

СТАТЬЯ

УДК 528.21

DOI 10.17513/use.38043

**ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ГЛОБАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ГЕОИДА
НА ТЕРРИТОРИИ АФГАНИСТАНА**^{1,2}Сафари М.А., ²Льонг Т.Л.¹*Кабульский политехнический университет, Кабул, e-mail: safaryamin1361@gmail.com;*²*Государственный университет по землеустройству, Москва*

В настоящее время основной метод, используемый в области геодезии, является глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС). ГНСС дает трехмерные координаты, на основе которых получают высоту над эллипсоидом. В инженерных целях пользуются ортометрическими высотами, т.е. высотами над геоидом. При помощи глобальной модели геоида (ГГМ) получают ортометрические высоты. В данном исследовании рассмотрены особенности применения многообразных моделей геоида для определения ортометрических высот точек земной поверхности по данным ГНСС измерений для территории Афганистана, а также выполнена оценка точности моделей геоида по разностям аномалий высот, вычисленных для пунктов спутниковых измерений по данным наземных измерений и данным моделей. Для анализа и оценки глобальной модели геоида (ГГМ) на территории Афганистана высоты геоида из пяти последних глобальных моделей (EGM2008, EIGEN-6C4, GECO, SGGUGM-1 и XGM2019e_2159) сравниваются с высотами геоида на пункты ГНСС/нивелирования. Целью этого процесса является использование преимуществ глобальных моделей геоида на территориях, не освещенных ГНСС/нивелирования, и улучшение точности локальных моделей с минимизацией погрешности глобальной модели геоида. В данном исследовании анализ и оценка глобальной модели геоида выполняется с использованием ГНСС/нивелирования на разных расстояниях и различным топографическим состоянием. Оценка точности и подбор глобальной модели на территории Афганистана в этом исследовании осуществлена в трёх местах: автотрасса Бамиан–Баглан, автотрасса Кабул–Торхам и автотрасса Джабальсраж–Хавак. В соответствии с достигнутыми данными, результаты исследования показывают, что на территории исследования из пяти глобальных моделей точности модель XGM2019e_2159 по величине среднеквадратичной погрешности (СКП) имеет лучший результат. Значение погрешности модели XGM2019e_2159 на трех трассах составляет 0.010м на километр по сравнению с пунктами ГНСС/нивелирования.

Ключевые слова: анализ и оценка точности, ГНСС/нивелирование, рельеф, среднеквадратичные погрешности, глобальная модель геоида

**ACCURACY ASSESSMENT OF GLOBAL GEOID MODELS
ON THE TERRITORY AFGHANISTAN**^{1,2}Safari M.A., ²Luong T.L.¹*Kabul Polytechnic University, Kabul, e-mail: safaryamin1361@gmail.com;*²*State University of Land Use Planning, Moscow*

Recently, one of the main methods used in the field of geodesy Global Navigation Satellite System (GNSS). GNSS provide three-dimensional coordinate, which calculate altitude above the ellipsoid. For engineering purposes, orthometric heights, i.e., heights above the geoid, are used; global geoid model (GMG) will produce orthometric heights. In this study, the possibility of using a variety of geoid models to determine the orthometric altitudes of points on the Earth's surface for the territory of Afghanistan was analyzed based on GNSS measurements. The accuracy of geoid models was evaluated by differences in elevation anomalies calculated for satellite measurement points from ground-based measurements and model data. To estimate and analyze the application of GMG for Afghanistan, geoid heights from the last five global models (EGM2008, EIGEN-6C4, GECO, SGGUGM-1 and XGM2019e_2159) were compared with geoid heights on GNSS/leveling points. The objectives of this process were to take the advantage of global geoid models in areas where not illuminated by GNSS/leveling and to improve the accuracy of local models while minimizing geoid error. In this study, the analysis and evaluation of the global geoid model carried out employing GNSS levelling at various distances and different topographic conditions. In this study, accuracy assessments and global model selection for Afghanistan was carried out in three locations: Bamyán–Baghlan highway, Kabul–Torkham highway and Jabalsraj–Hawak highway. The results of analyzes indicated that the XGM2019e_2159 global model is more accurate for territory of Afghanistan compared to the others based on root mean square error (RMSE). The XGM2019e_2159 error value on three traces is 0.010m per kilometer compared to GNSS/leveling points.

Keywords: analysis and evaluation of accuracy, GNSS/leveling, global geoid model, relief, root mean square errors

Применение спутниковых методов основано на использовании геоцентрических координат, для решения инженерных задач в этих областях эффективно используются спутниковые данные с известными значениями параметров земного эллипса и формы геоида. ГНСС представляют трехмерные координаты, которые обеспечивают высоту над эллипсоидом. Геодезические высоты имеют только математическое обоснова-

ние, не обладающее физическим значением. Ортометрические высоты применяются в геодезических работах, т.е. высоты над геоидом с помощью ГГМ [1]. Именно эти модели можно рассматривать как эталон для выполнения геодезических работ [2].

