) = Ax + By + Cxy + D \quad (1.9)$$

где x, y - плоские прямоугольные координаты исходных пунктов в местной системе. A, B, C, D - коэффициенты, которые определяются по разностям высот на исходных пунктах.

1.3 Геоидная модель, используемая Казахстаном

Казахстанская гравиметрическая модель геоида (KazGM2015) - Модель высот геоида ограничена параллелями $40 \leq \varphi \leq 56$ и долготами $46 \leq \varphi \leq 88$ на территории Республики Казахстан.

Для расчета гравиметрической модели геоида была выбрана модификация формулы Стокса по методу наименьших квадратов, поскольку она оптимально интегрирует различные наборы данных. Кроме того, метод позволяет вносить дополнительные поправки на рельеф, атмосферу и эллипсоидальную форму Земли. В качестве исходных данных использовались следующие матрицы значений:

- комбинации данных поверхностной гравиметрии и данных GETECH;
- EIGEN - 6C4 Гармоника универсальной гравитационной модели;
- Высоты цифровой модели рельефа SRTM.

Длинноволновой вклад получен из двух моделей геопотенциала: GOCE DIR, EGM2008. SRTM используется для расчета влияния топографии на геоид. Модель Kazgm2015 рассчитана на географической сетке 5'x5' угловых минут в расчетной области, ограниченной 37 и 59 градусами северной широты и 43 и 91

градусом восточной долготы. Высота геоида указывается относительно референц-эллипсоида WGS84. Различия между волной геоида по данным GPS/Leveling и KazGM2015 варьируются от -0,295 м до 0,327 м, а стандартное отклонение составляет 0,177 м.

Исходные параметры для расчета параметров модификации:

- степень изменения $L=M=360$;
- дисперсия погрешностей данных поверхностной гравиметрии составляет $S(0)=9\text{ м}^2$ [Гал]²;
- степень интегрирования $\Psi=3^\circ$.

Данная модель имеет среднеквадратические отклонения (СКО) высот геоида по сравнению с 536 контрольными точками около 3 см по всей территории республики; на севере страны - 2 см, в центре и на юге территории - 6 см. Модель геоида может быть использована для замены технического нивелирования нивелированием GNSS. Кроме того, по разработанным программам можно рассчитать отклонения силы тяжести и высоты геоида от любой ГМ, что дает возможность изучать современные ГГМ. По результатам данной работы даны рекомендации по использованию моделей спутникового геопотенциала, модельных гармонических коэффициентов, данных наземной гравиметрии, данных ГНСС-нивелирования, а также методика комплексирования гравиметрических данных на территориях сопредельных стран и морей. Модель геоида Казахстана была взята с диссертаций Шоганбеков Д.А. (рисунок- 1.4), Как и трехмерная модель геоида Казахстана (рисунок 1.5).

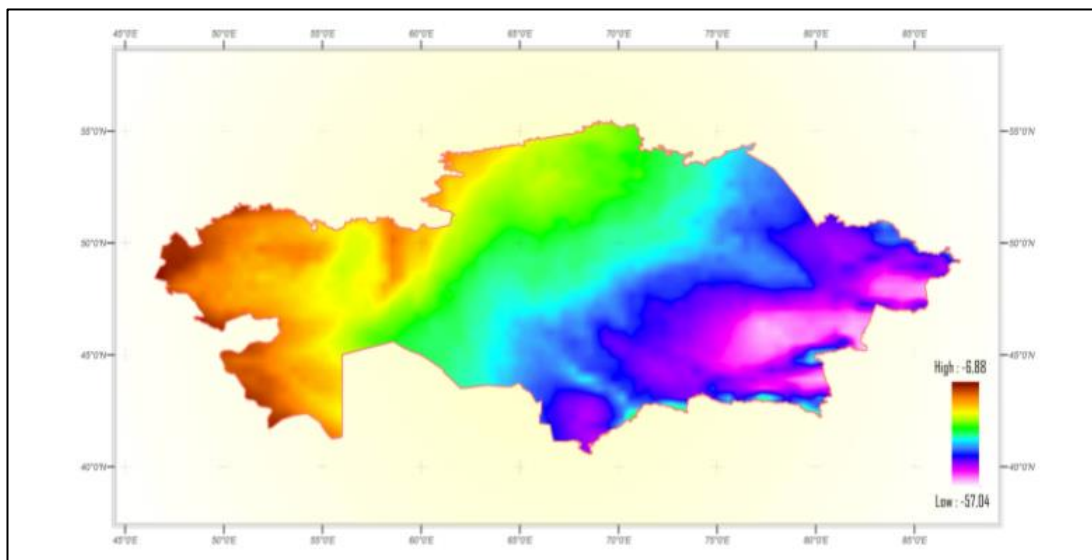


Рисунок 1.4— модель геоида KazGM 2015

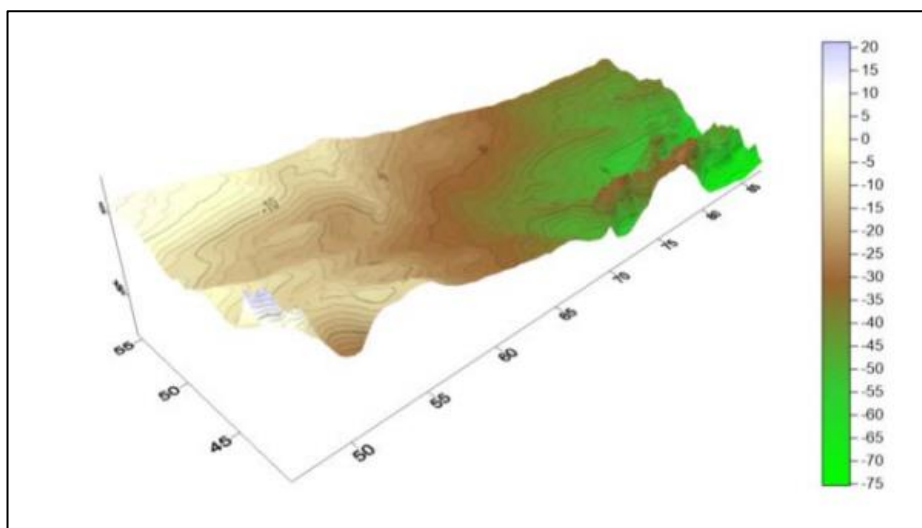


Рисунок 1.5— KazGM2015 трехмерная модель гравиметрического геоида

Альтернативные геоидные модели и подходы, используемые в Казахстане. Глобальные модели, адаптированные для Казахстана:

-EGM2008 (Earth Gravitational Model 2008): Эта глобальная модель геоида, разработанная Национальным агентством геопространственной разведки США (NGA), активно используется в Казахстане для сравнения и проверки локальных моделей. Она имеет высокое разрешение (до $5' \times 5'$) и включает данные спутниковых миссий GRACE, наземной гравиметрии и альтиметрии.

-применение в Казахстане: EGM2008 часто используется в регионах, где локальные данные ограничены, например, в степных или пустынных зонах с низкой плотностью гравиметрических измерений. Модель обеспечивает точность около 10–15 см в равнинных районах Казахстана, но может быть менее точной в горных регионах, таких как Заилийский Алатау.

-XGM2019e: Более новая глобальная модель, разработанная в 2019 году, с разрешением до 2190 степени и порядка. Она интегрирует данные миссий GOCE, GRACE и наземных измерений.

-применение в Казахстане: Используется для уточнения локальных моделей в геодинамически активных зонах, таких как Алматинский регион, где требуется высокая точность для мониторинга тектонических движений. Точность XGM2019e в Казахстане достигает 5–10 см в районах с хорошей гравиметрической сеткой.

2 Методы вычисления моделей геоида

2.1 Критика классической теории Стокса

Формула Стокса дает связь высот геоида над эллипсоидом относимости с аномалиями силы тяжести. Эта формула позволяет по аномалиям силы тяжести, известным на поверхности геоида, определить в любой точке высоту геоида над эллипсоидом. Формула Стокса играет центральную роль в теории фигуры Земли, поскольку определяет геоид, который длительное время считался последним приближением в представлении фигуры Земли. С современной точки зрения, как уже говорилось, геоид не следует рассматривать как последнее и даже как следующее после эллипсоида относимости приближение в представлениях о фигуре Земли, но роль геоида остается по-прежнему центральной — это поверхность, разделяющая Землю на гладкую, геоидальную часть и на неравномерно изменяющийся слой, ограниченный физической поверхностью Земли.

Такое разделение целесообразно для окончательного построения фигуры физической поверхности Земли. Поэтому формула Стокса сохраняет свое центральное значение и в современных условиях.

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 то, что все массы расположены под геоидом. Как известно, измерения гравитационных аномалий проводятся на физической поверхности Земли, которая не совпадает с уровенной поверхностью. Решит данную проблему заключается в том, чтоб в измеренные значения обязыны быть включены поправки, которые должны 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.

-Формула Стокса для геоидных высот N выражается через интеграл:

$$N = \frac{R}{4\pi\gamma} \int \int S(\varphi) \Delta g d\sigma \quad (2.1)$$

R – радиус Земли,

γ – нормальное ускорение свободного падения,

$S(\varphi)$ – ядро Стокса, зависящее от углового расстояния φ ,

Δg – аномалии силы тяжести,

$d\sigma$ – элемент площади интегрирования.

2.2 Геометрический метод изучения геоида

В этом методе различия возникают при наличии четырех и более опорных точек с известными нормальными (по нивелированию) и геодезическими (по наблюдениям ЗНСЖ) высотами, для каждой из которых можно составить выражение следующего вида:

$$NA(x, y) = Ax + By + Cxy + D \quad (2.2)$$

где x, y — плоские прямоугольные координаты начальных точек в местной системе. A, B, C, D — коэффициенты, определяемые разницей высот в начальных точках. После расчета этих коэффициентов аномалию высоты обнаруженной точки можно определить по ее координатам и перевести на нормальную высоту.

Используя геодезические координаты B, L вместо плоских координат X, Y , применяют сложные аппроксимационные выражения, учитывающие не только наклон геоида со многими опорными точками, но и его кривизну. Точность метода может определяться плотностью точек источника, степенью аномалии гравитационного поля и типом интерполянта. При расстоянии между исходными точками 15–20 км погрешность составит 15–20 см в районах средней аномалии и 40–60 см в районах высокой аномалии.

