

UDC 528.2

IRSTI 37.31.23

RESEARCH ARTICLE

EVALUATION OF GLOBAL GEOPOTENTIAL MODELS IN KAZAKHSTAN BASED ON GEOID HEIGHTS AND GRAVITY ANOMALIES

D.A. Shoganbekova^{1,3} , A.S. Urazaliyev^{1,2,*} , K. Kassymkanova² ,
M.S. Kozhakhmetov¹ , S. Kydyrkozhakzy^{1,3} 

¹Institute of Ionosphere, 050020, Almaty, Kazakhstan

²Kazakh National Research Technical University named after. K.I. Satpayev,
050013, Almaty, Kazakhstan

³International Educational Corporation, 050043, Almaty, Kazakhstan

Abstract. *Orthometric height is required for all surveying work in civil engineering. The most effective and less labor-intensive method for determining orthometric heights on the ground is the use of GNSS technologies. But to use GNSS technologies, it is necessary to determine the geoid height (the difference between ellipsoidal and orthometric heights). This article reviews and compares the latest high-resolution Global geopotential models (GGM) in order to select the optimal model for creating a model of the geoid of Kazakhstan. The study consists of three stages. In the first stage, the GGMs were evaluated using 112 GNSS/leveling points distributed over the test area. In the second stage, selected GGMs were evaluated based on gravity data. In the third stage, some of the best performing models were further compared using spectral information contained in their spherical harmonic coefficients. The EIGEN-6C4 model demonstrated advantages over other GGMs (XGM2019e_2159, GECO, SGG-UGM-2, EGM2008) that participated in the accuracy assessment, showing a standard deviation of 0.267 m at the first stage. When analyzed to match ground-based gravity data, the EIGEN-6C4 model demonstrated a match with a standard deviation of 5.341 mGal. Based on the evaluation results, it is decided that EIGEN-6C4 is the most suitable model for generating local geoid, which will contribute to the development of geodesy in civil engineering in the future.*

Keywords: *geoid, GGM, Bouguer anomaly, accuracy assessment, standard deviation, GNSS/Leveling, spectral analysis.*






***Corresponding author**

Asset Urazaliyev, e-mail: a.urazaliyev@ionos.kz

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.2-14>

Received 20 March 2024; Revised 17 April 2024; Accepted 30 May 2024

ГЕОИД БИІКТІКТЕРІ МЕН ГРАВИТАЦИЯ АНОМАЛИЯЛАРЫ НЕГІЗІНДЕ ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ ҒАЛАМДЫҚ ГЕОПОТЕНЦИАЛДЫҚ МОДЕЛЬДЕРДІ БАҒАЛАУ

Д.А. Шоганбекова^{1,3} , А.С. Уразалиев^{1,2,*} , Х.К. Касымканова² ,
М.С. Кожаметов¹ , Ш. Қыдырқожақызы^{1,3} 

¹Ионосфера институты, 050020, Алматы, Қазақстан

²Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті,
050013, Алматы, Қазақстан

³Халықаралық білім беру корпорациясы, 050043, Алматы, Қазақстан

Аңдатпа. Азаматтық құрылыстағы барлық геодезиялық жұмыстарды орындау үшін ортометриялық биіктік қажет. Жердегі ортометриялық биіктіктерді анықтаудың ең тиімді және аз уақытты қажет ететін әдісі Жаһандық навигациялық спутниктік жүйесін (ЖНСЖ) қолдану болып саналады. Бірақ ЖНСЖ технологиясын қолдану үшін геоидтың биіктігін анықтау қажет (эллипсоидтық және ортометриялық биіктіктер арасындағы айырмашылық). Бұл мақалада Қазақстанның геоид моделін құру үшін оңтайлы модельді таңдау мақсатында жоғары ажыратымдылықтағы соңғы ғаламдық геопотенциалдық модельдер (FGM) қарастырылады және салыстырылады. Зерттеу үш кезеңнен тұрады. Бірінші кезеңде FGM сынақ учаскесі бойынша бөлінген 112 ЖНСЖ/Нивелирлеу нүктелері арқылы бағаланды. Екінші кезеңде гравитациялық мәліметтер негізінде таңдалған FGM бағаланды. Үшінші кезеңде кейбір тиімді модельдер сфералық гармоника коэффициенттеріндегі спектрлік ақпаратты қолдану арқылы одан әрі салыстырылды. EIGEN - 6C4 моделі дәлдікті бағалауға қатысқан басқа FGM-ге (XGM2019e_2159, Geco, SGG-UGM-2, EGM2008) қарағанда артықшылықтарды көрсетті, бірінші кезеңде стандартты ауытқуды 0.267 м-ге тең көрсетті, жердегі гравиметриялық деректерге сәйкестігін талдау бойынша EIGEN-6C4 моделі 5,341 мГал стандартты ауытқумен сәйкестігін көрсетті. Бағалау нәтижелеріне сүйене отырып, EIGEN-6C4 болашақта азаматтық құрылыстағы геодезияның дамуына үлес қосатын жергілікті геоидты құруда ең тиімді модел болып табылады.

Түйін сөздер: геоид, FGM, Буге аномалиясы, дәлдікті бағалау, орташа квадраттық ауытқу, ЖНСЖ/Нивелирлеу, спектрлік талдау.

*Автор-корреспондент

Асет Уразалиев, e-mail: a.urazaliyev@ionos.kz

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.2-14>






Алынды 20 наурыз 2024; Қайта қаралды 17 сәуір 2024; Қабылданды 30 мамыр 2023.

УДК 528.2

МРНТИ 37.31.23

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

ОЦЕНКА ГЛОБАЛЬНЫХ ГЕОПОТЕНЦИАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ В КАЗАХСТАНЕ НА ОСНОВЕ ВЫСОТ ГЕОИДА И ГРАВИТАЦИОННЫХ АНОМАЛИЙ

Д.А. Шоганбекова^{1,3} , А.С. Уразалиев^{1,2,*} , Х.К. Касымканова² ,
М.С. Кожаметов¹ , Ш. Қыдырқожақызы^{1,3} 

¹Институт ионосферы, 050020, Алматы, Казахстан

²Казахский национальный исследовательский технический университет
им. К.И. Сатпаева, 050013, Алматы, Казахстан