Последние варианты моделей ГГМ приобретают все более детальную и точную форму, теперь глобальная топография определяется спутниковыми методами не-

зависимо от данных наземного гравитационного поля [3].

Международный центр глобальных моделей Земли (ICGEM) постоянно анализирует производительность каждой новой выпущенной модели ГГМ по нескольким контрольным пунктам ГНСС/нивелирования по всему миру [4]. На настоящий момент существует около 200 моделей гравитационного поля Земли (ГПЗ), выражающих гравитационное поле Земли и, соответственно, высоты геоида сферическими, гармоническими, базисными функциями [5].

Самыми современными спутниками, которые внесли большой вклад в совершенствование моделирования глобального гравитационного поля, являются специальные гравитационные миссии CHAMP (CHALLENGING Minisatellite Payload) [6], GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) [7]. Известно, что гравиметрическая модель геоида может быть подвергнута ошибкам из-за погрешностей как в наблюдаемых гравитационных данных, так и в конкретном районе [8].

Точность глобальных моделей различается от нескольких сантиметров до нескольких метров в разных странах, это зависит от точности и количества используемых данных.

Для районов с горной местностью разница между высотами геоида на ГГМ и высотами, полученными геометрическим методом, может достигать нескольких метров [9].

Локально рассматриваемое моделирование ГГМ удобнее в районах с относительно однородным полем. Поэтому, если поле в моделируемой области имеет сложную структуру, рекомендуется сначала разделить его на области, в каждой из которых поле однородно [10].

Поэтому исследование глобальных моделей может помочь установить и выбрать наиболее подходящую глобальную модель, которая наилучшим образом соответствует спектральным свойствам гравитационного/геоидного поля в районе Афганистана.

Афганистан имеет очень разнообразный рельеф, а большая часть центральной и северо-восточной территории страны представляет собой очень высокие горы, где сбор данных практически невозможен. Поэтому при создании и оценке точности глобальной модели необходимо знать, какая модель имеет наилучшую точность. В данном исследовании пять последних глобальных моделей проанализированы и оценены с помощью данных ГНСС/нивелирования. Кроме того, оценивалось влияние рельефа,

плотности контрольных пунктов на повышение или уменьшение точности модели.

Сравнение геопотенциальных моделей с независимыми данными на исследуемой территории является наиболее информативным способом определения наиболее подходящей ГГМ для последующих исследований гравиметрического геоида. Модель геопотенциала, которая обеспечивает наиболее близкое статистическое соответствие наблюдаемым наземным данным, может быть принята за наиболее подходящую модель для определения гравиметрического геоида в Афганистане, таким образом, целью данного исследования является анализ и оценка глобальной модели геоида с использованием ГНСС/нивелирования на различном расстоянии и разным топографическим состоянием на территории Афганистана.

Материалы и методы исследования

Выбор глобальной модели геоида на территории Афганистана в этом исследовании осуществлён в трёх местах: автотрасса Бамиан–Баглан в центре Афганистана, автотрасса Торхам–Кабул на юго-востоке и трасса Джабальсраж–Хавак восточнее Афганистана. На рисунке 1 показано расположение зоны исследования.

Автотрасса Бамиан–Баглан простирается примерно на 83 км под углом $238^{\circ}11'53''$, средняя высота 1154 м, начинается в Души ($\varphi = 35^{\circ}36'9.63''$, $\lambda = 68^{\circ}40'9.78''$, провинция Баглан, кончается в регионе Бамиан ($\varphi = 35^{\circ}13'47.7''$, $\lambda = 67^{\circ}58'10.6''$), трасса включает 22 ГНСС и нивелирные пункты на среднем расстоянии 4 км.

Маршрут Джабальсраж–Хавак – это горный район, который начинается из района Джабальсраж под углом $50^{\circ}2'21''$ ($\varphi = 35^{\circ}07'14.88''$, $\lambda = 69^{\circ}13'57.05''$), на расстоянии более 120 километров, заканчивается в Хавах на $\varphi = 35^{\circ}45'54.49''$, $\lambda = 70^{\circ}11'09.67''$. В этом маршруте расположено 63 пункта ГНСС и нивелиров на среднем расстоянии 1.5 км, средняя высота этой трассы равна примерно 2269 метрам.

Маршрут Кабул–Торхам начинается под направлением $104^{\circ}31'40''$ от Кабул при ($\varphi = 34^{\circ}42'40.41''$, $\lambda = 69^{\circ}14'13.13''$), на расстоянии более 200 км, заканчивается на Торхам ($\varphi = 34^{\circ}07'42.37''$, и $\lambda = 71^{\circ}05'08.04''$). На дороге Кабул–Торхам 43 ГНСС и нивелирных пунктов, которые расположены на среднем расстоянии около 5 км, средняя высота этой трассы составляет примерно 838 метров.