Одной из проблем при использовании региональных и локальных моделей геоида является оценка точности нормализованной высоты. Ошибки модели могут быть в базе данных, алгоритме интерполяции или неверных данных, например, локальные высоты геоида в ячейке сетки могут не отображаться в модели. Чем ближе друг к другу расположены две точки, тем более коррелированными будут ошибки в их геоидных высотах. Две точки, расположенные очень близко друг к другу (например, 1 м), будут иметь коэффициент корреляции 1,0, что означает, что ошибки в их высотах геоида очень тесно связаны друг с другом. С увеличением расстояния погрешности определения высот геоида становятся менее коррелированными, то есть коэффициент корреляции становится равным 0.

Использование искусственных спутников Земли значительно расширило круг задач физической геодезии. За последние десятилетия появились глобальные модели геопотенциала высокого уровня, создание которых стало возможным благодаря внедрению новых методов и подходов измерения.

Геометрический подход к построению геоидной поверхности основан на сравнении геодезических (эллипсоидальных) и нормальных (или ортометрических) высот в известных точках. Суть метода заключается в том, что высота геоида в конкретной точке определяется как разность между геодезической высотой, полученной с помощью глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS), и нормальной высотой, измеренной классическим геометрическим нивелированием.

2.3 Разница между геоидом и квазигеоидом

Определение формы Земли является одной из ключевых задач геодезии, поскольку точное описание её поверхности необходимо для высотных измерений, картографирования и научных исследований. Две основные модели, используемые для описания формы Земли в контексте гравитационного поля, — это геоид и квазигеоид.

Несмотря на схожесть, эти поверхности отличаются по своей природе, методам вычисления и применению в различных высотных системах. Геоид используется для ортометрических высот, тогда как квазигеоид применяется в системах, основанных на нормальных высотах. Различия между этими моделями особенно проявляются в районах с неровным рельефом, например, в горных районах, где плотностные вариации земной коры оказывают значительное влияние на расчёты.

Модели квазигеоида получают различными методами. В гравиметрическом методе искомые высоты квазигеоида определяют путем сочетания вычислений высот по интегральной формуле Стокса в области, обеспеченной гравиметрической съемкой (обычно ограниченной радиусом не более 2 000 км), и использования гармонических коэффициентов геопотенциала (одной из комбинированных моделей гравитационного поля Земли) для учета дальних зон. В настоящее время модели квазигеоида могут быть получены методом спутникового нивелирования, с использованием данных ГНСС-измерений и геометрического нивелирования. Имеющиеся в настоящее время гравиметрические измерения на поверхности Земли способны определять местные волны квазигеоида для участков Земли протяженностью, как правило, не более 1 000 км. Точность превышений высот квазигеоида, определённых методом астрономо-гравиметрического нивелирования в системе координат СК-95, характеризуется средними квадратическими ошибками: 6–9 см на дистанциях 10–20 км и 0,3–0,5 м при расстоянии около 1000 км.

Геоид представляет собой физическую поверхность, которая определяется как средний уровень Мирового океана, продлённый под материками. Эта поверхность является эквипотенциальной относительно гравитационного поля Земли, то есть во всех её точках потенциальная энергия силы тяжести одинакова.

Геоид перпендикулярен направлению силы тяжести в каждой точке, что делает его удобной референтной поверхностью для определения высотных отметок. Все уровенные поверхности гравитационного поля Земли расположены параллельно геоиду, что означает, что он является естественной основой для высотных систем, основанных на измерениях силы тяжести (рисунок 2.1). Основные характеристики геоида: Геоид определяется на основе измерений силы тяжести, что делает его привязанным к гравитационному полю Земли. Высоты относительно геоида называются ортометрическими высотами (Н), которые измеряются с использованием нивелирования и гравиметрических данных. Геоид является основой для традиционных высотных систем, используемых во многих странах мира. Влияние плотностных вариаций внутри

Земли может вызывать локальные отклонения геоида от идеальной эквипотенциальной поверхности.

Методы определения геоида:

- 1) Гравиметрические измерения с применением наземных и спутниковых технологий.
- 2) Спутниковые миссии (GRACE, GOCE), обеспечивающие данные о гравитационном поле Земли.
- 3) Глобальные модели геоида, такие как EGM2008, которые объединяют гравиметрические, спутниковые и нивелирные данные.

Квазигеоид — это поверхность, приближённая к геоиду, но не являющаяся эквипотенциальной. Основное отличие квазигеоида от геоида заключается в том, что он используется в нормальной высотной системе, которая основана на разности потенциалов, а не на измерениях силы тяжести.

Квазигеоид является математической моделью, которая корректируется с учётом вариаций гравитационного поля, но не требует знания плотностного распределения внутри Земли, как это необходимо для расчёта ортометрических высот. Основные характеристики квазигеоида:

- 1) Квазигеоид определяется через разности потенциалов и не является эквипотенциальной поверхностью.
- 2) Высоты, отсчитываемые от квазигеоида, называются нормальными высотами (H^*).
- 3) Квазигеоид удобен в использовании в странах, где применяется нормальная высотная система (например, в России, Швеции, Финляндии и некоторых других странах Европы и Азии).
- 4) В отличие от геоида, квазигеоид проще в вычислении, так как не требует точных гравиметрических данных.

Методы определения квазигеоида: Использование спутниковых данных (например, GNSS/GPS) в сочетании с измерениями гравитации. Геометрические методы (разность эллипсоидальных высот и нормальных высот). Применение цифровых моделей рельефа, что особенно актуально в горных районах.

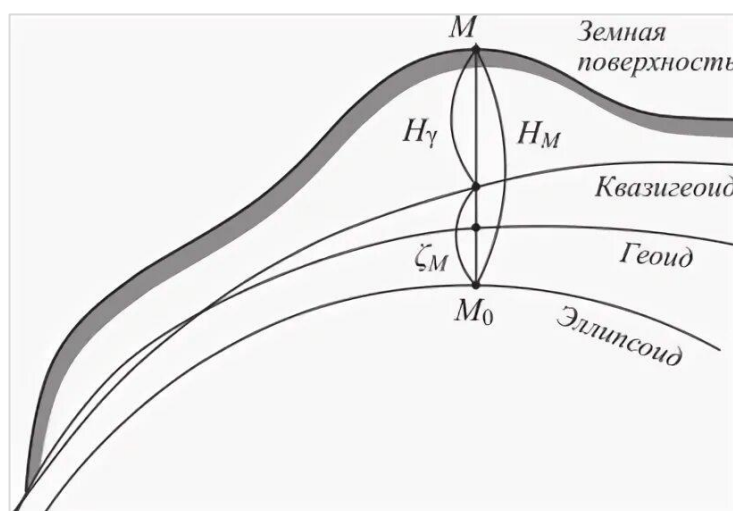


Рисунок 2.1- Геоид и квазигеоид

Ключевые различия между геоидом и квазигеоидом. Разница между этими двумя поверхностями связана с их физическим смыслом, методами расчёта и применением в высотных системах (таблица 1).

Таблица 1- Различия между Геоидом и квазигеоидом

Характеристика	Геоид	Квазигеоид
Связь с высотами	Ортометрическая высота (H)	Нормальная высота (H*)
Физическая природа	Эквипотенциальная поверхность гравитационного поля	Теоретическая поверхность, не являющаяся эквипотенциальной
Метод вычисления	Использует данные о гравитации	Определяется через разности потенциалов
Точность	Высокая в регионах с точными гравиметрическими данными	Предпочтителен в горных районах, где сложно вычислять ортометрические высоты
Использование	Глобальные модели гравитационного поля, средний уровень моря	Высотные системы, основанные на нормальных высотах
Основные методы измерения	Гравиметрия, спутниковые миссии, нивелирование	GNSS-наблюдения, цифровые модели рельефа

Влияние рельефа на различие между геоидом и квазигеоидом

Разница между геоидом и квазигеоидом особенно заметна в районах с пересечённым рельефом, таких как горные районы.

- 1) В низменных и равнинных районах различие между этими двумя поверхностями незначительно (1–2 см).
- 2) В горных регионах, где плотность горных пород и топография оказывают влияние на гравитационное поле, разница между геоидом и квазигеоидом может достигать десятков сантиметров или даже нескольких метров.

Это объясняется тем, что нормальные высоты (используемые для квазигеоида) менее чувствительны к плотностным вариациям земной коры, чем ортометрические высоты, используемые для геоида.

2.4 Анализ глобальных моделей геоида от Центра ICGEM

За последние годы зарубежными специалистами разработан ряд моделей гравитационного поля Земли с улучшенными характеристиками по точности определения коэффициентов гармоник геопотенциала (GGM02Q TIGENGL04C, EIGEN-5C и др.). Результаты работы команды, разрабатывающей новую модель гравитации Земли (EGM2008) — EGM 2160 — были опубликованы на сайте Национального агентства геопространственной разведки (NGA) Министерства обороны США.

Модель EGM2008 включает в себя подробные гравитационные аномалии с разрешением 5х5 минут и использует новейшие спутниковые решения на базе GRACE, включая гравитационные аномалии, полученные с помощью улучшенной альтиметрии PGM2007B и рассчитанные с использованием моделей динамической топографии океана (DOT).

В настоящее время на сайте ICGEM размещено более 180 моделей, и все они доступны в виде нормализованных сферических гармонических коэффициентов в стандартном формате, принятом проектом GOCE Европейского космического агентства в качестве официального формата данных. Международный центр глобальных моделей Земли (ICGEM) сравнил высоты геоида на основе данных нивелирующих моделей в США, Канаде, Европе и Австралии (рисунок-2.2).

