

УДК: 528.93

DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-568-579

Д.Ш. Фазилова<sup>1,2</sup>, А.Н. Казаков<sup>3</sup>, И.М. Алимухамедов<sup>4</sup>

## УТОЧНЕНИЕ ГЛОБАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ГЕОИДА ПО ДАННЫМ GPS И НИВЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ ФЕРГАНСКОЙ ДОЛИНЫ

### АННОТАЦИЯ

В Республике Узбекистан в настоящее время используют Балтийскую нормальную систему высот, связанную с поверхностью квазигеоида. Внедрение инновационных технологий глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) позволили с высокой точностью определять геометрические высоты, отнесенные к модели Земли – эллипсоиду. Для комплексного представления пространственных данных и анализа информации о территории, природных ресурсах, техногенных объектах, их динамике в Национальной географической информационной системе (НГИС) прежде всего необходимо решить задачу уточнения опорной высотной координатной системы и обеспечения ее связи с глобальной высотной основой, а именно обеспечить согласование этих двух систем высот. Задача усложняется тем, что для территории страны нет информации о квазигеоиде, определенном современными методами, которые необходимы для перехода от геометрических эллипсоидальных высот, полученных с помощью GPS-измерений к нормальным высотам, используемым для решения широкого круга практических задач различных областей наук об окружающей среде. Альтернативным решением проблемы в последние годы стало использование глобальных геопотенциальных моделей Земли (ГГМ), вычисленных с помощью различных спутниковых миссий. В работе рассмотрены две высокостепенные ГГМ EGM2008 и GECO для создания системы нормальных высот территории Ферганской долины. Значения аномалий высот по ним достигают максимума для региона и имеют величину около -49 м. Метод построения параметрической модели (или корректирующей поверхности) с использованием нивелирных и GPS-измерений в «общих точках» был использован для их уточнения. Диапазон вносимых поправок составил от -0,28 м до 0,29 м. Причем модель GECO была улучшена значительно по сравнению с EGM2008 в низменной части исследуемой области, имеющей большие величины аномалий геоида. В качестве эталонной поверхности выбран эллипсоид Красовского и соответствующая ему Балтийская система высот для создания в будущем сетки преобразования высот между локальной и геоцентрической системами координат. Результаты комплексного статистического анализа позволили выявить, что ГГМ GECO дает более точное представление рельефа области и рекомендована для решения практических задач на территории Ферганской долины.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** EGM2008, GECO, GPS, система отсчета высот

<sup>1</sup> Астрономический институт имени Улугбека Академии наук Республики Узбекистан, ул. Астрономическая, 33, 100052, Ташкент, Республика Узбекистан, *e-mail*: [dil\\_faz@yahoo.com](mailto:dil_faz@yahoo.com)

<sup>2</sup> Национальный университет Республики Узбекистан, ул. Университетская, 4, 1000174, Ташкент, Республика Узбекистан

<sup>3</sup> Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, ул. Университетская, 2, 100095, Ташкент, Республика Узбекистан. *e-mail*: [Azlik19@yandex.ru](mailto:Azlik19@yandex.ru)

<sup>4</sup> Центр передовых технологий при Министерстве инновационного развития Республики Узбекистан, Олмазарский район, ул. Талабалар шаҳарчаси, 3А, 100174, Ташкент, Республика Узбекистан, *e-mail*: [info@cht-tashkent.uz](mailto:info@cht-tashkent.uz)