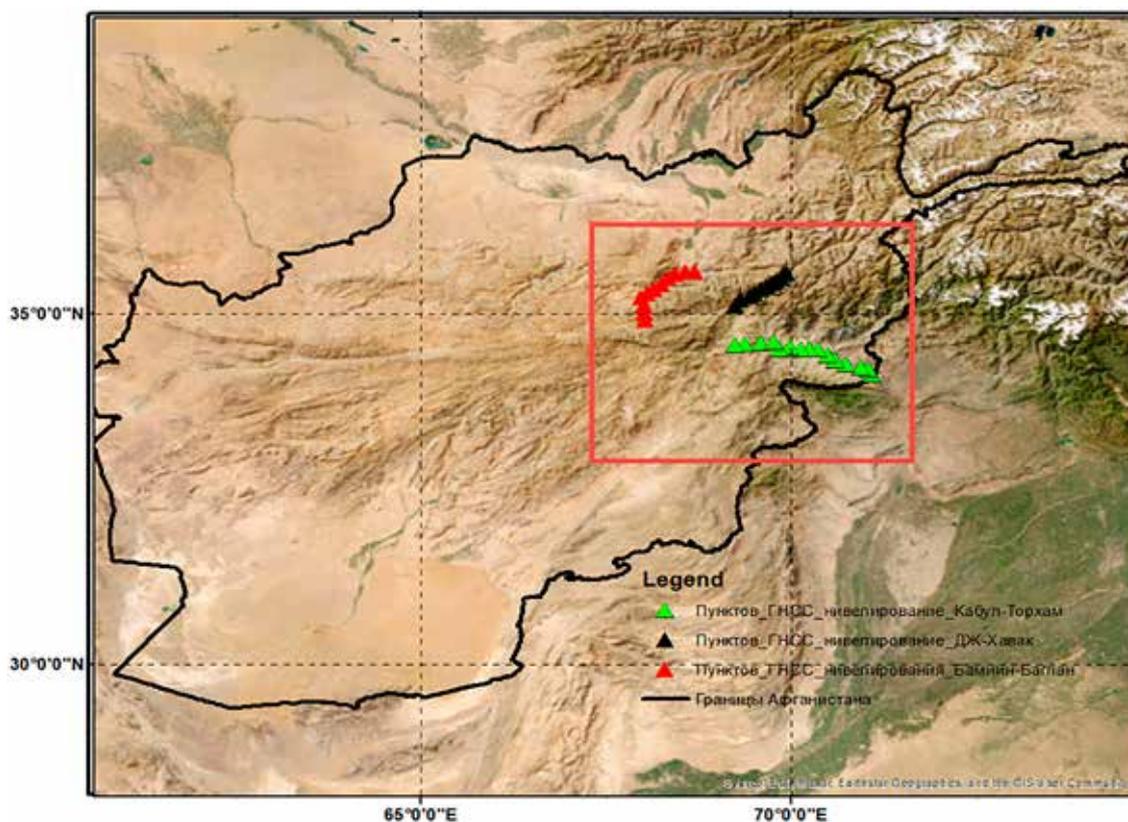


Рис. 1. Области исследования

Погрешность ортометрической высоты определения равна $\pm 10 \text{ mm} \sqrt{L}$. Геодезические высоты рассчитывались для каждой станции с погрешностью не более ± 1.5 см. В данном исследовании выбрано несколько ГМГ из веб-сайта Global Gravity Field Models по основным признакам: максимальная степень и порядок, различные источники данных, современность и средние квадратические значения, разница высот геоида на контрольные пункты ГНСС/нивелирования. По критериям модели XGM2019e_2159, SGG-UGM-2, GECO, EIGEN-6C4 и EGM2008 являются наиболее подходящими моделями.

Для получения оценки точности глобальной модели на исследуемой территории необходимо сравнить ее высоту с высотой ГНСС/нивелирования, которая обладает высокой точностью. Это сравнение поможет выяснить, какая глобальная модель имеет наилучшую точность на исследуемой территории, и для каких геодезических работ можно использовать. Этапы ее реализации следующие:

Высота геоида в контрольных пунктах вычисляется по следующей формуле [11];

$$\zeta_{\text{ГНСС/нивил}} = H - H^g \quad (1)$$

где $\zeta_{\text{ГНСС/нивил}}$ – высота геоида, H – геодезическая высота и H^g – ортометрическая высота.