³Международная образовательная корпорация, 050043, Алматы, Казахстан

Аннотация. Для выполнения всех геодезических работ в гражданском строительстве требуется ортометрическая высота. Самым эффективным и менее трудоемким методом определения ортометрических высот на местности считается применение ГНСС технологий. Но для использования ГНСС технологий необходимо определить высоту геоида (разница между эллипсоидальным и ортометрическим высотами). В данной статье рассматриваются и сравниваются последние ГГМ высокого разрешения с целью выбора оптимальной модели для создания модели геоида Казахстана. Исследование состоит из трех этапов. На первом этапе ГГМ оценивались с использованием 112 точек ГНСС/Нивелирования, распределенных по тестовому участку. На втором этапе проводилась оценка выбранных ГГМ на основе гравитационных данных. В третьем этапе некоторые из наиболее эффективных моделей дополнительно сравнивались с использованием спектральной информации, содержащейся в их коэффициентах сферических гармоник. Модель EIGEN-6C4 продемонстрировала преимущества перед другими ГГМ (XGM2019e_2159, GECO, SGG-UGM-2, EGM2008), участвовавших в оценке точности, показав на первом этапе стандартное отклонение равной 0.267м. По анализу на соответствие наземным гравиметрическим данным модель EIGEN-6C4 продемонстрировала соответствие со стандартным отклонением в 5,341мГал. Основываясь на результатах оценки решено, что EIGEN-6C4 является наиболее подходящей моделью для создания локального геоида, которая в будущем внесет вклад в развитие геодезии в гражданском строительстве.

Ключевые слова: геоид, ГГМ, аномалия Буге, оценка точности, среднеквадратичное отклонение, ГНСС/Нивелирование, спектральный анализ.

*Автор-корреспондент

Асет Уразалиев, e-mail: a.urazaliyev@ionos.kz

<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.2-14>

Поступила 20 марта 2024 г.; Пересмотрено 17 апреля 2024 г.; Принято 24 мая 2024 г.

ACKNOWLEDGEMENTS/SOURCE OF FUNDING

The study was carried out with financial support from the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (grant No. BR21882366).

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that there is no conflict of interest.

АЛҒЫС/ҚАРЖЫЛАНДЫРУ КӨЗІ

Зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің қаржылық қолдауымен жүзеге асырылды (грант № BR21882366).

МҮДДЕЛЕР ҚАҚТЫҒЫСЫ

Авторлар мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

БЛАГОДАРНОСТИ/ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR21882366).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что конфликта интересов нет.

1 ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день, широко используется Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) в сферах городского планирования, гражданского строительства, кадастра, развития геодезической сети, мониторинга деформационных процессов и чрезвычайных ситуации и т.д. При производстве различных научных и практических задач, где требуется ортометрические высоты применение ГНСС становится непригодным, так как могут быть получены только эллипсоидальные высоты (высота, измеренная вдоль нормального из опорного эллипсоида). В результате ГНСС измерений получают не отметки высот, а значения декартовых трёхмерных координат в геоцентрической системе XYZ с дальнейшим приведением их к формату геодезических координат - ВЛН. На сегодняшний день в стране относительные высоты могут быть определены только методом геометрического нивелирования. Чтобы преобразовать эллипсоидальную высоту в ортометрическую, требуется модель геоида. В мировой практике ГНСС давно зарекомендовали себя как надежный инструмент для определения местоположения не имеющий аналогов в мире по масштабу, функциональности и точности позиционируя себя самым экономичным способом в нынешних условиях.

Для создания гравиметрической модели геоида широко используются интегральные уравнения Стокса, позволяющие вычислять высоты геоида на основе измерений земной гравитации в точках на поверхности Земли или над ней. Эти формулы требуют данных о гравитации, охватывающих всю поверхность Земли. Однако на практике доступны лишь гравиметрические данные, ограниченные сферической шапкой, что приводит к ошибке усечения. Для уменьшения этой ошибки необходимо объединить наземные данные с глобальной геопотенциальной моделью (ГГМ). Способность ГГМ определять высоту геоида значительно варьируется в зависимости от расположения точек и максимальной степени модели. Для достижения оптимального гравиметрического определения геоида необходимо выбрать ГГМ, которая наилучшим образом соответствует местному гравитационному полю.

Целью данного исследования является оценка эффективности новейших моделей ГГМ с высоким разрешением для будущего моделирования геоида в Казахстане. Используется строгая схема: сначала модели фильтруются с использованием волнистости геоида ГНСС и наблюдаемых гравитационных аномалий, а затем анализируется спектральная информация, содержащаяся в ГГМ, для получения оптимальной модели (моделей) для будущего моделирования геоида Казахстана ([Kumar Ghosh & Nath Mishra, 2016](#)).

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

ГГМ представляют собой наборы коэффициентов сферических гармоник, представляющих гравитационное поле Земли. Разработанные учеными модели ГГМ публикуются Международным центром гравитационных моделей Земли (ICGEM). На сегодняшний день в базе данных ICGEM доступно 180 моделей ГГМ. Поскольку количество геопотенциальных моделей растет с каждым годом, пользователю будет сложно выбрать оптимальную модель для своего регионального моделирования без тестирования каждой модели (ICGEM).

Существуют следующие методы по оценке ГГМ:

- Сравнение с независимыми данными: спутниковая альтиметрия ([Kim, J. et al., 2011](#)), данные ГНСС/Нивелирования ([Tapley et al., 2004](#)), гравиметрические данные ([Апех, О. I. et al., 2018](#)).
- Сравнение с другими моделями - межмодельное сравнение для выявления консистентности и различий ([Bruinsma et al., 2010](#));

- Оценка сходимости коэффициентов сферических гармоник при увеличении степени и порядка (Ries et al., 2016);
- Сравнение значений геоида, рассчитанных по моделям, с независимыми измерениями уровня моря (Sideris et al., 2014);
- Комплексная оценка моделей с использованием нескольких методов (Flury & Rummel, 2009).

Самыми распространенными методами оценки ГГМ являются сравнения геодезических величин, полученных на основе ГГМ (таких как потенциал, высоты геоида, отклонение вертикальных компонентов, сила тяжести и значения аномалий) с данными, полученными на основе ГНСС/Нивелирования (Ariff et al., 2021., Pham et al., 2023., Yilmaz et al., 2016) и наземными гравиметрическими измерениями (Yilmaz & Kozlu, 2018). Это позволяет уменьшить влияние допущений и аппроксимаций, присущих методу Стокса, и повысить точность определения высоты геоида (Savchuk & Fedorchuk, 2024).

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

3.1 РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ И ДОСТУПНЫЕ НАЗЕМНЫЕ ДАННЫЕ

Исследуемым объектом принят тестовый участок, расположенный в южной части Казахстана, ограниченный между $40^{\circ} 10'$ и $43^{\circ} 15'$ северной широты и 68° и $70^{\circ} 10'$ восточной долготы (Рисунок 1).