**Dilbarkhon Sh. Fazilova<sup>1,2</sup>, Aziz N. Kazakov<sup>3</sup>, Ilkhom M. Alimukhamedov<sup>4</sup>**

## **IMPROVING GLOBAL GEOID BY GPS AND LEVELING DATA OVER THE FERGANA VALLEY TERRITORY**

### **BSTRACT**

The Republic of Uzbekistan currently uses the Baltic normal system of heights associated with the quasi-geoid surface. The introduction of innovative technologies of global navigation satellite systems (GNSS) made it possible to determine with high accuracy the geometric heights related to the Earth model – an ellipsoid. For a complex representation of spatial data and analysis of information about the territory, natural resources, man-made objects, their dynamics in the National Geographic Information System (NGIS), first of all, it is necessary to solve the problem of refining the reference vertical coordinate system and ensuring its connection with the global ones, namely, to ensure adjustment of these two height systems. The task is complicated by the fact that for the territory of the country there is no information about the quasi-geoid determined by modern methods, which are necessary for the transition from geometric ellipsoidal heights obtained using GPS measurements to normal heights which are used for solving a wide range of practical problems in various fields of environmental sciences. In recent years, global geopotential models of the Earth (GGM) calculated using various satellite missions has become an alternative solution to the problem. The study considers two high order GGMs (EGM2008 and GECO) to create a system of normal heights for the territory of the Fergana Valley. The height anomaly values for them reach the maximum for the region – about -49 m. The method of constructing parametric models (or corrective surfaces) using leveling and GPS measurements at “common points” was used to refine them. The range of corrections made was from -0.28 m to 0.29 m. Moreover, the GECO model was significantly improved compared to EGM2008 in the flatland part of the study area, which has large geoid anomalies. The Krasovsky ellipsoid and the corresponding Baltic height system were chosen as a reference surface to create in the future a grid for converting heights between local and geocentric coordinate systems. The results of a comprehensive statistical analysis made it possible to reveal that GECO gives a more accurate representation of the region’s relief and is recommended for solving practical problems in the Fergana Valley.

**KEYWORDS:** EGM2008, GECO, GPS, vertical (height) reference system

### **ВВЕДЕНИЕ**

Вертикальная система отсчета является основополагающей для решения широкого круга задач различных областей наук об окружающей среде, таких как землепользование, тектоника, климатология, управление поймой реки, строительство дренажных сетей, генезис почвы и ее картографирование, исследование оползней и многих других. В Республике Узбекистан, как и в большинстве стран, используют Балтийскую нормальную систему высот, связанную с поверхностью квазигеоида, и с нулевой отметкой шкалы, расположенной в Кронштадте. Нормальные высоты  $H$ , относящиеся к среднему уровню моря (MSL), являются физическими высотами и зависят от гравитационного поля Зем-

<sup>1</sup> Ulugh Beg Astronomical Institute of Uzbek Academy of Sciences, Astronomicheskaya str., 33, 100052, Tashkent, Republic of Uzbekistan, e-mail: [dil\\_faz@yahoo.com](mailto:dil_faz@yahoo.com)

<sup>2</sup> National university of Uzbekistan named Mirzo Ulugbek, University str., 4, 1000174, Tashkent, Republic of Uzbekistan

<sup>3</sup> Tashkent state technical university named after Islam Karimov, University str., 2, 100095, Tashkent, Republic of Uzbekistan, e-mail: [Azlik19@yandex.ru](mailto:Azlik19@yandex.ru)

<sup>4</sup> Center of advanced technologies Ministry of Innovative Development of the Republic of Uzbekistan, Olmazor district, Talabalar shaharchasi, 3A, 100174, Tashkent, Uzbekistan, e-mail: [info@cht-tashkent.uz](mailto:info@cht-tashkent.uz)

ли. Внедрение инновационных технологий глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), таких как Глобальная система позиционирования США GPS, европейский Galileo, российский ГЛОНАСС или китайский BeiDou, позволили с высокой точностью определять геометрические высоты  $h$ , отнесенные не к средней поверхности моря и не имеющие связи с гравитационным полем Земли, а к геометрической модели Земли – эллипсоиду. Для комплексного представления пространственных данных и анализа информации о территории, природных ресурсах, техногенных объектах, их динамике в Национальной географической информационной системе (НГИС) республики прежде всего необходимо решить задачу уточнения опорной высотной координатной системы и обеспечения ее связи с глобальной высотной основой, а именно обеспечить согласование этих двух систем высот<sup>1</sup>. Разница между этими высотами может достигать  $\pm 80$  метров<sup>2</sup> и, как правило, описывается аномалиями высот геоида  $N$  [Hofmann-Wellenhof, Moritz, 2006]:

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

Сеть станций ГНСС, развернутая к настоящему времени на территории Республики Узбекистан, позволит решить проблему обеспечения высотной координатной основы для решения вышеуказанных задач, но пока нет необходимой систематической базы данных определений аномалий высот геоида региона современными методами. Альтернативным решением проблемы в последние годы стало использование глобальных геопотенциальных моделей Земли (ГГМ), вычисленных с помощью различных спутниковых миссий в сочетании с имеющимися наземными измерениями.