- Получение высоты желаемых глобальных моделей ($\zeta_{\text{ГМЗ}}$) из сайта Международного центра глобальных моделей Земли (ICGEM)

- Вычисление разности между высотами $\zeta_{\text{ГМ}}$ и $\zeta_{\text{ГНСС/нивил}}$;

$$\Delta\zeta = \zeta_{\text{ГНСС/нивил}} - \zeta_{\text{ГМ}} \quad (2)$$

где $\Delta\zeta$ – разности высот геоида, $\zeta_{\text{ГНСС/нивил}}$ – измеренная высота геоида, $\zeta_{\text{ГМ}}$ – высоты геоида из глобальных моделей Земли.

Точность ГМ оценена по следующей формуле

$$\text{СКП} = \sqrt{\frac{\sum \Delta\zeta_i^2}{n-1}} \quad (3)$$

где СКП – среднеквадратичная погрешность, n – число измерений.

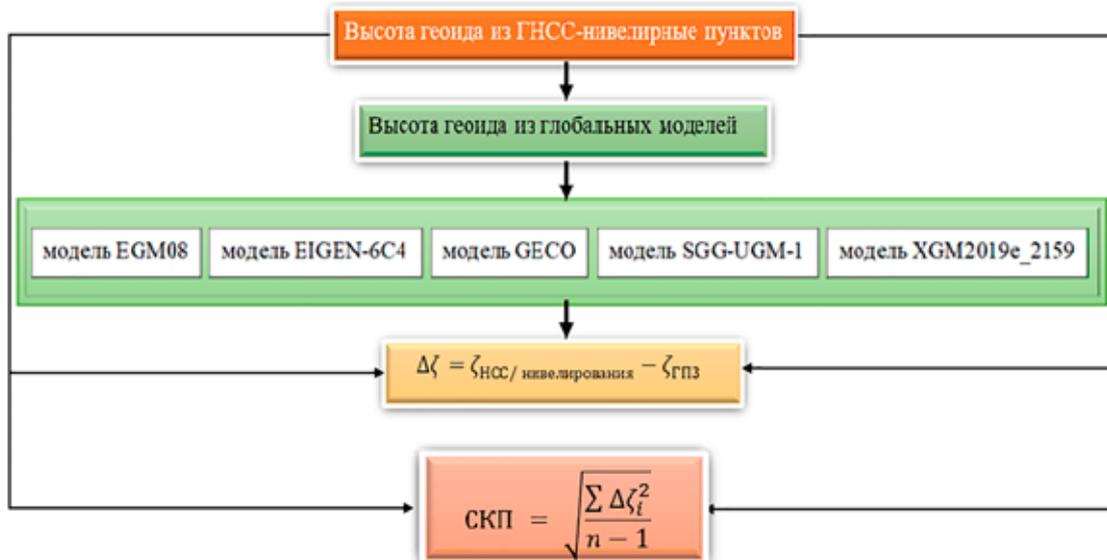


Рис. 2. Блок-схема используемой методики

Процесс реализации получения результатов исследования представлен на рисунке 2.

Результаты исследования и их обсуждение

Соответствие ГМ локальным наблюдаемым данным ГНСС/нивелирования в районе Афганистана не очень хорошее из-за того, что в создании этих моделей было использовано меньше наземных данных. Афганистан имеет очень разнообразный рельеф, а большая часть центральной и северо-восточной территории страны представляет собой очень высокие горы, где сбор данных практически невозможен. Соответственно, можно ожидать большую неоднородность наблюдаемых данных по сравнению

с глобальными моделями геопотенциала из-за особенностей условий поля.

Как следует из рисунков 3, 4 и 5 из сравнения пяти выбранных глобальных моделей в районах исследования с пунктами ГНСС/нивелирования, ни одна из этих моделей не имеет одинаковых значений высоты геоида (ζ).

Оценки точности глобальных моделей определяются по величине СКП, которая получается из разницы их высоты относительно пункта ГНСС/нивелирования ($\Delta\zeta$). В таблице 1 показаны значение СКП глобальных моделей геоидов EGM2008, EIGEN-6C4, GECO, SGG-UGM-2 и XGM2019e_2159, на трассах Бамиан–Баглан, Жабальсраж–Хавак, и Кабул–Турхам.