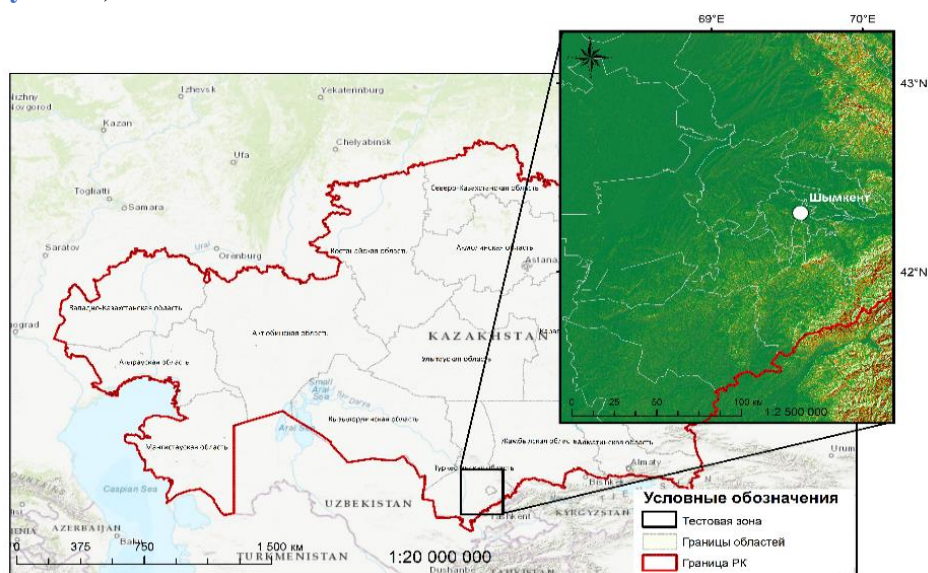


Рисунок 1 – Расположение территории исследования и тестового участка (материалы авторов)

Оценка ГГМ в данной исследовательской работе проводилась с использованием двух типов наземных данных: геодезические пункты на которых выполнялось ГНСС/Нивелирование - 112 точек, также гравиметрические данные - 44796 точек с известными значениями аномалий силы тяжести, расположение которых показана на Рисунок 2, 3.

Для проведения анализа и оценки эффективности применения ГГМ в качестве эталонных данных выбраны 112 пунктов государственной геодезической сети (ГГС) с известными значениями нормальных высот в Балтийской системе 1977г. (БСВ-77), многочасовые статистические ГНСС наблюдения. Для вычисления уравненных координат и высот применялась программа ТВС v5.20. По результатам уравнивания ошибки горизонтальных координат составили 0,004–0,017м, по высоте 0,003–0,034м.

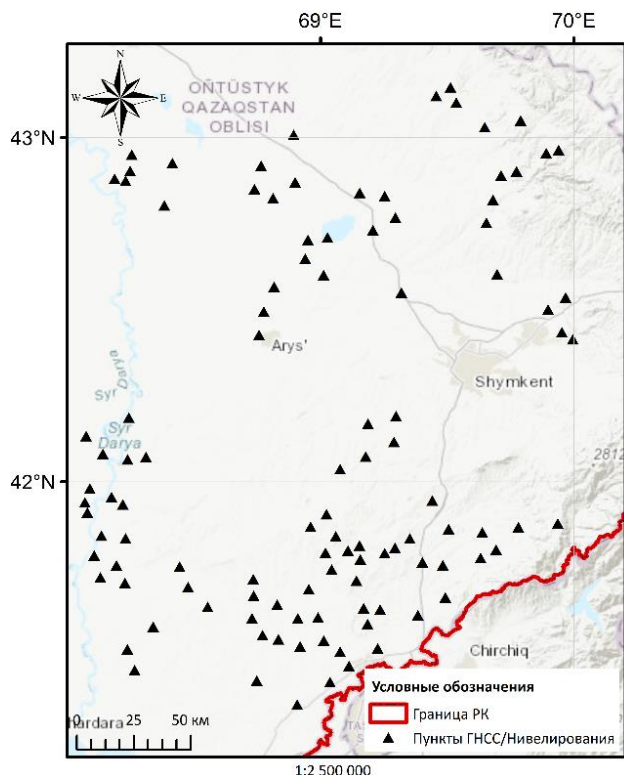


Рисунок 2 – Расположение пунктов ГНСС/Нивелирования (материалы авторов)

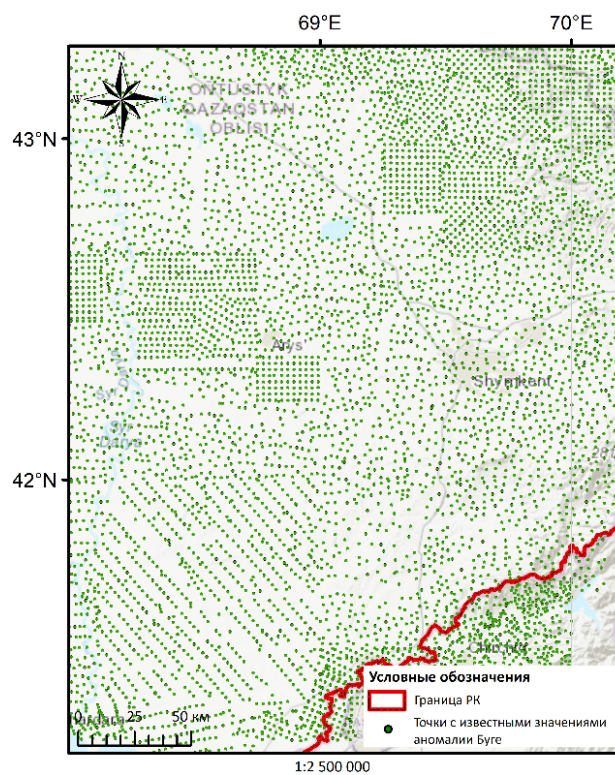


Рисунок 3 – Расположение точек с известными значениями аномалий силы тяжести (материалы авторов)

Данные о наземной гравитации, использованные в этом исследовании, были получены путем оцифровки гравиметрических карт 1:200 000 масштаба.

3.2 ОЦЕНКА ГГМ НА ОСНОВЕ ВЫСОТ ГЕОИДА

Основным способом оценки модели глобального гравитационного поля является сравнение результатов модели с независимыми внешними источниками. Например, очень часто сравнивают вычисленные моделью колебания геоида с высотами геоида, полученными с помощью ГНСС/Нивелирования (Ince et al., 2019). Этот вид оценки также применим к другим функциям гравитационного поля, таким как гравитационные аномалии или отклонения от вертикали, где вычисленные по модели значения сравниваются с наземными измерениями. Преимущество данного метода заключается в том, что он подходит для оценки результатов моделирования на региональном уровне или на конкретной территории, но эффективность оценки зависит только от качества внешних наборов данных, используемых при сравнении. ICGEM собрал несколько серий данных ГНСС/Нивелирования из разных стран (Таблица 1).