Современные версии моделей ГГМ становятся все более подробными и точными, причем глобальная топография может быть определена спутниковыми методами независимо от наземных данных гравитационного поля [Barthelmes, Köhler, 2016]. Среди них модели, полученные в ходе эксперимента по определению гравитационного поля и исследования климата Gravity Recovery and Climate Experiments (GRACE), запущенного в 2002 году: Национального агентства геопро пространственных исследований Министерства обороны США (National Geospatial Intelligence Agency – NGA) EGM2008 (Earth Gravitational Model) [Pavlis et al., 2012] и европейская комбинированная модель EIGEN-6C4 Международного центра глобальных моделей Земли (International Centre for Global Earth Models – ICGEM) [Förste et al., 2014]. К наиболее часто используемым моделям на территории Узбекистана в настоящее время относится EGM2008. Однако если влияние погрешностей гармонических коэффициентов EGM2008 на точность вычисления высоты квазигеоида и уклонения отвесных линий в целом по земной поверхности оценивается со среднеквадратической погрешностью на уровне 11 см и 1", соответственно, то для территории республики они достигают 35 см и 3.5", что обусловлено отсутствием наземных измерений при создании моделей [Непоклонов, 2009]. Авторами ранее были выполнены исследование методов создания непрерывной поверхности высот геоида, сравнение аномалий высот и разностей приращений ускорения силы тяжести по моделям EIGEN-6C4 и EGM2008 для территории Ферганской долины [Фазилова и др., 2017; Fazilova, Magdiev, 2018]. А использование геометрического метода для коррекции высоты геоида модели EGM96 позволило улучшить цифровые модели рельефа в работе [Fazilova et al., 2021]. Запущенная в 2009 году комбинированная спутниковая градиентометрическая миссия в рамках программы GOCE (Gravity field and Steady State Ocean Circulation Explorer) обеспечивает глобальные решения, позволяющие моделировать длинные и средние волны

<sup>1</sup> О применении и открытом использовании на территории Республики Узбекистан международных геодезических систем координат. Постановление Кабинета Министров Республики Узбекистан №1022 от 26.12.2017. Электронный ресурс: [http://www.lex.uz/pages/getpage.aspx?lact\\_id=3481466](http://www.lex.uz/pages/getpage.aspx?lact_id=3481466) (дата обращения 24.01.2022)

<sup>2</sup> Establishment of a Global Unified Height Reference System: A GGOS priority. Электронный ресурс: <https://ggos.org/about/org/fa/unified-height-system> (дата обращения: 17.01.22)

гравитационного поля Земли. Несколько ГГМ вычислены с использованием данных спутниковых гравиметрических миссий GRACE и GOCE [Drinkwater et al, 2003; Tapley et al., 2004]. Комбинированная модель GECO представляет собой глобальную гравитационную модель, которая рассчитывается путем включения пятой версии решения TIM-R5 только по данным GOCE в модель EGM2008 [Gilardoni et al., 2016]. Для горных областей разница высот квазигеоида по ГГМ и полученных геометрическим методом может достигать десятков метров [Дмитренко, 2012]. Целью данного исследования является оценка точности ГГМ EGM2008 и GECO и обеспечение возможности их уточнения с помощью данных GPS/нивелирования для создания системы нормальных высот территории Ферганской долины.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Территория Ферганской долины является областью, в которой «для исследования влияния силы тяжести горных массивов Тянь-Шаня и Памира были проведены самые многочисленные измерения, показавшие наличие больших значений уклонов отвесной линии, обусловленное ее орографией» и наличие больших аномалий силы тяжести [Устьянцев, 2011]. По результатам геодезических работ еще в начале прошлого века в Ферганской долине построена достаточно плотная нивелирная сеть. Учитывая развитую инфраструктуру региона, достаточно быстро развивается и сеть GPS-станций в данной части республики. Для анализа в работе были выбраны следующие исходные данные:

1) GPS-измерения спутниковой государственной сети (СГС) на 27 пунктах, выполненные с 2005 по 2015 гг. (рис. 1). Измерения других систем, входящих в ГНСС (ГЛОНАСС, Galileo), на данный момент не доступны на станциях. Программный комплекс GAMIT/GLOBK версии 10.71 использован для вычисления координат пунктов [Herring et al., 2018]. Обработка согласно [Dong et al., 1998] выполнялась по рекомендациям и стандартам международной службы вращения Земли IERS2010 [IERS, 2010]. Опорной системой координат регионального решения выбрана система координат ITRF2014 [Altamimi et al., 2016]. Ошибка повторяемости горизонтальных координат составила 1,0–3,2 мм и 3,2–6,5 мм для высоты.