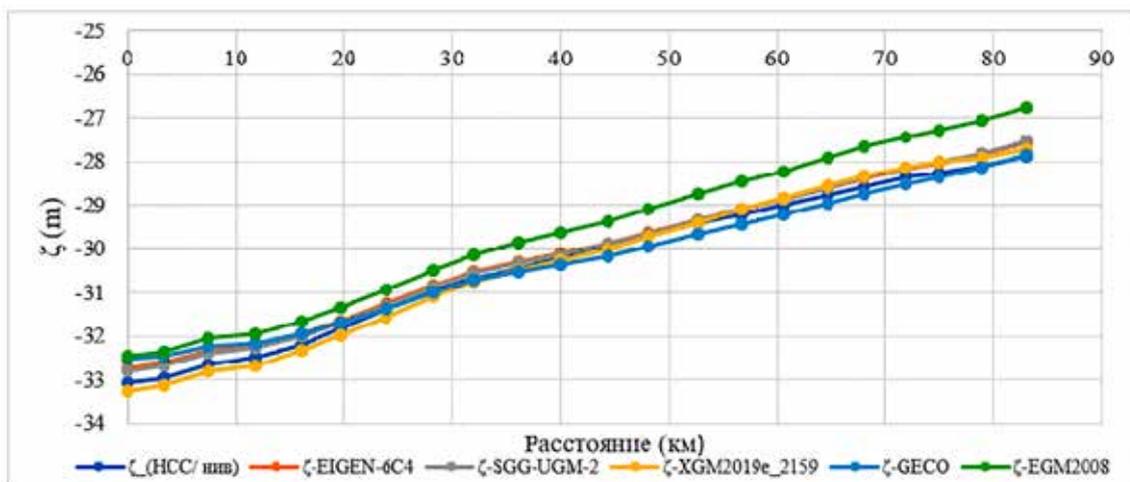


Рис. 3. Значение ζ из ГМ и ГНСС/нивелирование на трассы Бамиан–Баглан

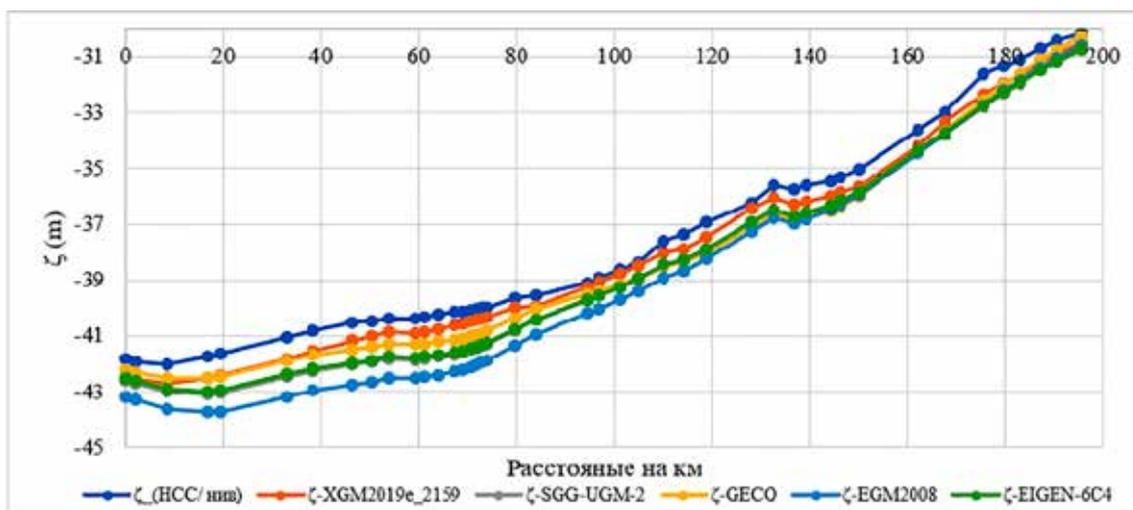


Рис. 4. Значение ζ из ГТМ и ГНСС/нивелирование на трассы Кабул–Турхам

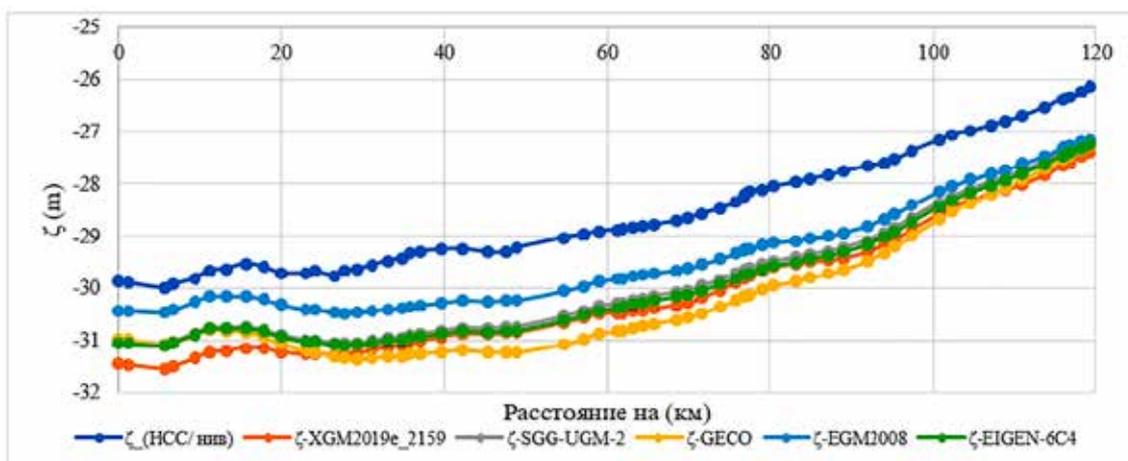


Рис. 5. Значение ζ из ГТМ и ГНСС/нивелирование на трассы Жабальсраж–Хавак

Таблица 1

Значение СКП глобальных моделей геоидов
трассах Бамиан–Баглан, Жабальсраж–Хавак, и Кабул–Турхам