Таблица 1

Информация о контрольных точках ГНСС/Нивелирования, собранных ICGEM в течение нескольких лет, и соответствующих авторах/институтах (ICGEM).

№	Страна	Количество пунктов	Корреспондирующий Автор / Год обновления	Организация
1.	Австралия	7224	W. E. Featherstone, N. J. Brown, J. C. McCubbine & M. S. Filmer / 2018	Geoscience Australia
2.	Бразилия	1154	Roberto Teixeira Luz and Sonia Costa /2019	Brazilian Geography and Statistics Institute (IBGE), updated

3.	Канада	2706	M. Veronneau, February / 2019	Canadian Geodetic Survey, Natural Resources Canada
4.	Европа	1047	Ilde et al., /2002	
5.	Япония	816	Tokuro Kodama,	Geospatial Information Authority of Japan
6.	США	6169	Milbert, /1998	
7.	Мексика	4898	2019	National Institute of Statistics and Geography (INEGI)

Как правило, данные ГНСС/Нивелирования собираются на протяжении десятилетий. Помимо различий в эпохах измерений, используется различное оборудование ГНСС и разная продолжительность наблюдений, а также соблюдаются процедуры наблюдений, которые приводят к изменению точности оценки эллипсоидальных высот (h).

Таблица 2

Средние квадратические значения высот геоида полученных путем ГНСС -нивелирование минус ГТМ (ICGEM).

№	ГТМ	Nmax	Территория исследования и количество пунктов оценки, (единицы измерения указаны в метрах)							
			Австра- лия 7224	Брази- лия 1154	Канада 2706	Европа1 047	Япония 816	Мек- сика 4898	США 6169	Итого 24014
176	XGM2019e_21 59	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

Высота геоида, полученная с помощью ГНСС/Нивелирования, может быть вычислена по формуле (Hofmann-Wellenhof & Moritz, 2006):

$$N = h - H \quad (1)$$

В данной формуле ошибки не учитываются, следовательно, результаты сравнений будут зависеть от точности исходных данных. Кроме того, для проведения объективного сравнения необходимо учитывать ошибку пропуска, вызванную усечением глобальных решений (Shoganbekova et. al., 2015). Высота геоида, полученная с помощью ГНСС/Нивелирования, также должна быть сведена к тому же спектральному содержанию, что и у гравиметрических геоидов, что также не учитывается в данной оценке ICGEM, поскольку целью данного сервиса является относительное сравнение моделей по одному и тому же набору данных ГНСС/Нивелирования. Результаты сравнения приводятся в разделе оценки

сервиса на сайте ICGEM, а результаты для моделей с наименьшими погрешностями показаны в **Таблице 2**.

Глобальные оценки моделей гравитационного поля Земли не всегда точно отражают характеристики отдельных регионов, следовательно, возникает необходимость в проведении локальной оценки. В Таблице 2 выделены модели, отобранные для локальной оценки. При выборе учитывались не только их точность, но и другие аспекты.

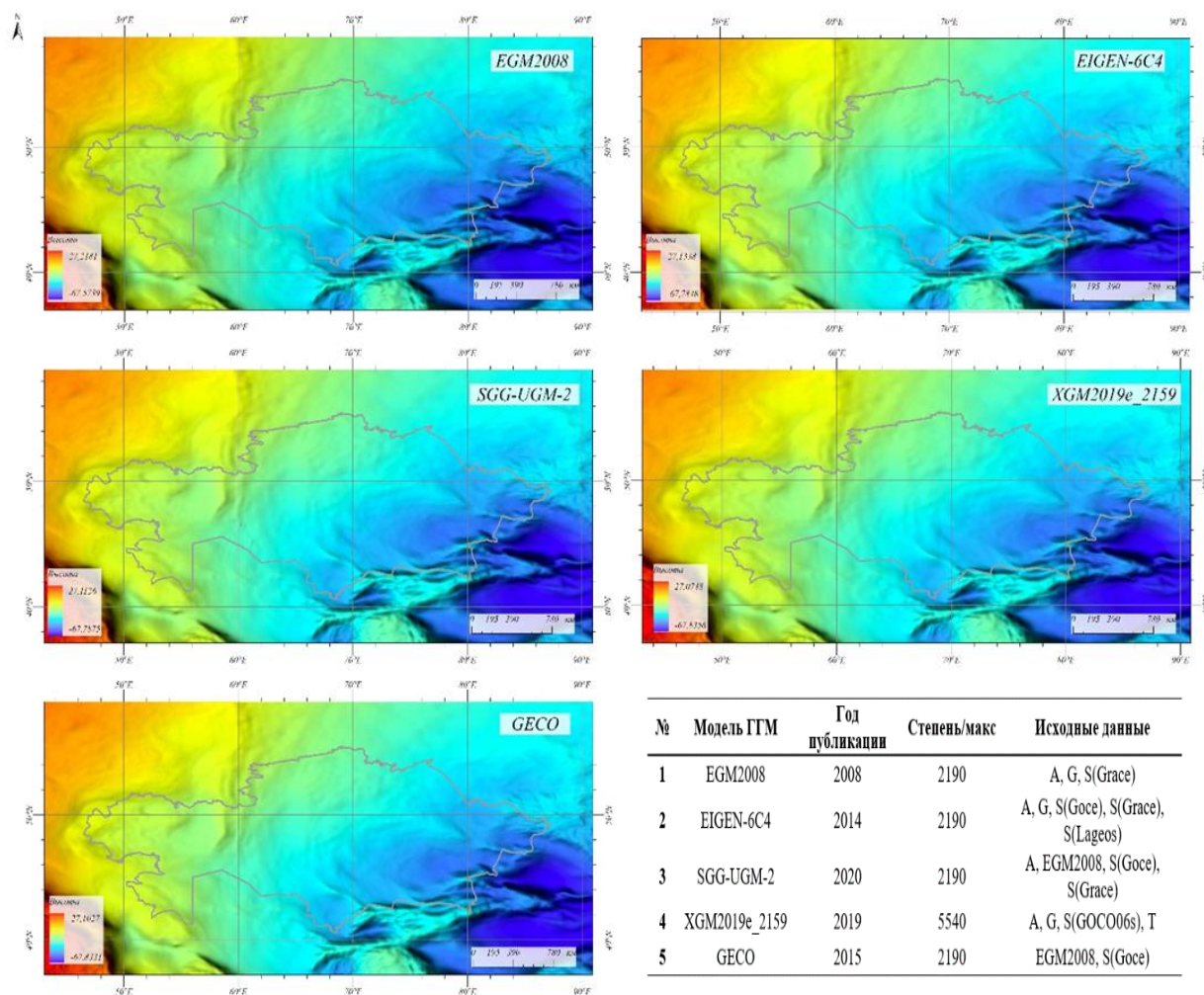


Рисунок 4 – Карта аномалий высот ГТМ и основные характеристики моделей (материалы авторов)