Nr	Model	Year	Degree	Data	References	Download	Calculate	Show	DOI
180	WHU-SWPU-GOGR2022S	2023	300	S (Goce), S (Grace)	Zhao, Yongqi et al 2023	gfc zip	Calculate	Show	✓
179	GOSG02S	2023	300	S (Goce)	Xu, Xinyu et al 2023	gfc zip	Calculate	Show	✓
178	Tongji-GMMG2021S	2022	300	S (Goce), S (Grace)	Chen, J. et al, 2022	gfc zip	Calculate	Show	✓
177	SGG-UGM-2	2020	2190	A, EGM2008, S(Goce), S(Grace)	Liang, W. et al, 2020	gfc zip	Calculate	Show	✓
176	XGM2019e_2159	2019	2190 5540 760	A, G, S(GOCO06s), T	Zingerle, P. et al, 2019	gfc zip gfc zip gfc zip	Calculate	Show	✓
175	GO_CONS_GCF_2_TIM_R6e	2019	300	G (Polar), S(Goce)	Zingerle, P. et al, 2019	gfc zip	Calculate	Show	✓
174	ITSG-Grace2018s	2019	200	S(Grace)	Mayer-Gürr, T. et al, 2018	gfc zip	Calculate	Show	✓
173	EIGEN-GRGS.RL04.MEAN-FIELD	2019	300	S	Lemoine, J.M. et al, 2019	gfc zip	Calculate	Show	✓
172	GOCO06s	2019	300	S	Kvas, A. et al, 2021	gfc zip	Calculate	Show	✓
171	GO_CONS_GCF_2_TIM_R6	2019	300	S(Goce)	Brockmann, J. M. et al, 2021	gfc zip	Calculate	Show	✓
170	GO_CONS_GCF_2_DIR_R6	2019	300	S	Bruinsma, S. L. et al, 2014	gfc zip	Calculate	Show	✓
169	IGGT_R1C	2018	240	G, S(Goce), S(Grace)	Lu, B. et al, 2019	gfc zip	Calculate	Show	✓

Рисунок 2.2- Сайт ICGEM 180 моделей

Для исследования были отобраны 15 моделей геопотенциала, разработанных за последние 10 лет (таблица 2).

Таблица 2 – Модели, выбранные для исследования

Номер ICGEM	Модель	Год основания	Самая высокая степень распада	Исходные данные	Сылка
167	WHU-SWPU-GOGR2022S	2023	300	S(Grace,Goce)	Zhao, Yongqi et al 2023
161	GOSG02S	2023	300	S(see model)	Xu, Xinyu et al 2023
154	Tongji-GMMG2021S	2022	2190	S(Goce,Grace,Lageos),G,A	Chen, J. et al, 2022
153	SGG-UGM-2	2020	300	S(Goce,Grace)	Liang, W. et al, 2020
152	XGM2019e_2159	2019	2190 5540 760	S(Goce,Grace,Lageos)	Zingerle, P. et al, 2019
148	GO CONS GCF 2 TIM R6e	2019	300	S(Grace)	Zingerle, P. et al, 2019
139	ITSG-Grace2018s	2018	200	S(Goce,Grace)	Mayer-Gürr, T. et al, 2018
162	EIGEN-GRGS.RL04.MEAN-FIELD	2019	300	S(Goce,Grace,Lageos)	Lemoine, J.M. et al, 2019
131	GGM05S	2019	300	S(Grace)	Kvas, A. et al, 2021
126	GOGRA02S	2019	300	S(Goce,Grace)	Brockmann, J. M. et al, 2021
125	GOCO03S	2019	300	S(Goce,Grace,...)	Bruinsma, S. L. et al, 2014
114	GO CONS GCF 2 DIR R3	2018	240	S(Goce,Grace,Lageos)	Lu, B. et al., 2019
109	GO CONS GCF 2 TIM R3	2018	180	S(Goce)	Chen, Q. et al, 2018
105	AIUB-GRACE03S	2018	220	S(Goce)	Liang, W. et al., 2018 & Xu, X. et al. (2017)
104	GO CONS GCF 2 DIR R1	2017	240	S(Goce)	Xu, X. et al., 2018

Таблица 3 - Фрагмент списка глобальных геопотенциальных моделей, представленных на сайте ICGEM

Название	Год	Результат	Данные
WHU-SWPU-GOGR2022S	2023	300	S(Grace,Goce)
GOSG02S	2023	300	S(see model)
Tongji-GMMG2021S	2022	2190	S(Goce,Grace,Lageos),G,A
<u>SGG-UGM-2</u>	2020	300	S(Goce,Grace)
<u>XGM2019e 2159</u>	2019	2190 5540 760	S(Goce,Grace,Lageos)
<u>GO CONS GCF 2 TIM R6e</u>	2019	300	S(Grace)
<u>ITSG-Grace2018s</u>	2019	200	S(Goce,Grace)
<u>EIGEN-GRGS.RL04.MEAN-FIELD</u>	2019	300	S(Goce,Grace,Lageos)
<u>GGM05S</u>	2019	300	S(Grace)
<u>GOGRA02S</u>	2019	300	S(Goce,Grace)
<u>GOCO03S</u>	2019	300	S(Goce,Grace,...)
<u>GO CONS GCF 2 DIR R3</u>	2018	240	S(Goce,Grace,Lageos)
<u>GO CONS GCF 2 TIM R3</u>	2018	180	S(Goce)
<u>AIUB-GRACE03S</u>	2018	220	S(Goce)
<u>GO CONS GCF 2 DIR R1</u>	2017	240	S(Goce)
<u>GO CONS GCF 2 SPW R1</u>	2017	250	S(Goce)
EIGEN-51C	2017	330	S(Grace,Champ),G,A
<u>AIUB-GRACE02S</u>	2012	360	S(Grace)
<u>EGM2008</u>	2017	716	S(Grace),G,A

Примечание: данные в таблице 2 составлены на основе материалов ICGEM. Здесь S — данные спутниковых гравиметрических миссий; G - данные наземных гравиметрических измерений; Данные измерений высоты A.

Таблица 4- Характеристики моделей геопотенциала Земли

Геопотенциальная модель Земли	Описание
EGM 2008	Интегрированная модель гравитационного поля высокого разрешения, до 2159 градусов, и порядок сферических гармоник. Содержит улучшенную сетку гравитационных аномалий с разрешением 5'x5'. Рассчитано на основе последних данных спутников GRACE.
EIGEN-6C4	Последняя интегрированная модель гравитационного поля, выполненная до 2190-й степени и порядка с использованием данных GRACE, Lageos, GOSE и наземных гравиметрических измерений, была опубликована в 2014 году.
EIGEN-6C3STAT	GRACE — это интегрированная модель гравитационного поля высокого разрешения, которая была выпущена в 2014 году с использованием данных 4-й миссии GOSE, а также гравиметрических и альтиметрических измерений до 1949-го градуса и порядка.
EIGEN-6C2	Первая унифицированная модель гравитационного поля, созданная до 1946-й степени и порядка с использованием данных GOSE. Модель имеет высокое разрешение. предложено в 2012 году.
EIGEN-6C	Модель гравитационного поля, построенная только до порядка 1420, была рассчитана с использованием данных GRACE, данных миссий Lageos и GOSE и представлена в 2011 году.

Результаты исследования:

– Модель EGM2008 более точна, чем модель EGM96, и может быть рекомендована для замены модели EGM96 в работах, где использовалась модель EGM96.

– Повышение точности модели геоида расширяет круг работ, которые ограничиваются спутниковыми измерениями и не могут быть выполнены в качестве контрольных или ограничиваются трудоемким геометрическим и тригонометрическим нивелированием поверхности (например, геодезическое обеспечение геофизических методов геологоразведочных работ, средне- и мелкомасштабные топографические работы).

Таким образом, для расчета локальной модели геоида на территорию Алматинского геодинимического полигона была выбрана модель EGM2008 (рисунок 2.4).

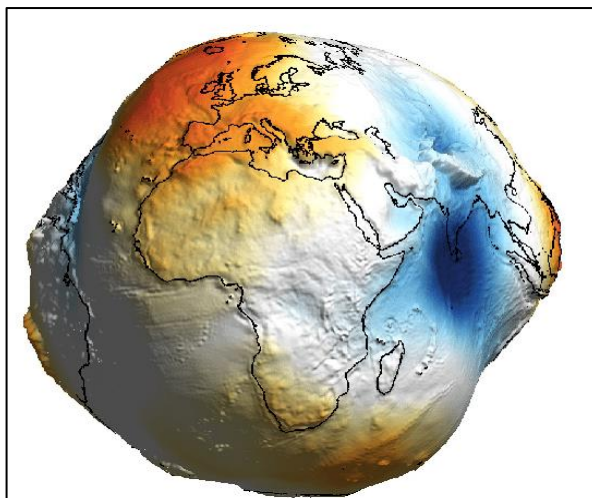


Рисунок 2.3- Модел геоида EGM2008

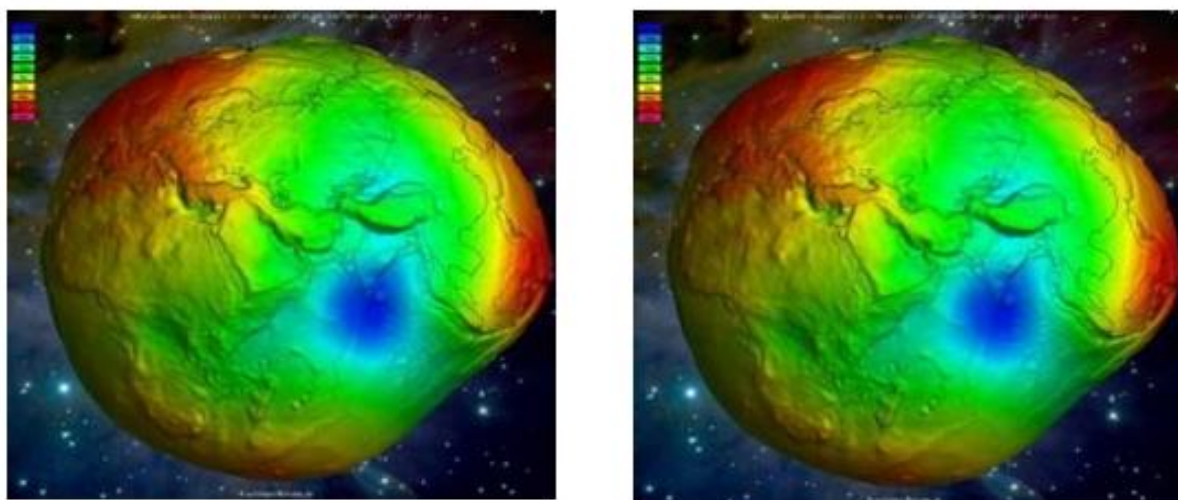


Рисунок 2.4- Модел геоида XGM2019e_2159 и EGM2008

3 Сравнительный анализ построения локальной модели геоида

3.1 Подготовка исходных данных для расчета для модели геоида

Под геодинамическим полигоном понимается территория, на которой проводится комплекс постоянных астрономических, геодезических и гравиметрических наблюдений, направленных на количественную оценку деформаций земной поверхности и изменений локального гравитационного поля, а также изучение развития этих явлений во времени.