Параметр (м)	EIGEN-6C4	SGG-UGM-2	XGM2019e_2159	GECO	EGM2008
СКП (Бамиан–Баглан)	0.096	0.098	0.080	0.256	0.198
СКП (Жабальсраж–Хавак)	0.183	0.170	0.121	0.335	0.185
СКП (Кабул–Турхам)	0.307	0.324	0.170	0.258	0.551

Согласно результатам оценки, глобальные модели, выбранные в районе исследования, имеют различные значения СКП, поэтому нужно выбрать модель, которая

имеет наименьшее значение СКП на всех трассах. Модель XGM2019e_2159 является наиболее подходящей в районе исследования (рис. 6).

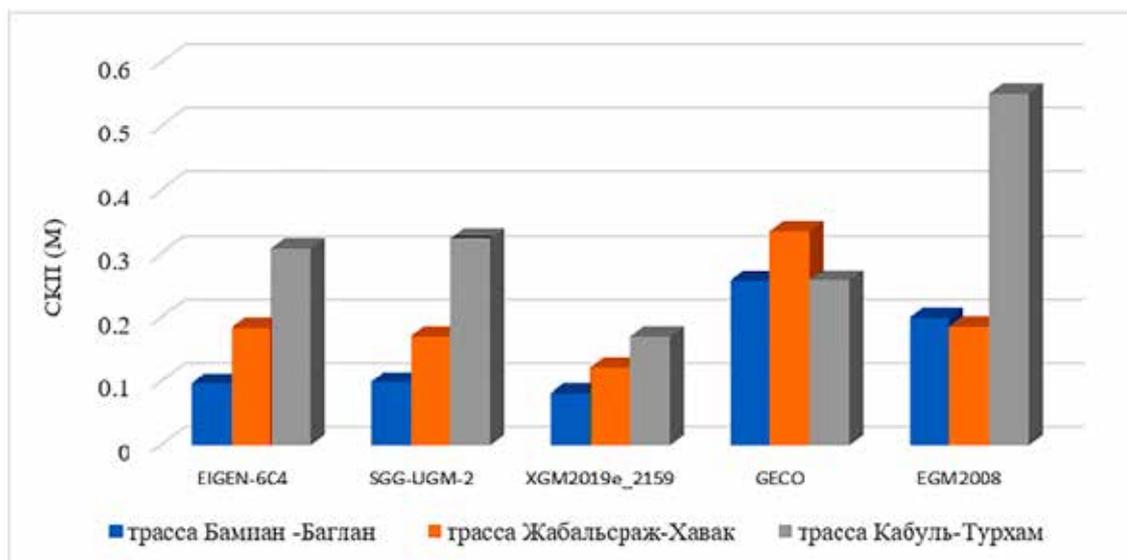


Рис. 6. Значение СКП глобальных моделей геоида на территории Афганистан

Согласно таблице 1 и рисунку 6 видно, что на территории Афганистана из пяти выбранных ГГМ точности модель XGM2019e_2159 по величине СКП имеет лучший результат по сравнению с другими ГГМ. Значение погрешности модели XGM2019e_2159 на трассах Бамиан–Баглан, Жабальсраж–Хавак и Кабул–Турхам составляет 0,08 м, 0,120 м и 0,170 м, соответственно, на расстояниях 83 км, 120 км и 200 км. Это означает, что точность глобальной модели XGM2019e_2159 снижается на один сантиметр на каждом километре расстояния от пункта ГНСС/нивелирования. Таким образом, чтобы определить правильную вы-

соту геоида в любой точке (ζ_{pi}) модели XGM2019e_2159, можно использовать следующее уравнение:

$$\zeta_{pi} = \zeta_{ГГМi} - \Delta\zeta_A + (d_{Ai} / d_{AB})\Delta\zeta_{ГНСС/нив} \pm 1cm \times d_{Ai},$$

где $\zeta_{ГГМi}$ – высота геоида из XGM2019e_2159;

$$\Delta\zeta_A = \Delta\zeta_{ГГМА} - \Delta\zeta_{ГНСС/нивA};$$

$\Delta\zeta_{ГНСС/нив}$ – разница высот геоида между двумя смежными пунктами ГНСС/нивелирования;

d_{AB} – расстояние от А до В;

d_{Ai} – расстояние на км от А до новой точки.