Например, выбор модели EGM2008 обоснован её актуальностью для Республики Казахстан. Среди моделей SGG-UGM-1 и SGG-UGM-2 была выбрана SGG-UGM-2 с учетом таких факторов, как новизна, исходные данные и значение N_{max} . По аналогичным критериям была отобрана модель EIGEN-6C4. Несмотря на публикацию нескольких новых ГТМ в 2023 году, модель XGM2019e_2159, выпущенная в 2019 году, остается наиболее точной (**Рисунок 4**) (Featherstone et al., 1998; Förste et al., 2014; Pavlis et al., 2012; Zingerle et al., 2019; Gilardoni et al., 2016; Liang et al., 2020).

Для определения наиболее подходящей модели геопотенциала для исследуемой области были проведены расчеты расхождений между высотами геоида $N_{ГНСС/Нивелирование}$ и $N_{ГТМ}$, полученными с использованием различных номинированных моделей.

В рамках статистической обработки данных была применена аддитивная модель ошибок для анализа разностей высот. Основными показателями точности модели стали: стандартное отклонение (STD), среднеквадратическая ошибка (RMSE). Статистика анализа приведена на **Рисунке 5**.

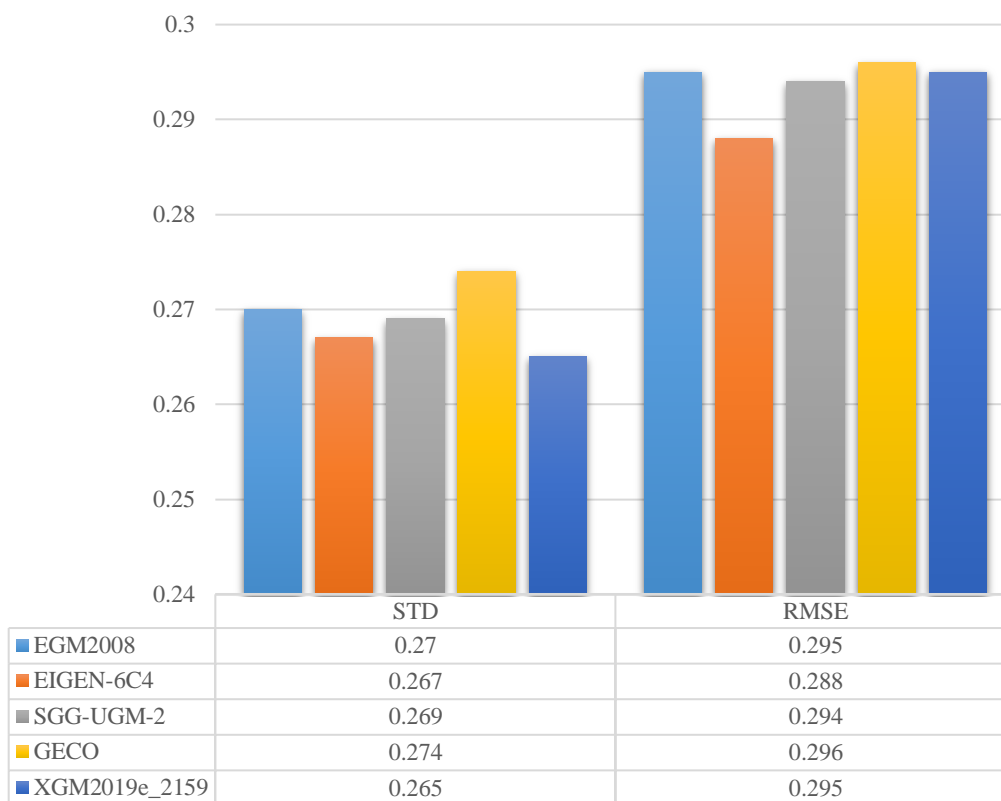


Рисунок 5 – Статистика расхождения между $N_{ГГМ}$ и $N_{\frac{ГНСС}{\text{Нивелирование}}}$ в метрах (материалы авторов)

Стандартное отклонение между ГНСС/Нивелированием и аномалиям высот EIGEN-6C4, XGM2019e_2159 составило 0.267м и 0.265м соответственно. Для остальных моделей стандартное отклонение выглядит следующим образом: SGG-UGM-2N – 0.269м, EGM2008 – 0.270м, GECO – 0.274м.

3.3 ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ГГМ НА ОСНОВЕ ЗНАЧЕНИЙ АНОМАЛИЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

В ГГМ гравитационная аномалия Буге Δg_B рассчитывается посредством сферической аппроксимации классической гравитационной аномалии минус $2\pi G\rho H$.

$$\Delta g_B(\lambda, \varphi) = \Delta g_{cl}(\lambda, \varphi) - 2\pi G\rho H(\lambda, \varphi) \quad (2)$$

где, Δg_{cl} - Классическая гравитационная аномалия; G - Гравитационная постоянная; λ, φ - эллипсоидальная долгота и широта.

Топографические высоты $H(\lambda, \varphi)$ рассчитываются на основе модели сферической гармоник DTM2006, используемой в той же максимальной степени, что и модель гравитационного поля (Barthelmes, 2013).