В 1971-1972 годах в Казахстане началось создание (Малого) Алматинского испытательного полигона для изучения современных движений земной коры (СДЗК), предвестников крупных землетрясений и совершенствования методики мониторинга СДЗК. Алматинский полигон расположен в средней части северного склона Заилийского Алатау и впадине между наиболее высокой частью хребта и Илийскими горами и находится на территории города Алматы. Территория полигона состоит из крупных структурных блоков, таких как Алматинский, Илийский, Боралдайский и другие глубинные разломы, которые связаны с геологическими разломами более высокого порядка (рисунок 3.1). Площадь Малого Алматинского геодинамического полигона составляет 400 [км]². В этот день на полигоне проводился систематический контроль горизонтальных и вертикальных перемещений.

Нивелирная сеть полигона образована системой меридиональных путей и замкнутых широтных путей и состоит из 12 полигонов, занимающих площадь 200 [км]². Нивелирные сооружения созданы на основе государственных нивелирных сетей, специально разработанных для изучения современных движений грунта на отдельных полигонах и профилях. Общая протяженность нивелирных линий, начинающихся с севера Илийской низменности на широте села Дмитриевка и проходящих по ущельям рек Малая и Большая Алматинка на широте Медеу на юге, превышает 200 км, установлено более 200 реперных знаков. Минимальное расстояние между точками — 200 м, максимальное — 3,2 км. Территорию Алматинского геодинамического полигона пересекают 11 основных профилей.

Для определения текущих вертикальных движений земной поверхности геодезические работы на Алматинском полигоне проводятся методом нивелирования I и II класса. На сегодняшний день выполнено около 50 циклов выравнивания I и II класса. Повторные высокоточные нивелирные геодезические измерения позволяют определить скорость современных вертикальных движений (рисунок 3.2).

По результатам нивелировки 2013 года можно сделать вывод, что вертикальные перемещения незначительны, так как изменение свесов по профилям имеет амплитуду от -19,0 до +4,4 мм в год и не превышает возможного накопления погрешностей измерений.



Рисунок 3.1– Расположение пунктов на территории Алматинской области

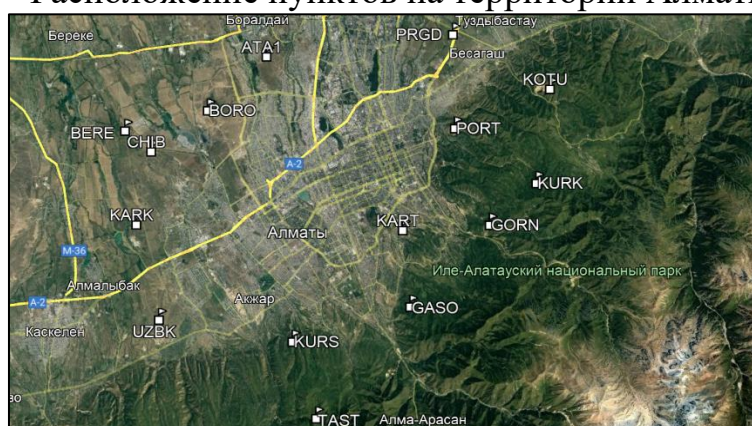


Рисунок 3.2– Пункты алматинского геодинимического полигона

Геодезические сети на каждом геодинимическом полигоне представляют собой высокоточные линейно-угловые структуры, пересекающие ряд разломов в земной коре. Линейно-угловые сети в своей схеме зависят от рельефа полигона и его геологического строения. Линейно-угловые сетки застройки участка, охватывающие всю площадь полигона. Он построен как сеть треугольников, в которой измерены все углы и все стороны. Целью такой сети является определение горизонтальной деформации исследуемой территории и основных векторов движения в полигоне (рисунок 3.3).

На Алматинском полигоне создана полная линейно-угловая сеть для изучения горизонтальных перемещений. Он состоит из 21 пункта, охватывающих южную часть Илийской низменности, покатую равнину на склонах гор и уступы хребта Заилийского Алатау. Точки расположены на разных тектонических блоках. В сети можно выделить две цепи: одна расположена на склонах гор и пересекает 7 тектонических блоков, другая расположена на склонах гор и пересекает 5 блоков. В ГРС г. Алматы также использовалась линейно-угловая сетка из двух геодезических прямоугольников для горизонтальных наблюдений, которые располагались в эпицентральной зоне Верненского землетрясения.

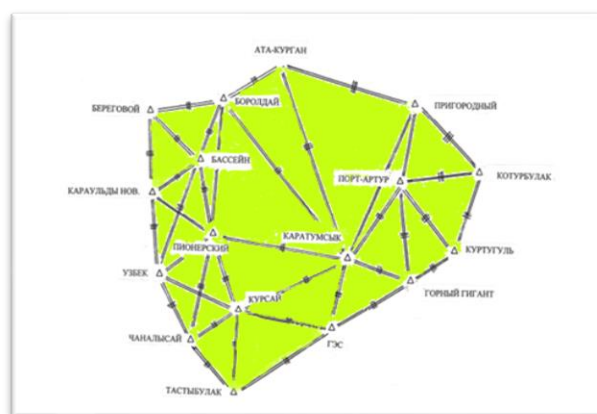


Рисунок 3.4– Линейно-угловая сеть Алматинского геодинимического полигона.

Высота геоида — высота поверхности геоида над поверхностью земного эллипсоида (в системе координат WGS-84) в заданной точке вдоль нормали к ней. Для определения высоты геоида использовались данные геометрического нивелирования (таблица 5) и данные спутниковых наблюдений. Координаты слежения GNSS были получены из системы ITRF 2008 (таблица 6).

Таблица 5 – Данные геометрического нивелирования

Название	X, м	Y, м	Z, м
Боралдай	1060810,554	4526067,571	4353444,292
Курсай	1062173,726	4538109,519	4341247,084
Береговой	1066430,281	4524576,309	4353455,293
Караулды новый	1068441,946	4528804,92	4348723,734
Узбек	1069637,86	4533410,813	4343771,041
Пионерский	1064087,869	4532892,807	4345526,844
Чаналысай	1066020,95	4538686,124	4340016,086
Порт-Артур	1065439,175	4526144,828	4352101,419
Каратумсук	1052442,196	4536361,883	4345151,178
Пригородный	1043742,547	4529391,719	4353901,705
Ата-Курган	1055691,097	4525339,929	4355288,107

Таблица 6 – Данные спутниковых наблюдений

Атауы	X	Y	Z
Боралдай	1060810,554	4526067,571	4353444,292
Курсай	1062173,726	4538109,519	4341247,084
Береговой	1066430,281	4524576,309	4353455,293
Караулды новый	1068441,946	4528804,92	4348723,734
Узбек	1069637,86	4533410,813	4343771,041
Пионерский	1064087,869	4532892,807	4345526,844
Чаналысай	1066020,97	4538686,124	4340016,086
Порт-Артур	1065439,175	4526144,828	4352101,419
Каратумсук	1052442,196	4536361,883	4345151,178
Ата-Курган	1055691,097	4525339,929	4355288,107
Пригородный	1043742,547	4529391,719	4353901,705

Таблица 7 – Десятичные координатные данные

Атауы	X	Y	H
Боролдай	43,31654	76,81214	796.9227
Чаналысай	43,14556	76,78222	1418.3952
Пионерский	43,22889	76,78889	754.3288
Каратумсук	43,21889	76,93833	1030.3265
Узбек	43,19333	76,72389	846.6018
Курсай	43,15917	76,82667	1210.0254
Береговой	43,31444	76,7375	683.7635
Ата-Курган	43,33694	76,86861	698.6265
Караульды Нов,	43,255	76,72528	771.8486
Порт-Артур	43,2625	77,00306	1010.1277
Пригородный	43,32	77,02333	655.3387

Для изучения глобальной модели геоида исходные данные для модели EGM2008 были получены с сайта ICGEM (Международный центр глобальных моделей Земли). На сайте ICGEM мы приводим фрагмент Глобальной модели геоида, охватывающей территорию Алматинского геодинамического полигона (42-44° с.ш./75-78° з.д.) (рисунок 3.5).

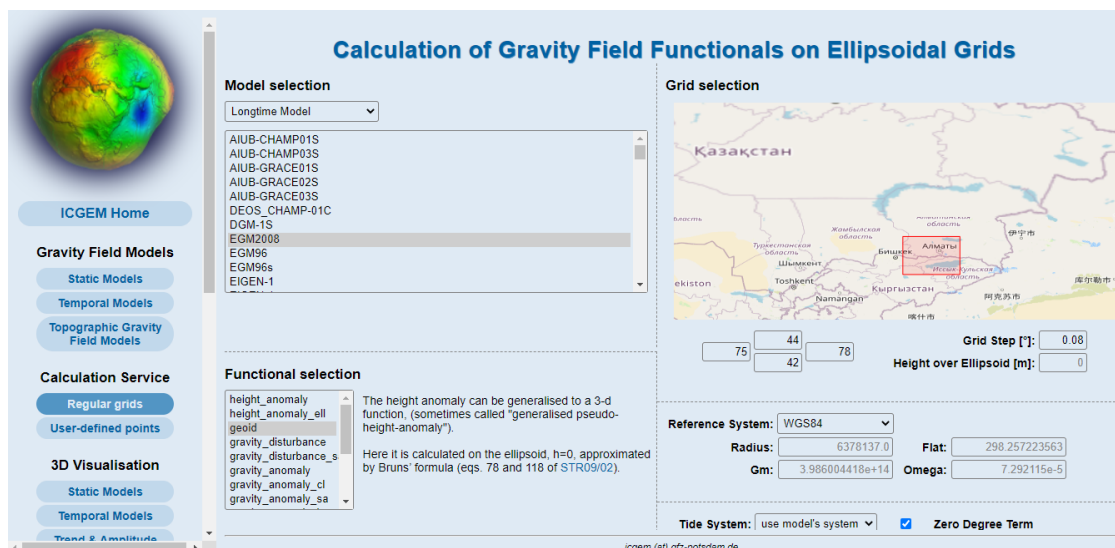


Рисунок 3.5— Расположение исследуемой территории на территории ICGEM.