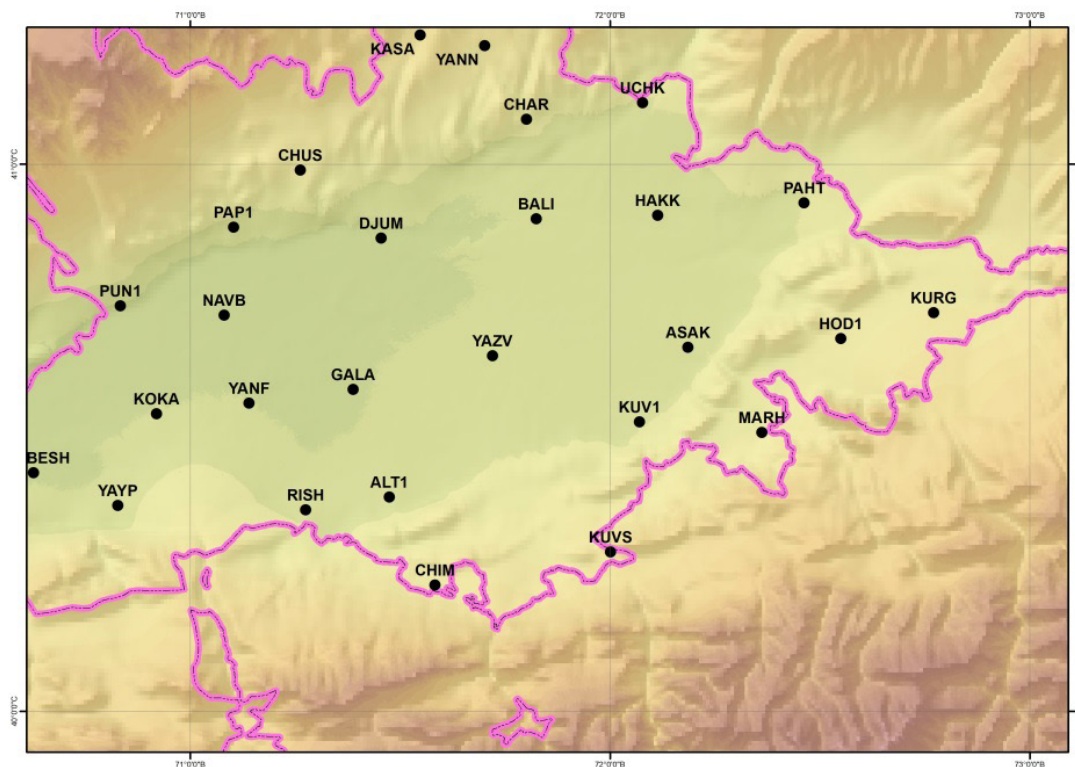


Рис. 1. GPS-сеть на территории Ферганской долины в Узбекистане  
Fig. 1. GPS network in the territory of the Fergana Valley in Uzbekistan



2) Пункты GPS-сети также являются и пунктами государственной нивелирной сети страны с известными значениями нормальных высот в Балтийской системе 1977 года ( $H_{СК42}$ ), вычисленных по результатам классического нивелирования.

3) Глобальные геопотенциальные модели, использованные в работе, находятся в свободном доступе на веб-сайте Международного центра глобальных моделей Земли (ICGEM) [Barthelmes, Köhler, 2016] и предоставляются в системе нулевого прилива относительно геометрически фиксированного опорного эллипсоида GRS80 (табл. 1).

Табл. 1. Модели геопотенциала Земли  
Table 1. Earth geopotential models

Модель	Год	Степень гармоник	Описание исходных данных*
EGM2008	2008	2190	C(GRACE), Г, А
GECO	2015	2190	EGM2008, S(Goce)

\* С – спутниковые данные, Г – наземные гравиметрические данные, А – альтиметрические данные.