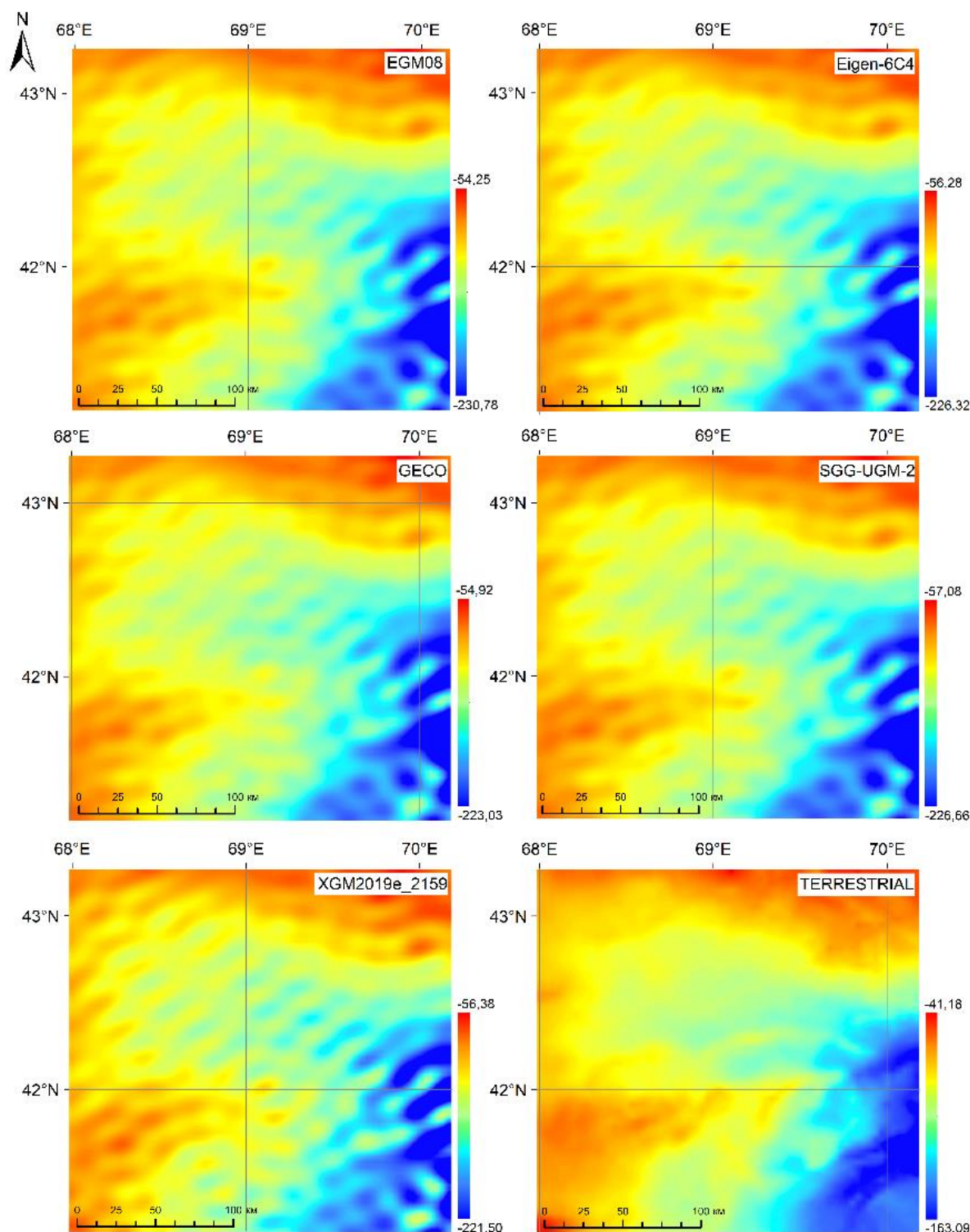


Рисунок 6 – Поле разностей наземной гравиметрической информации и данными глобальных моделей геопотенциала в мГал (материалы авторов)

Для расчета гравитационных аномалий Буге на 44796 контрольных точках был использован сервис вычислений ICGEM. Все расчеты проводились на эллипсоиде WGS-84 и в системе среднего прилива. ГГМ были усечены до максимальной степени расширения, без выполнения фильтрации. Для расчетов требуется введение геодезических координат (широты, долготы и эллипсоидальной высоты) контрольных точек. Эллипсоидальная высота преобразуется в ортометрическую высоту с использованием модели топографии в уравнении (2) и усечена при максимальной степени расширения геопотенциальной модели (Barthelmes, 2013).

$$H(\lambda, \varphi) = R \sum_{l=0}^{l_{max}} \sum_{m=0}^l P_{lm}(\sin\varphi) (C_{lm}^{topo} \cos m\lambda + S_{lm}^{topo} \sin m\lambda) \quad (3)$$

где, $H(\lambda, \varphi)$ – топографические высоты, R – базовый радиус, C_{lm}^{topo} и S_{lm}^{topo} – коэффициенты расширения.

Значения среднеквадратической разности показывают уровень точности аномалий Буге, полученных с помощью ГГМ, по отношению к наземным аномалиям Буге (Рисунок 7).

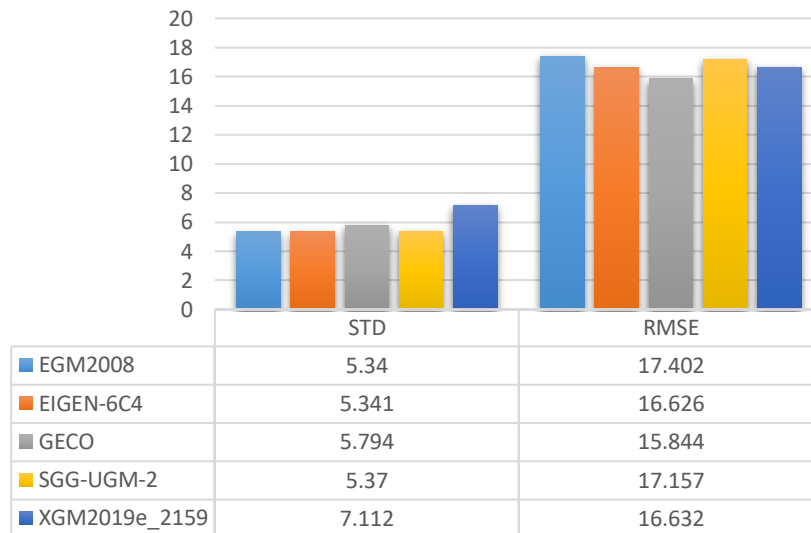


Рисунок 7 – Статистика расхождения между $\Delta g_{B(GGM)}$ и $\Delta g_{B(terrestrial)}$ в мГал (материалы авторов)