Таблица 2

Статистика влияния рельефа на значения СКП на 51 км трассы Бамиан–Баглан

Расстояние (км)	Координат			$\zeta_{ГНСС/нив}$ (м)	$\zeta_{XGM2019e_2159}$	$\Delta\zeta$ (м)
	φ°	λ°	Высота (м)			
0	35.5392855	68.3611809	1057.365	-30.669	-30.7483	0.079
8	35.4833946	68.3065176	1131.814	-30.214	-30.253	0.039
16	35.4267659	68.2484541	1165.043	-29.693	-29.7398	0.047
29	35.3529052	68.1528602	1291.209	-28.983	-28.8243	-0.159
40	35.2884972	68.0638268	1400.572	-28.347	-28.1261	-0.221
51	35.2294109	67.9692577	1515.919	-27.887	-27.7296	-0.157
		Среднее	1260.320	-29.299	-29.237	-0.062
		Макс.	1515.919	-27.887	-27.730	0.079
		Мин.	1057.365	-30.669	-30.748	-0.221
		СКП				0.131

Таблица 3

Статистика влияния рельефа на значения СКП на 49 км трассы Жабальсраж–Хавак

Расстояние (км)	Координат			$\zeta_{\text{ГНСС/нив}}$ (м)	$\zeta_{\text{XGM2019e}_2159}$	$\Delta\zeta$ (м)
	φ°	λ°	Высота (м)			
0	35.4746380	69.7967220	2238.834	-28.664	-30.293	1.628
10	35.5410310	69.8802210	2353.665	-28.052	-29.600	1.548
22	35.6039030	69.9666570	2518.134	-27.666	-29.314	1.648
32	35.6597450	70.0574130	2764.832	-27.068	-28.468	1.400
41	35.7093160	70.1271950	2982.435	-26.704	-28.013	1.310
49	35.7651370	70.1860190	3488.913	-26.137	-27.404	1.267
		Среднее	2724.469	-27.382	-28.849	1.467
		Макс.	3488.913	-26.137	-27.404	1.648
		Мин.	2238.834	-28.664	-30.293	1.267
		СКП				0.164

Таблица 4

Статистика влияния рельефа на значения СКП на 50 км трассы Кабул–Турхам

Расстояние (км)	Координат			$\zeta_{\text{ГНСС/нив}}$ (м)	$\zeta_{\text{XGM2019e}_2159}$	$\Delta\zeta$ (м)
	φ°	λ°	Высота (м)			
0	34.1284364	71.0855664	706.375	-41.834	-42.542	0.708
9	34.1999181	71.0480871	479.224	-42.032	-42.696	0.665
19	34.2356420	70.9420502	441.038	-41.611	-42.402	0.790
33	34.2541226	70.7953948	509.401	-41.043	-41.815	0.772
38	34.2698613	70.7421114	536.043	-40.794	-41.552	0.758
50	34.3137576	70.6227246	634.090	-40.467	-40.996	0.530
		Среднее	551.029	-41.297	-42.001	0.704
		Макс.	706.375	-40.467	-40.996	0.790
		Мин.	441.038	-42.032	-42.696	0.530
		СКП				0.097

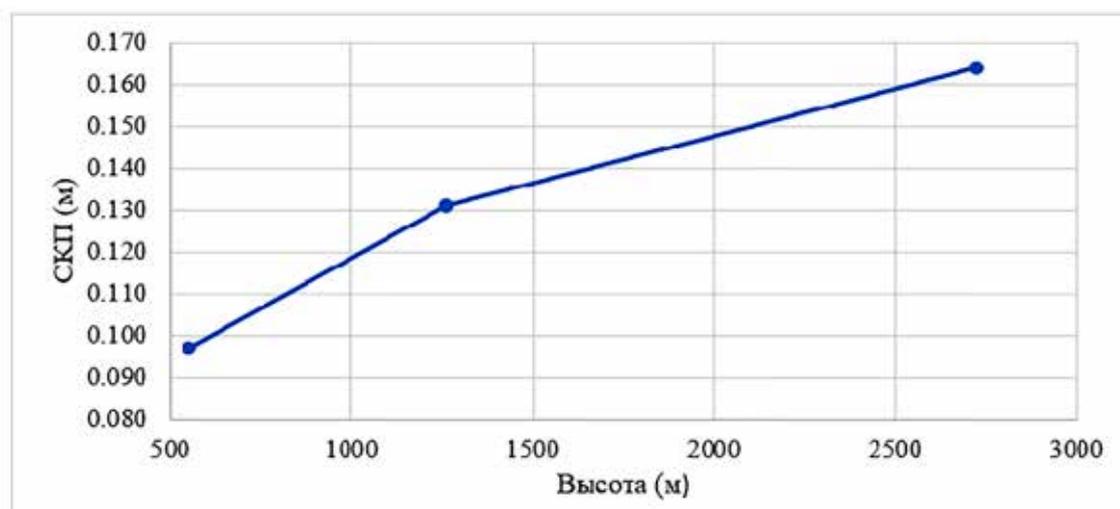


Рис. 7. Влияние рельефа на точность модели геоида

Оценку точности рассматриваемого ГГМ удобнее проводить на участках с максимально однородным полем. Поэтому, если исследуемая область имеет сложную структуру, точность модели следует оценивать по малым частям. На этой основе исследовано влияние топографии на точность модели XGM2019e_2159, на одинаковом расстоянии 50 км и пункты ГНСС/нивелирования, через каждые 10 км, на трассе Бамиан–Баглан, Кабул–Турхам и Жабальсраж–Хавак. В таблицах 2, 3 и 4 показано влияние топографии в районе исследования на значения СКП.