Для анализа глобального гравитационного поля, высота геоида  $N$  в точке  $P$  с координатами  $(j_p, l_p)$  может быть представлена рядом сферических гармоник [Hofmann-Wellenhof, Moritz, 2006]:

$$N(\varphi_p, \lambda_p) = R \sum_{l=2}^L \sum_{m=0}^l [\bar{C}_{lm} \cos \lambda_p + \bar{S}_{lm} m \sin \lambda_p] \bar{P}_{lm}(\sin \varphi_p), \quad (2)$$

где  $R$  – радиус Земли,  $\bar{C}_{lm}, \bar{S}_{lm}$  – нормированные гармонические коэффициенты аномального геопотенциала,  $\bar{P}_{lm}(\sin \varphi_p)$  – полностью нормированные присоединенные функции Лежандра,  $l, m$  – соответственно, степень и порядок гармоник,  $L$  – предел суммирования сферических гармоник.

Аномалии высот геоида в этом случае относятся к глобальному геоцентрическому эллипсоиду и должны быть скорректированы за счет того, что разница эллипсоидальных высот эквивалентна изменению отклонений геоида между вертикальными системами отсчета (без учета поворотов и изменения масштаба). Применение на практике уравнения (1) для определения необходимых нормальных высот осложняется рядом факторов, среди которых случайные ошибки (шум) в определении высот, различие относимости для разных типов высот и недостаточное знание связи между ними, геодинамические явления (такие как оседание почвы, деформация тектонических плит вблизи зон субдукций и др.). Задачу устранения этих ошибок и повышения точности высот решают с помощью введения параметрических моделей (или корректирующей поверхности) при уточнении высот [Fotopoulos et al., 2003]. К таким моделям относятся полиномы высокого порядка с различными базисными функциями [Shretha et al., 1993], метод конечных элементов [Jäger, 1999], ряды Фурье [Haagmans et al., 1993], метод коллокации [Forsberg, Madsen, 1990].

В данной работе нами использован геометрический метод, основанный на моделировании и интерполяции на заданную область значений разности между высотой геоида по данным GPS-нивелирования и высотой геоида ГГМ в «общих» точках с известными координатами в обоих датумах [Soysan, 2014]:

$$\Delta N_i = N_i^{GPS-нивелир} - N_i^{ГГМ} \quad (3)$$

Уравнение корректирующей поверхности (corrector surface fitting) определяется как:

$$f(\varphi, \lambda) = \Delta N = N_i^{GPS-нивелир} - N_i^{ГГМ} = a_0 + a_1 \varphi_1 + a_2 \lambda_i + = a_i^T x + v_i \quad (4)$$

$$T_i = a_0 + a_1\varphi_1 + a_2\lambda_i + \dots \quad (5)$$

Для каждого пункта вычислена поправка к высоте геоида путем удаления полиномиального тренда  $T$  из значения  $\Delta N$ :

$$dN_i = \Delta N_i - T_i \quad (6)$$

Уточненные значения аномалий высот геоида определяются выражением:

$$N_i^{improv} = N_i^{GGM} + dN_i \quad (7)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 (слева) представлены высоты геоида по ГГМ и соответствующие им корректирующие поверхности, полученные по формуле (6). Следует отметить, что как для горных областей территории, так и для самой котловины (низменной части) значения аномалий высот имеют максимальные для территории Узбекистана величины, достигающие  $-49$  м как для модели EGM200, так и для GECO. Построенные корректирующие поверхности (рис. 2, справа) показали, что диапазон вводимых поправок имеет порядок от  $-0,28$  м до  $0,29$  м. Причем модель GECO имеет максимальные поправки для равнинной части территории с большими аномалиями геоида.