3.3 СПЕКТРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ГГМ

Одним из наиболее часто используемых методов оценки глобальных моделей гравитационного поля является суммарное рассмотрение амплитуд сигнала и шума. Сигнал может быть вычислен с помощью сферических коэффициентов 10 гармоник, в то время как шум может быть вычислен с помощью соответствующих ошибок. В процедуре оценки ICGEM были использованы амплитуды сигнала на градус, функции возмущающего потенциала на поверхности Земли, но не амплитуды ошибок на градус, поскольку не все модели включают один и тот же тип ошибок (Ince et al., 2019). Некоторые модели включают формальные ошибки, в то время как другие - калиброванные. Степенные амплитуды сигналов в моделях могут быть вычислены следующим образом:

$$\sigma_i = \sqrt{\sum_{m=0}^1 (\bar{C}_{1m}^2 + \bar{S}_{1m}^2)} \quad (4)$$

Результаты относятся к внутренней точности глобальной модели (высота геоида, гравитационная аномалия и другие функционалы). Дисперсия степени ошибки также может быть вычислена с помощью коэффициентов ошибки, связанных со сферическими гармониками, по той же формуле (уравнение 2). Результаты этого анализа не обязательно отражают характеристики модели или соотношение сигнал/шум для конкретной области или региона, но представляют характеристики модели в глобальном масштабе. В сравнении ICGEM были использованы амплитуды сигналов высот геоида в градусах, которые могут быть рассчитаны через:

$$\sigma_i(N) = R\sigma_i \quad (5)$$

Пример сравнения пяти последних статических моделей глобального гравитационного поля - моделей XGM2019e_2159, GECO, SGG-UGM-2, EGM2008 и EIGEN-6C4. - приведен на **Рисунке 8**. На каждом из следующих рисунков показаны амплитуды сигнала на градус модели и EIGEN-6C4, амплитуды разницы с сигналом EIGEN-6C4 на градус и как функция максимального градуса. Разности степени 2 не учитываются.

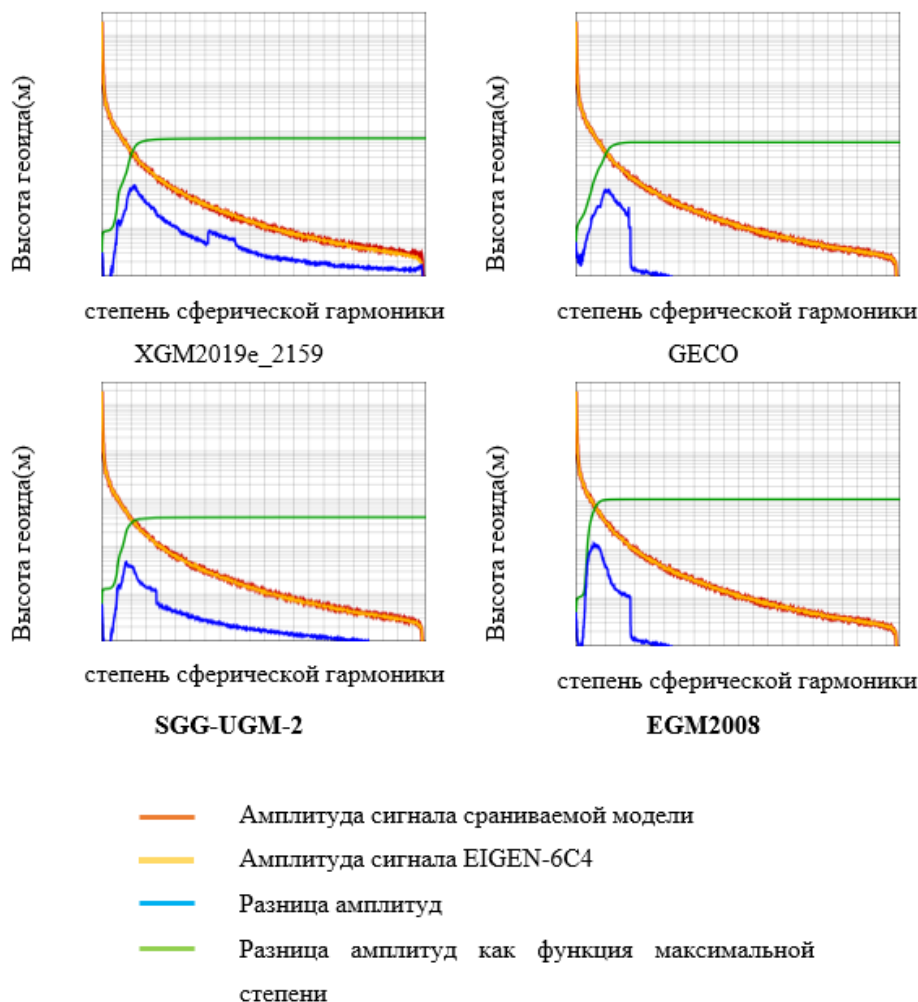


Рисунок 8 – Спектральное сравнение моделей ГГМ с моделью EIGEN-6C4 (ICGEM)

На **Рисунке 8** представлено спектральное сравнение пяти статических моделей глобального гравитационного поля. Синяя кривая представляет разницу в амплитуде статических моделей гравитационного поля на градус, а зеленая линия - суммарную разницу 5 амплитуд в зависимости от максимального градуса между моделями XGM2019e_2159, GECO, SGG-UGM-2, EGM2008 и EIGEN-6C4 в зависимости от максимального градуса.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе исследования статистически оценивалась разность между высотами геоида вычисленными по данным ГГМ и высотами ГНСС/Нивелирования.

Оценка показала:

- минимальные значения стандартного отклонение (STD) для моделей EIGEN-6C4, XGM2019e_2159, что составило 0.267м и 0.265м соответственно;
- минимальные значения среднеквадратическая ошибка (RMSE) для моделей EIGEN-6C4 – 0.288 м, SGG-UGM-2 – 0,294м.

На втором этапе оценивалась точность гравитационных аномалий Буге, рассчитанных в общей сложности по 5 ГГМ с использованием наземных аномалий Буге в 44796 контрольных точках. По результатам выявлено:

- минимальные значения стандартного отклонения (STD) для моделей EGM2008 – 5.34 мГал, EIGEN-6C4 – 5,341 мГал;

- минимальные значения среднеквадратической ошибки (RMSE) для моделей П GECO – 15,844 мГал, EIGEN-6C4 – 16,626 мГал.

В третьем этапе некоторые из наиболее эффективных моделей дополнительно сравниваются с использованием спектральной информации, содержащейся в их коэффициентах сферических гармоник.

5 ВЫВОДЫ

Было изучено современное состояние моделей гравитационного поля Земли. В целях моделирования геоида было необходимо подобрать ГГМ, которые наилучшим образом будут описывать длинноволновой компонент для локального геоида. В этой работе были проанализированы ГГМ: XGM2019e_2159, GECO, SGG-UGM-2, EIGEN-6C4, EGM2008. Выбор моделей основан на нескольких критериях: максимальная степень и порядок, разнообразие источников данных и новизна.

Оценка проводилась в три этапа. На первом этапе ГГМ оценивались с использованием 112 точек ГНСС/Нивелирования. На втором этапе была проведена оценка выбранных ГГМ на основе вычисленной производной – аномалий Буге. На третьем этапе некоторые из наиболее эффективных моделей дополнительно сравнивались с использованием спектральной информации, содержащейся в их коэффициентах сферических гармоник.