Следующем этапе работы в ICGEM это вести свой координаты и высотные отметки после чего мы можем взять данные по буге аномалии и геоида для проверки своих данных по работе (рисунок-3.6)

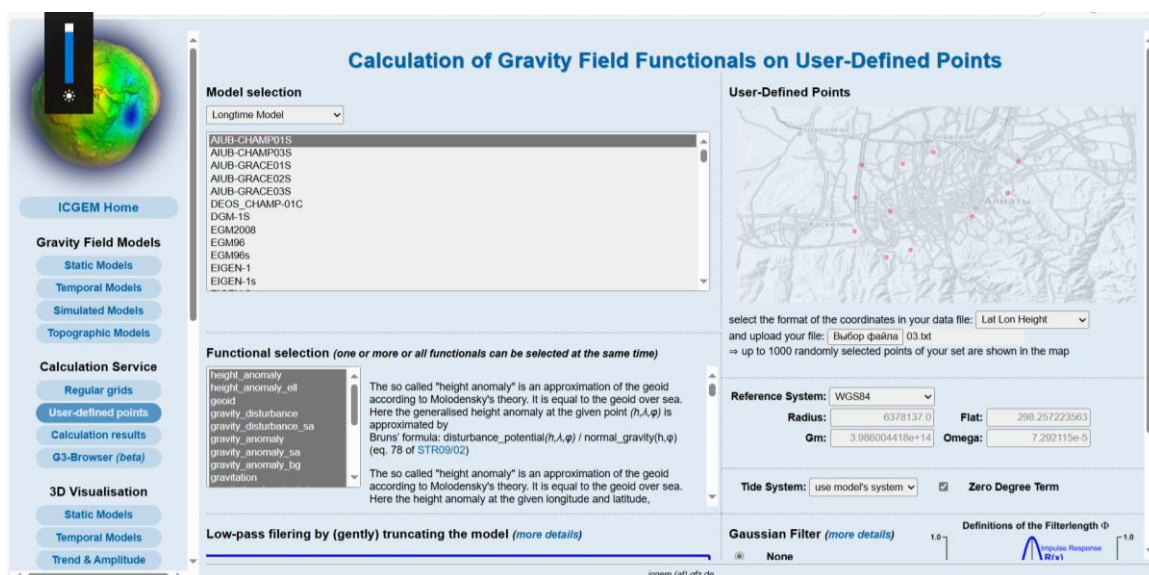


Рисунок 3.6— Водим свой данные в ICGEM.

3.2 Алматинского ГДП расчет гравиметрическим методом

Непосредственное использование аномалий Буге, полученных на гравиметрических пунктах, для вычислений высот геоида неудобно. Гораздо более технологично, если поле аномалий будет представлено в виде значений

аномалий, заданных в узлах регулярной сетки. Поэтому наиболее распространенным шагом подготовки данных для дальнейшего использования в процессе вычислений является пересчет значений с хаотичной сетки на 48 регулярную сетку. Можно полагать, что на этом этапе не происходит внесение дополнительных ошибок в характеристику поля, если дискретность регулярной сетки выбрана с учетом дискретности гравиметрических пунктов. Точность представления поля аномалий Буге регулярной сеткой точек эквивалентна точности представления этого поля хаотичной сеткой

При вычислении гравиметрических высот геоида используются аномалии силы тяжести, которые получают главным образом как результат наземной гравиметрической съемки. Непрерывное поле аномалий силы тяжести, используемое при определении высот геоида, формируется в результате интерполяции значений, полученных на пунктах гравиметрических съемочных сетей. Интерполируются аномалии силы тяжести в редукции Буге. Аномалии Буге вычисляются по формуле:

$$\Delta g_B = g - \gamma(B, h) - \delta_B \quad (3.1)$$

где g — измеренное значение силы тяжести;

$\gamma(B, h)$ — значение нормальной силы тяжести, вычисляемое как функция геодезической широты B и нормальной высоты h ;

δ_B — поправка Буге, определяемая по формуле:

$$\delta_B = 2\pi f \mu h \quad (3.2)$$

Здесь через f обозначена гравитационная постоянная, μ — принятая плотность пород промежуточного слоя. В реальных условиях между точкой наблюдения и поверхностью геоида залегают реальные физические массы.

После того как найдем Аномалии Буге следующим идет Подготовка и систематизация исходных геоданных. На первом этапе производится сбор, систематизация и предварительная обработка данных по пунктам наблюдений Алматинского геодинимического полигона (АГДП). Для каждого пункта должны быть определены: географическая широта, долгота и высота. Эти данные преобразуются в радианы. Также вычисляются средние значения широты и долготы по всем точкам.

Вычисление сферического угла φ_0 (геоцентрического расстояния) Рассчитывается угловое расстояние φ_0 между каждой точкой и центром полигона с использованием формулы:

$$\cos(\varphi_0) = \sin(\varphi)\sin(\varphi^1) + \cos(\varphi)\cos(\varphi^1)\cos(\lambda^1 - \lambda). \quad (3.4)$$

φ = Средняя широта точек

φ^1 = Широта отдельной точки

λ = Средняя долгота точек

λ^1 = Долгота отдельной точки

После чего находим сам угол:

$$\varphi_0 = \arccos(\cos(\varphi_0)). \quad (3.5)$$

Определение нормального ускорения силы тяжести γ Для каждой точки рассчитывается нормальное ускорение силы тяжести по формуле:

$$\gamma(\varphi^1) = 9.780327(1 + 0.0053024\sin^2\varphi^1 - 0.0000058\sin^22\varphi^1). \quad (3.6)$$

Расчёт аномалии силы тяжести Δg Аномалия определяется как разность между измеренным значением ускорения силы тяжести и нормальным:

$$\Delta g = g_{\text{изм}} - \gamma. \quad (3.7)$$

Расчёт высоты геоида N Основной расчёт выполняется по формуле Стокса, включающей вклад каждой точки в высоту геоида. Формула интегрирует гравиметрические данные, сферическое расстояние и параметры эллипсоида.

$$N = \frac{r \cdot \Delta g}{8\gamma} * \left\{ -6\sin^2\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) \ln \left[\sin\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) + \sin^2\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) \right] + 16\sin\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) + 12\sin^2\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) - 24\sin^3\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) - 12\sin^4\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) - 4\cos\varphi_0 + 5\cos 2\varphi_0 - 1 \right\} \quad (3.8)$$

Где, N - геоидальная высота отдельной точки,

φ_0 - сферический радиус поверхности, γ - теоретическая, а также нормальная сила тяжести, g Δ - аномалия силы тяжести и $r = R$ - средний радиус Земли.

Формирование результирующей таблицы

Для каждой точки составляется таблица с координатами, высотой, значением φ_0 , аномалией Δg и итоговым значением высоты геоида N (рисунок-3.7). И все эти данные мы пишем в Excel и там же пишем для них сех соответствующие формулы каждому (рисунок-3.8).

Имя	Широта φ^1	долгота λ^1	Средняя φ	Средняя λ	$\cos(\varphi)$	φ (в градусах)	r	Δg	γ	rdg	$15um$	$2sum$	$3sum$	N
Бороздай +43.7353	43.31654	76.81214	43,25011455	76,83908	0,9975823	3,984943	6371000	-183,791	979987,7989	-149,3554897	0,096344094	0,972483	7,942035	41,06205
Чиваласа В+41.3226	43.14556	76.78222	43,25011455	76,83908	0,9937339	6,419461	6371000	-223,317	980867,7348	-181,3130044	0,21201102	1,562936	7,850006	40,79582
Пиверск иВ+42.494 2	43.22889	76.78889	43,25011455	76,83908	0,9990916	2,444507	6371000	-209,639	980436,1626	-170,2826405	0,041702741	0,5965	7,978207	43,09915
Каратуе ук+41.890 5	43.21889	76.93833	43,25011455	76,83908	0,9968684	4,541676	6371000	-232,12	980487,9266	-188,532394	0,119721174	1,106441	7,924941	43,54974
Уубек+42. 2652	43.19333	76.72389	43,25011455	76,83908	0,9949154	5,783369	6371000	-228,291	980620,4185	-185,3981843	0,178817376	1,408646	7,878227	40,21711
КурейВ+4 1.3226	43.15917	76.82667	43,25011455	76,83908	0,9958284	5,240554	6371000	-223,331	980797,4088	-181,3373726	0,151943639	1,276432	7,900056	40,4675
Бергеной +43.6925	43.31444	76.7375	43,25011455	76,83908	0,9949216	5,77768	6371000	-177,251	979998,3705	-144,0392855	0,178638504	1,40779	7,878375	41,19489
Ата- Курган+4 4.3595	43.33694	76.86861	43,25011455	76,83908	0,9959741	5,145601	6371000	-181,929	979885,7069	-147,8577617	0,147543556	1,254035	7,90354	41,7985
Карауль и Нов.+43.1 134	43.255	76.72528	43,25011455	76,83908	0,9963945	4,869922	6371000	-210,758	980301,3972	-171,2151005	0,134644901	1,186972	7,913598	40,30881

Рисунок 3.7– Расчеты геоида с помощью Excel таблицы.