На основе результатов таблиц 3, 4 и 5, взаимосвязь между топографией местности и точностью ГГМ, представлена в виде графика (рис. 7).

Из рисунка 7 видно, что рельеф имеет прямое влияние на точность модели. Для того, чтобы улучшить точность локальной модели геоида с помощью вспомогательных земных измерений, необходимо знать условия рельефа, потому что характер и сложность поля играет важную роль в выборе количества наземных точек.

Заключение

Полученная достоверно измеренная высота геоида на основе ГНСС наблюдения для выполнения задач в сфере геодезической работ в настоящее время является одной из основных комплексных задач. Данное исследование было проведено с целью оценки точности глобальных моделей геоида при выборе наилучшей модели глобального геоида на территории Афганистана и изучения влияния сложности поля на ее точность.

Результат исследования по выбору лучшей модели из таблицы 1 и рисунка 6 показывает, что на территории Афганистана из пяти выбранных ГГМ точность модели XGM2019e_2159 по величине СКП имеет лучший результат по сравнению с другими ГГМ. Значение погрешности модели XGM2019e_2159 на трех трассах составляет 0.010м на километр по сравнению с пунктами ГНСС/нивелирования. Это означает, что можно определить высоту геоида в любой

точке с точностью до 1 сантиметра на каждый километр расстояния от контрольных пунктов ГНСС/нивелирования.

Для проверки влияния рельефа на точность модели геоида применялось почти одинаковое расстояние (50 км) и пункты ГНСС/нивелирования, через каждые 10 км на трех трассах. Численные значения среднего значения СКП модели геоида XGM2019e_2159, полученные в результате предыдущего анализа, из-за неоднородности территории получились разные. Это свидетельствует о том, что точность модели прямо пропорциональна количеству наземных контрольных пунктов и обратно пропорциональна сложности территории.

Список литературы

1. Баранов В.Н., Елшеви М.А., Эль Мокдад Б.Р., Фунг Ч.Т. Исследования по созданию локальных моделей геоида для прибрежных территорий Египта // Успехи современного естествознания. 2021. № 1. С. 32-38.
2. Doganalp S. Geoid height computation in strip-area project by using least-squares collocation. Acta Geodyn. Geomater. 2016. Vol. 13, Is. 2. P. 182.
3. Barthelmes F., Köhler W. International Centre for Global Earth Models (ICGEM) // Journal of Geodesy. 2016. Vol. 90, Is. 10. P. 907–1205.
4. Al-Krargy E.M., Hosny M.M., Dawod G.M. Investigating the precision of recent global geoid models and global digital elevation models for geoid modelling in Egypt. RN. 2015. Vol. 4, Is. 1. P. 1-12.
5. Шоганбекова Д.А. Разработка алгоритмов вычисления аномалий высот и моделирование гравиметрического геоида Республики Казахстан: дис. ... докт. филос. наук. Алматы, 2015. 123 с.
6. Kvas A., Brockmann J.M., Krauss S., Schubert T., Gruber T., Meyer U., Mayer-Gürr T., Schuh W.D., Jäggi A., Pail R. GOCO06s—a satellite-only global gravity field model // Earth System Science Data. 2021. Vol. 13, Is. 1. P. 99-118.
7. Tapley B.D., Bettadpur S., Ries J.C., Thompson P.F., Watkins M.M. GRACE measurements of mass variability in the Earth system. Science. 2004. Vol. 305, Is. 5683. P. 503–505.
8. Sadiq M., Ahmad Z. On the selection of optimal global geopotential model for geoid modeling: a case study in Pakistan. Advances in space research. 2009. Vol. 44, Is. 5. P. 627-639.
9. Дмитренко А.П. Современные трансформации определения геоида // Кривой Пог: Минерал. 2012. № 1 (2). С.110-118.
10. Суганпова Л.С. Разработка и исследование методов разномасштабного моделирования геопотенциала: дис. ... докт. тех. наук. Москва, 2018. 325 с.
11. Елшеви М.А. Разработка методики создания модели геоида на территории Египта по данным ГНСС наблюдений на береговых линиях: дис. ... канд. тех. наук. Москва, 2022. 144 с.