Модель EIGEN-6C4 продемонстрировала преимущества перед другими ГГМ (XGM2019e_2159, GECO, SGG-UGM-2, EGM2008), тем самым показывая высокую эффективность.

Для решения задач по определению ортометрических высот на местности с применением ГНСС технологии существенно удешевит и заменит проведение трудоемких нивелирных работ. Основываясь на результатах оценки решено, что EIGEN-6C4 является наиболее подходящей моделью для создания локального геоида, которая в будущем внесет вклад в развитие геодезии в гражданском строительстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Apeh, O. I., Moka, E. C., & Uzodinma, V. N.** (2018). Evaluation of gravity data derived from global gravity field models using terrestrial gravity data in Enugu State, Nigeria. *Journal of Geodetic Science*, 8(1), 145-153. <http://doi.org/10.1515/jogs-2018-0015>
2. **Ariff, N. S. E., Olesen, A. K., Yaacob, N. M., & Sulaiman, S. A. H.** (2021). Evaluation of gravity anomaly and geoid height derived from various global geopotential model. In 2021 IEEE 12th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC) (pp. 34-39). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSGRC53186.2021.9515205>
3. **Barthelmes, F.** (2013). Definition of functionals of the geopotential and their calculation from spherical harmonic models. (Scientific Technical Report STR, 09/02). iass-potsdam.de/pubman/item/escidoc, 104132(3), 0902-2. <https://doi.org/10.2312/GFZ.b103-09026>
4. **Bruinsma, S., Lemoine, J. M., Biancale, R., & Valès, N.** (2010). CNES/GRGS 10-day gravity field models (release 2) and their evaluation. *Advances in Space Research*, 45(4), 587-601. <http://doi.org/10.1016/j.asr.2009.10.012>

5. Featherstone, W. E., Dentith, M. C., & Kirby, J. F. (1998). Strategies for the accurate determination of orthometric heights from GPS. *Survey review*, 34(267), 278-296. <https://doi.org/10.1179/sre.1998.34.267.278>
6. Flury, J., & Rummel, R. (2009). On the geoid–quasigeoid separation in mountain areas. *Journal of geodesy*, 83, 829-847. <http://doi.org/10.1007/s00190-009-0302-9>
7. Förste, C., Bruinsma, S. L., Abrikosov, O., Lemoine, J. M., Marty, J. C., Flechtner, F., Balmino, G., Barthelmes, F., Biancale, R. (2014). EIGEN-6C4 The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse. *GFZ Data Services*, 10(10.5880). <https://doi.org/10.5880/icgem.2015.1>
8. Gilardoni, M., Reguzzoni, M., & Sampietro, D. (2016). GECO: a global gravity model by locally combining GOCE data and EGM2008. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 60, 228-247. <https://doi.org/10.1007/s11200-015-1114-4>
9. Hofmann-Wellenhof, B., & Moritz, H. (2006). *Physical geodesy*. Springer Science & Business Media.
10. Ince, E. S., Barthelmes, F., Reißland, S., Elger, K., Förste, C., Flechtner, F., & Schuh, H. (2019). ICGEM–15 years of successful collection and distribution of global gravitational models, associated services, and future plans. *Earth system science data*, 11(2), 647-674. <https://doi.org/10.5194/essd-11-647-2019>
11. International Centre for Global Earth Models (ICGEM) [Electronic source] (2024). URL: <http://icgem.gfz-potsdam.de/home>
12. Kim, J. W., von Frese, R. R., Lee, B. Y., Roman, D. R., & Doh, S. J. (2011). Altimetry-derived gravity predictions of bathymetry by the gravity-geologic method. *Pure and Applied Geophysics*, 168, 815-826. <http://doi.org/10.1007/s00024-010-0170-5>
13. Kumar Ghosh, J., & Nath Mishra, U. (2016). Determination of geoid undulation by astro-geodetic method. *Journal of surveying engineering*, 142(3), 05015007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000152](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000152)
14. Liang, W., Li, J., Xu, X., Zhang, S., & Zhao, Y. (2020). A high-resolution Earth's gravity field model SGG-UGM-2 from GOCE, GRACE, satellite altimetry, and EGM2008. *Engineering*, 6(8), 860-878. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.05.008>
15. Pavlis, N. K., Holmes, S. A., Kenyon, S. C., & Factor, J. K. (2012). The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). *Journal of geophysical research: solid earth*, 117(B4). <https://doi.org/10.1029/2011JB008916>
16. Pham, H. T., Claessens, S., Kuhn, M., & Awange, J. (2023). Performance evaluation of high/ultra-high-degree global geopotential models over Vietnam using GNSS/leveling data. *Geodesy and Geodynamics*, 14(5), 500-512. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2023.03.002>
17. RIES, J., BETTADPUR, S., EANES, R., KANG, Z., KO, U. D., MCCULLOUGH, C., NAGEL, P., PIE, N., POOLE, S., & TAPLEY, B. (2016). The development and evaluation of the global gravity model GGM05. <http://doi.org/10.26153/tsw/1461>
18. Savchuk, S., & Fedorchuk, A. (2024). Methodology for local correction of the heights of global geoid models to improve the accuracy of GNSS leveling. *Geodesy and Geodynamics*, 15(1), 42-49. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2023.02.005>
19. Shoganbekova D., Fan H., Pentayev T. (2015). Gravimetric geoid model over Kazakhstan. *Proceedings of the 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management (SGEM)*, 2(2), pp. 283-290. <https://doi.org/10.5593/SGEM2015/B22/S9.035>

19. **Sideris, M., Willi, F., Zuhair, N. M., & Thomas, S.** (2014). Geodetic world height system unification. Handbook of geomathematics, 1-16. http://doi.org/10.1007/978-3-642-27793-1_83-1
20. **Tapley, B. D., Bettadpur, S., Ries, J. C., Thompson, P. F., & Watkins, M. M.** (2004). GRACE measurements of mass variability in the Earth system. Science, 305(5683), 503-505. <https://doi.org/10.1126/science.1099192>
21. **Yilmaz, M., & Kozlu, B.** (2018). The comparison of gravity anomalies based on recent high-degree global models. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 18(3), 981-990. <http://doi.org/10.5578/fmbd.67502>
22. **Yilmaz, M., Turgut, B., Gullu, M., & Yilmaz, I.** (2016). Evaluation of recent global geopotential models by GNSS/Levelling data: internal Aegean region. International Journal of Engineering and Geosciences, 1(1), 18-23. <http://doi.org/10.26833/ijeg.285221>
23. **Zingerle, P., Brockmann, J. M., Pail, R., Gruber, T., & Willberg, M.** (2019). The polar extended gravity field model TIM_R6e. <https://doi.org/10.5880/ICGEM.2019.005>