=978030*(1+0,005302*(SIN(B2))^2-(7*(10)^(-6))*(SIN(2*B2))^2)-14						
E	F	G	H	I	J	K
Mean λ	cos(ψ)	ψ (в граду	r	Δg	γ	rdg8
76,83908	0,9975823	3,984943	6371000	-183,791	979987,7989	-149,3554897
76,83908	0,9937339	6,419461	6371000	-223,317	980867,7348	-181,3130044
76,83908	0,9990916	2,444507	6371000	-209,639	980436,1626	-170,2826405
76,83908	0,9968684	4,541676	6371000	-232,12	980487,9266	-188,5332394
76,83908	0,9949154	5,783369	6371000	-228,291	980620,4185	-185,3981843
76,83908	0,9958284	5,240554	6371000	-223,331	980797,4088	-181,3373726
76,83908	0,9949216	5,77768	6371000	-177,251	979998,3705	-144,0392855
76,83908	0,9959741	5,145601	6371000	-181,929	979885,7069	-147,8577617
76,83908	0,9963945	4,869922	6371000	-210,758	980301,3972	-171,2151005
76,83908	0,9924218	7,059061	6371000	-222,797	980262,8286	-181,002437
76,83908	0,9876326	9,021343	6371000	-194,238	979970,4052	-157,8479171

Рисунок 3.8– Формула в Excel для решения задачи

Анализ и визуализация данных создается карты, на которых визуализируются рассчитанные значения N . Это позволяет интерпретировать геодинамические процессы региона. Golden surfer(рисунок 3.9) (рисунок 3.10)

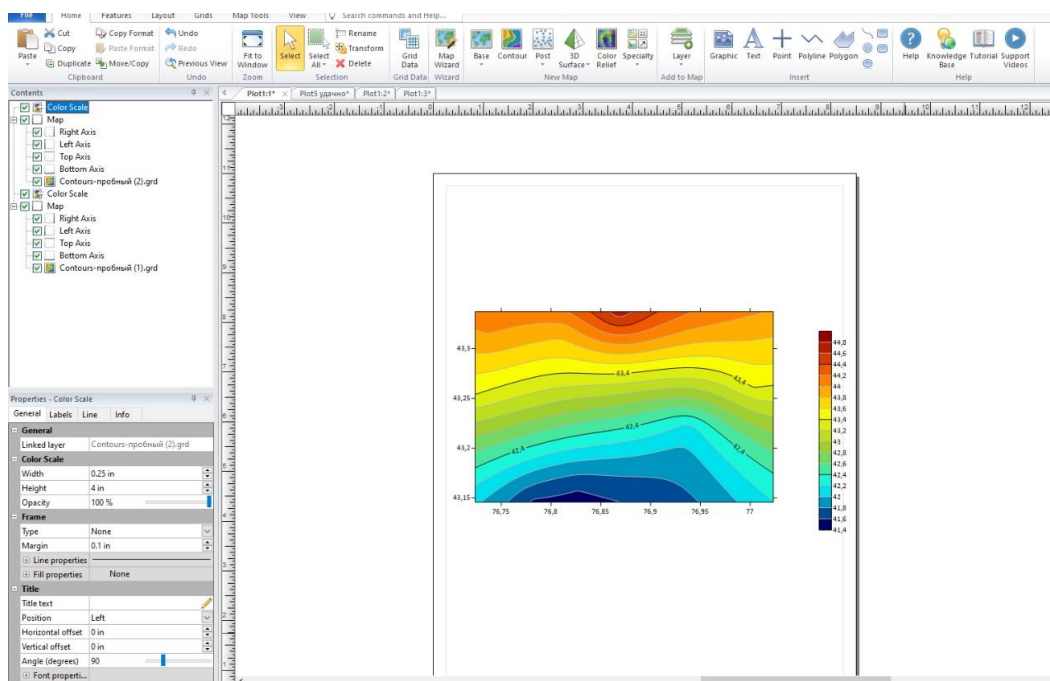


Рисунок 3.9– Локальная модель геоида

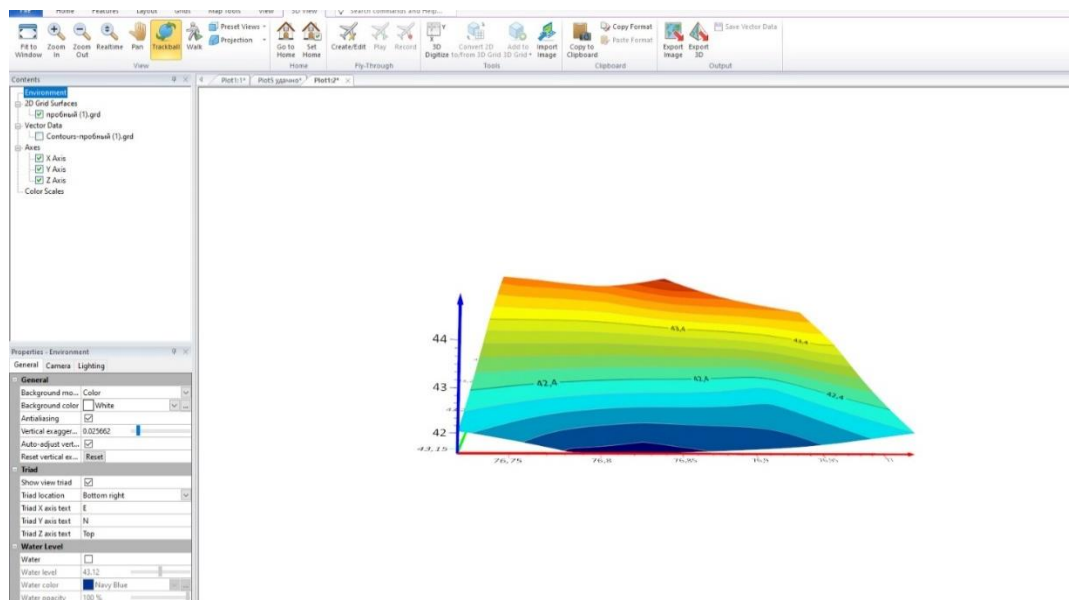


Рисунок 3.10– 3D вид локальной модели геоида на территории Алматинского ГДП.

3.3 Алматинского ГДП расчет геометрическим методом

Геодезическая высота заданной точки — это минимальное расстояние между поверхностью эллипсоида и заданной точкой.

Вместе с проекционными координатами B , L геодезическая высота H определяет пространственное положение точки относительно заданного эллипсоида. Эти координаты называются эллипсоидальными. Геодезические высоты или их разности могут быть рассчитаны на основе результатов спутниковых наблюдений, тригонометрического и астрономо-геодезического нивелирования. Геодезические высоты опорных пунктов рассчитываются в результате обработки сигналов, полученных со спутников глобальных навигационных спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС.

Стандартная высота — один из методов определения высоты над уровнем моря. Нормальные высоты Балтийской системы высот распространены по всей территории Республики Казахстан. Теория нормальных высот была разработана в 1940-х годах М.С. Молоденским (1909-1991). Главное преимущество нормальных высот состоит в том, что их можно строго и однозначно определить только путем измерений на физической поверхности Земли.

Соотношение между различными типами высот показано на рисунке 3.11.

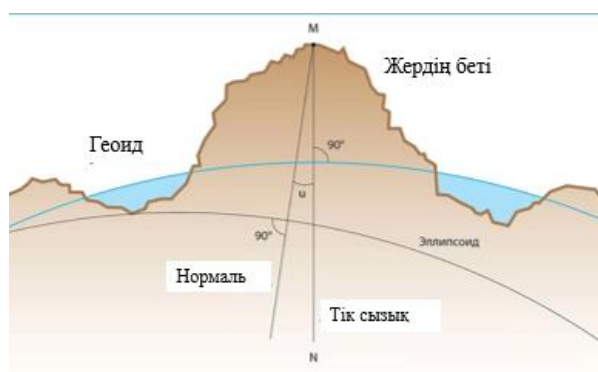


Рисунок 3.11- Соотношение между геодезической высотой, высотой геоида и нормальной высотой.

Геодезические высоты точек вычисляются в результате обработки сигналов, полученных со спутников глобальных навигационных спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС.

Координаты всех точек были переведены в эллипсоидальные высоты с помощью программы LGO. Для этого мы импортируем измерения GNSS в программу LGO и преобразуем их в систему координат WGS 84, получая в результате эллипсоидальные высоты точек.

Высоту геоида находим как разность между геоидальной высотой (над уровнем моря) h точки и эллипсоидальной высотой H (таблица 8).

Таблица 8 – Расчет высоты геоида

№	Названия пунктов	Высота эллипсоида, м	Высота геоида, м	Разница, м
1	Боралдай	796.9227	840.658	43.7353
2	Курсай	1210.0254	1251.348	41.3226
3	Береговой	683.7635	727.456	43.6925
4	Караулды новый	771.8486	814.962	43.1134
5	Узбек	846.6018	888.867	42.2652
6	Пионерский	754.3288	796.823	42.4942
7	Чаналысай	1418.3952	1459.427	41.0318
8	Каратумсук	1030.3265	1072.217	41.8905
9	Ата-Курган	698.6265	742.986	44.3595
10	Пригородный	655.3387	698.867	43.5583
11	Порт-Артур	1010.1277	1053.327	43.1993

На основе полученных высот геоида создана локальная модель в программе Golden Software Surfer (рисунок 3.12) (рисунок 3.13).

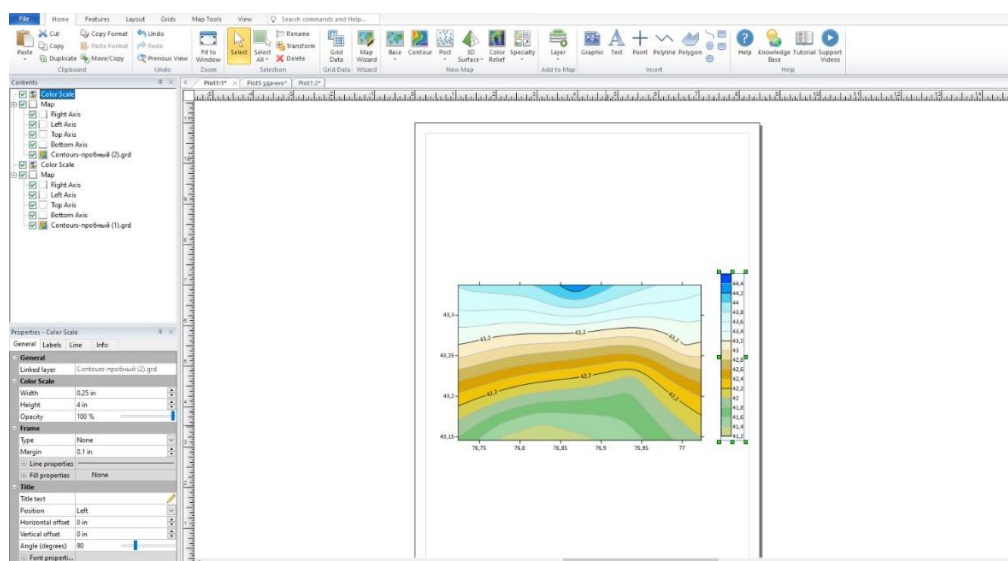


Рисунок 3.12– Локальная модель геоида

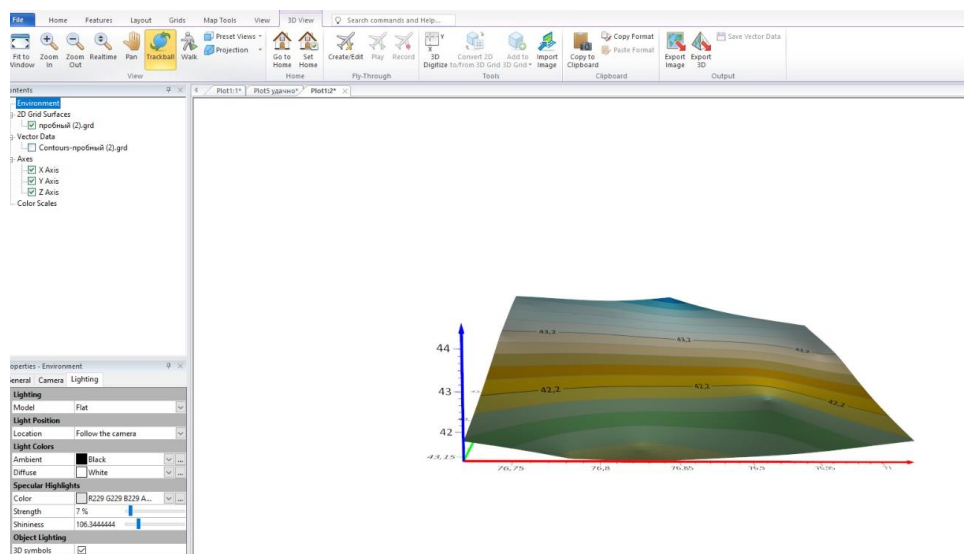


Рисунок 3.13– 3D вид локальной модели геоида на территории Алматинского ГДП.

Исходной информацией для проведения исследования являются значения высот геоида, полученные по данным спутникового и геометрического нивелирования для пунктов, расположенных на территории Алматинской области. На рисунке представлена схема расположения точек, где проводились спутниковые измерения и выполнялось геометрическое нивелирование.

Итог всей работы можно увидеть в (Приложение В Таблица В.1)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы был выполнен комплексный сравнительный анализ различных методов построения локальной модели геоида на примере Алматинского геодинамического полигона. Проведённые исследования подтвердили, что выбор метода построения геоида напрямую зависит от задач исследования, географических особенностей региона и доступности исходных данных.

Гравиметрический метод, несмотря на его высокую теоретическую обоснованность и точность в условиях плотной сети наблюдений, требует значительных объемов гравиметрической информации и тщательной обработки данных. Геометрический метод, напротив, отличается относительной простотой реализации при наличии GPS-измерений и точных нивелирных данных, что делает его особенно эффективным в условиях городской или инженерной инфраструктуры.

Результаты, полученные по обоим методам, продемонстрировали хорошую сходимость, а их сопоставление позволило выявить локальные аномалии и уточнить форму геоида на изучаемом участке. Использование глобальной модели EGM2008 и модели XGM2019e_2159 дало возможность сравнить локальные значения с международными стандартами, что подтвердило высокую достоверность проведённых измерений и расчётов.

Таким образом, наиболее эффективным подходом к построению локальной модели геоида является комбинированное использование гравиметрических и геометрических методов с опорой на современные глобальные модели. Это обеспечивает не только высокую точность моделирования, но и универсальность применения результатов в задачах геодезии, мониторинга деформаций земной поверхности и инженерных изысканий.

Проведённое исследование может быть использовано как методическая основа для аналогичных проектов на других геодинамически активных территориях, а также для совершенствования существующих моделей геоида на национальном и региональном уровнях.

Список использованных источников

1. Гридчин В. М., Обиденко В. И., Чалков Д. А., Кобелева Н. Н. Построение локальной модели геоида с использованием спутниковых и наземных измерений // Вестник геодезии и картографии. — 2020. — № 3. — С. 45–52. — УДК 528.242.
2. Майоров А. Н. Разработка технологии и создание модели квазигеоида с использованием спутниковых данных: дис. канд. техн. наук. — Москва: МГУГиК, 2008. — 108 с.
3. International Centre for Global Earth Models (ICGEM). — URL: <http://icgem.gfz-potsdam.de> (дата обращения: 05.06.2025).
4. Шоганбекова Д. А. Разработка алгоритмов вычисления аномалий высот и моделирование гравиметрического геоида Республики Казахстан: дис. ... канд. техн. наук. — Алматы: КазНИТУ, 2016. — 120 с.
5. Кузьмин В. И. Гравиметрия: учебное пособие. — Новосибирск: СГГА, 2015. — 256 с.
6. Картбаева К. Т. Мониторинг смещений земной поверхности в условиях Алматинского геодинамического полигона // Геодезия и картография. — 2018. — № 4. — С. 33–39.
7. Eteje S. O., Oduyebo O. F., Olulade Sunday A. Procedure for the determination of local gravimetric-geometric geoid model // Journal of Surveying and Mapping. — 2019. — Vol. 8, No. 2. — P. 87–94.
8. Канушин В. Ф., Ганагина И. Г., Голдобин Д. Н., Мазурова Е. М., Косарев Н. С., Косарева А. М. Современные модели квазигеоида: точность и разрешение // Геодезия и картография. — 2021. — № 6. — С. 12–20.
9. Daras I. Determination of the gravimetric geoid model of Greece using the KTH method // Geodesy and Geodynamics. — 2020. — Vol. 11, No. 5. — P. 345–352. — URL: <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01287-y> (дата обращения: 05.06.2025).
10. Орлов А. В. Современные подходы к определению геоида // Геодезия и картография. — 2017. — № 5. — С. 28–34. — URL: <https://orsyst.ru/blog17> (дата обращения: 05.06.2025).
11. Методика построения локальных моделей геоида // Научный архив. — 2018. — URL: <https://pandia.ru/text/78/645/9132-9.php> (дата обращения: 05.06.2025).

Приложение А

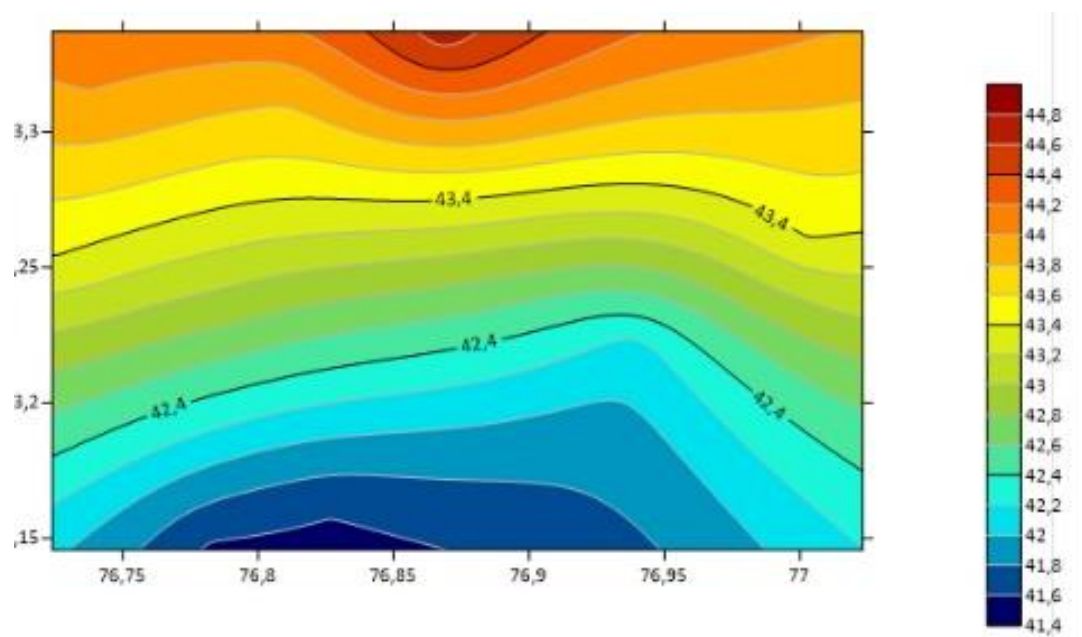


Рисунок А.1– геометрический геоид

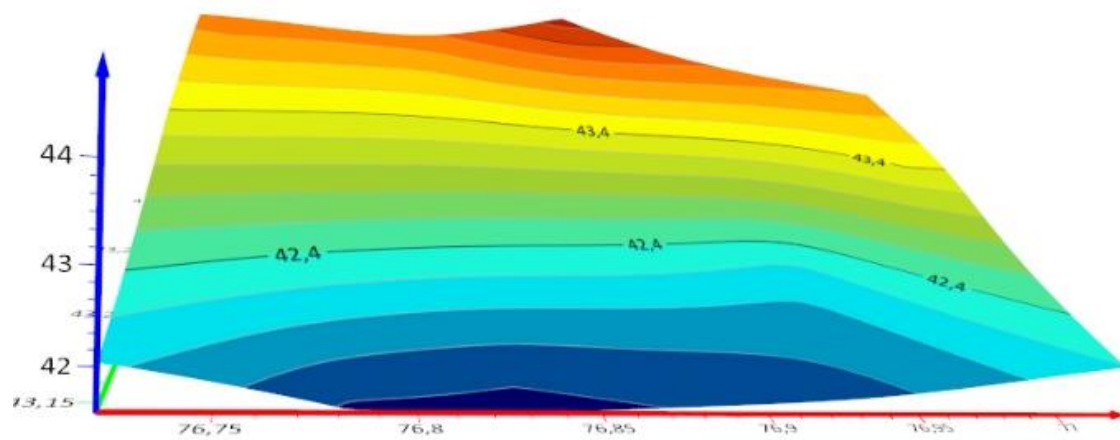


Рисунок А.2– геометрический геоид 3Д модель

Приложение Б

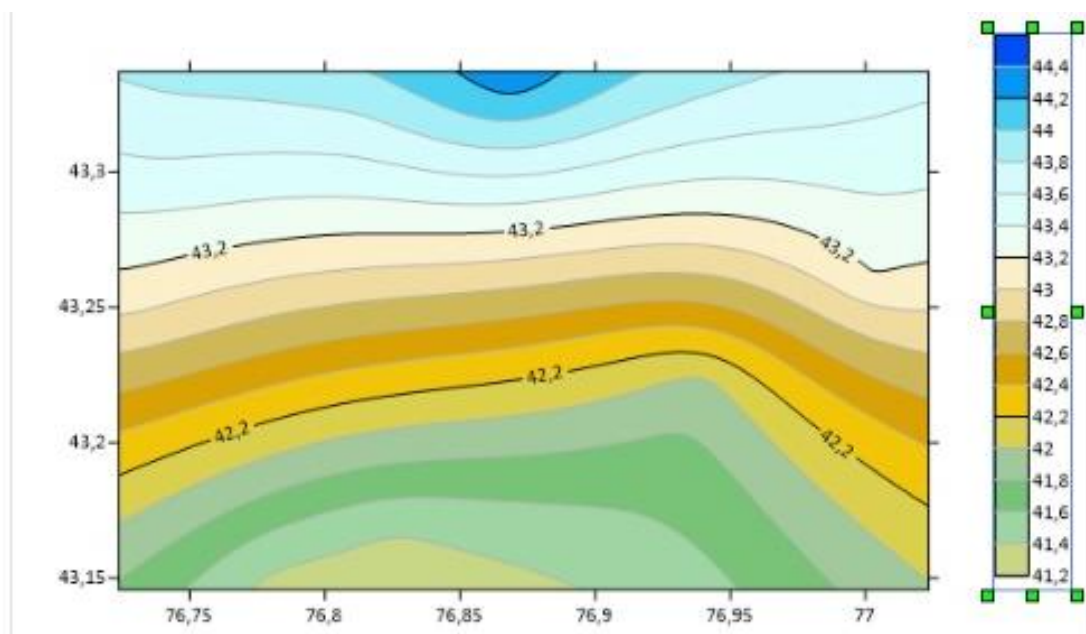


Рисунок Б.1– гравиметрический геоид

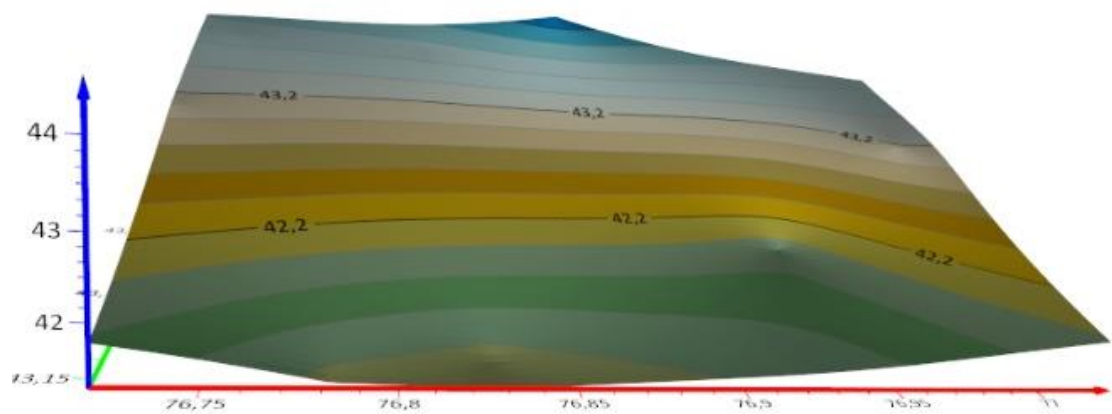


Рисунок Б.2– гравиметрический геоид 3Д модель

Приложение В

Имя	Широта	Долгота	Высота эллипсоида, м	Высота геоида, м	Nгеомет.	Nграви.	Глобальный геоид	N геомет. Смещение	N грави. Смещение
Боролдай+	43,31654	76,81214	796.9227	840.658	43.7353	43,8697	44.0833	0.348	0.213
Чаналысай+	43,14556	76,78222	1418.3952	1459.427	41.0318	41,1771	41.2618	0.230	0,085
Пионерский+	43,22889	76,78889	754.3288	796.823	42.4942	42,5852	42.7922	0.298	0,207
Каратумсук+	43,21889	76,93833	1030.3265	1072.217	41.8905	42,0981	42.1495	0.259	0,051
Узбек+	43,19333	76,72389	846.6018	888.867	42.2652	42,4108	42.5812	0.316	0,17
Курсай+	43,15917	76,82667	1210.0254	1251.348	41.3226	41,4978	41.5696	0,247	0,072
Береговой+	43,31444	76,7375	683.7635	727.456	43.6925	43,7820	44.0435	0.351	0,261
Ата-Курган+	43,33694	76,86861	698.6265	742.986	44.3595	44,5077	44.7445	0.385	0,237
Караульды Нов,+	43,255	76,72528	771.8486	814.962	43.1134	43,2432	43.4494	0,336	0,206
Порт-Артур+	43,2625	77,00306	1010.1277	1053.327	43.1993	43,4239	43.5533	0.354	0,129
Пригородный+	43,32	77,02333	655.3387	698.867	43.5583	43,7147	43.8783	0.320	0,164

Таблица В.1- Итоговая таблица

РЕЦЕНЗИЯ

на дипломную работу

Куаныш Абдулхак Муратулы
(Ф.И.О. обучающегося)

6B07303 Геопространственная цифровая инженерия
(шифр и наименование ОП)

На тему: Сравнительный анализ методов построения модели локального геоида

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Структура дипломной работы включает в себя: введение, три раздела, заключение, список используемых источников литературы и 3 приложений.

Дипломная работа посвящена актуальной задаче современной геодезии построению высокоточной локальной модели геоида, что имеет важное значение для инженерно-геодезических работ, спутникового нивелирования, мониторинга деформаций земной поверхности и геодинамических исследований.

В исследовании рассматриваются и сопоставляются два ключевых подхода к моделированию геоида: геометрический и гравиметрический. Особое внимание уделено применению формулы Стокса, интерполяции аномалий Буге, использованию данных спутниковых гравиметрических миссий (таких как GRACE, GOCE) и GNSS-наблюдений. Практическая часть работы выполнена на примере Алматинского геодинамического полигона, что придаёт исследованию прикладной характер.

Работа логично структурирована, содержит обзор современных глобальных и региональных моделей геоида (EGM2008, XGM2019e и др.), описывает методику обработки и интерполяции гравиметрических данных, расчёт аномалий высот, а также построение поверхности геоида средствами Golden Surfer. Автором выполнен количественный анализ точности моделей и сделаны обоснованные выводы о применимости каждого из подходов в разных геодинамических условиях.

Работа написана технически грамотным языком, полученные результаты сопровождаются таблицами и иллюстрациями.

Оценка работы

Дипломная работа Куаныша А.М. выполнена на высоком профессиональном уровне, заслуживает оценки 96 и рекомендуется к защите, а студент присвоению академической степени бакалавра.

Рецензент

К.т.н., ассоц. профессор-исследователь,
зав. кафедрой "Геодезия и картография, кадастр",
КазГАСА

Подпись <u>Кузнецова И.А.</u>
заверяю
HR департамент <u>БЗ</u>
« <u> </u> » <u> </u> 20 <u> </u>

Кузнецова И. А.

06 2025 г

ОТЗЫВ

на дипломную работу

Куаныш Абдулхака Муратұлы на тему:

«Сравнительный анализ методов построения модели локального геоида»

Дипломная работа посвящена актуальной задаче современной геодезии — построению высокоточной локальной модели геоида, что имеет важное значение для инженерно-геодезических работ, спутникового нивелирования, мониторинга деформаций земной поверхности и геодинамических исследований.

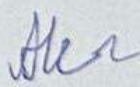
В исследовании рассматриваются и сопоставляются два ключевых подхода к моделированию геоида: геометрический и гравиметрический. Особое внимание уделено применению формулы Стокса, интерполяции аномалий Буге, использованию данных спутниковых гравиметрических миссий (таких как GRACE, GOCE) и GNSS-наблюдений. Практическая часть работы выполнена на примере Алматинского геодинамического полигона, что придаёт исследованию прикладной характер.

Работа логично структурирована, содержит обзор современных глобальных и региональных моделей геоида (EGM2008, XGM2019e и др.), описывает методику обработки и интерполяции гравиметрических данных, расчёт аномалий высот, а также построение поверхности геоида средствами Golden Surfer. Автором выполнен количественный анализ точности моделей и сделаны обоснованные выводы о применимости каждого из подходов в разных геодинамических условиях.

Следует отметить высокий уровень технической подготовки студента, грамотное использование математического аппарата и уверенное владение специализированным программным обеспечением. Оформление работы соответствует установленным требованиям, все иллюстрации и таблицы приведены корректно.

Дипломная работа Куаныша А.М. выполнена на высоком профессиональном уровне, заслуживает оценки 96 и рекомендуется к защите, а студент присвоению академической степени бакалавра.

Научный руководитель
PhD, ассоц. профессор кафедры МДиГ,
КазНУТУ им. К. Сатпаева


Кенесбаева А.

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Куаныш Абдулхак Муратұлы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Сравнительный анализ методов построения локального геоида - 2 ПОПЫТКА!

Научный руководитель: Айгуль Кенесбаева

Коэффициент Подобия 1: 6.2

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 0

Знаки из здругих алфавитов: 16

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

- ☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- ☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- ☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- ☐ Обоснование:

Дата 09.06.2022



Заведующий кафедрой

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Куаныш Абдулхак Муратұлы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Сравнительный анализ методов построения локального геоида - 2 ПОПЫТКА!

Научный руководитель: Айгуль Кенесбаева

Коэффициент Подобия 1: 6.2

Коэффициент Подобия 2: 0

Микропробелы: 0

Знаки из здругих алфавитов: 16

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

Дата 09.06.252

проверяющий эксперт