Поменял места таблицы и рисунков (согласно первоочередности в тексте)

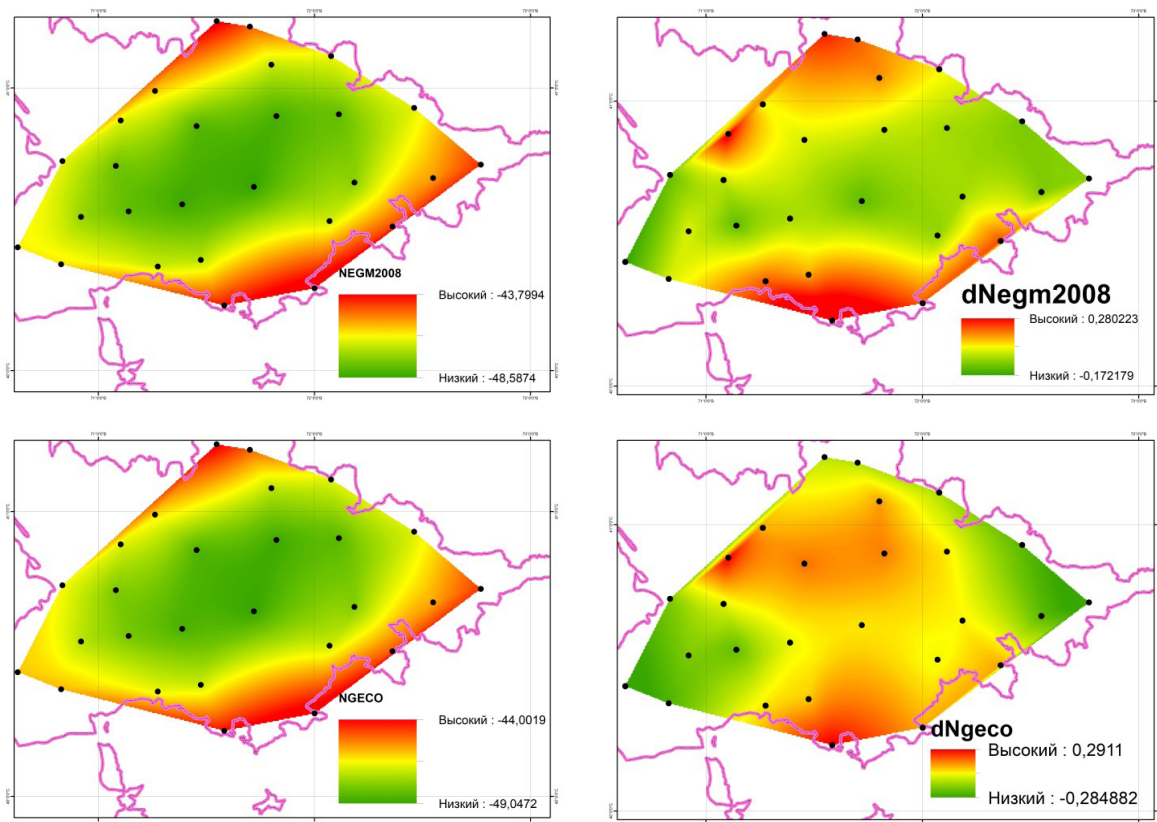


Рис. 2. Аномалии высот геоида по ГГМ (слева) и построенные корректирующие поверхности аномалий высот геоида (справа) для территории Ферганской долины  
 Fig. 2. Geoid heights anomalies (left) and their corrective surfaces (right) for the territory of the Fergana Valley

Нормальные высоты на пунктах сети вычислялись по формуле (1) по результатам GPS-измерений и аномалиям высот геоида как до, так и после введения поправочного члена. Непрерывная поверхность системы высот в виде цифровой модели рельефа (ЦМР)

построена методом естественной окрестности в ArcGIS для наглядного представления. Статистика диапазона высот, среднего значения, стандартного отклонения для каждой поверхности приведена в табл. 2. Предварительная оценка всех четырех ЦМР показывает, что нет значительных различий между их минимальными, максимальными, средними значениями и стандартными отклонениями по сравнению с эталонной моделью  $H_{СК42}$ .

Табл. 2. Статистика для нормальных высот исследуемой территории  
 Table 2. Summary statistics of normal heights for the study area

	<b>Мин, м</b>	<b>Макс, м</b>	<b>СКО, м</b>
$H_{СК42}$	378.259	880.312	120.456
$H_{EGM2008}$	377.949	880.138	120.488
$H_{EGM2008\_кор}$	377.997	879.979	120.436
$H_{GECO}$	378.196	880.389	120.499
$H_{GECO\_кор}$	378.201	880.429	120.485

Далее для более детальной оценки моделей и исследования влияния рельефа территории, наличия измерительных наземных данных был проведен комплексный статистический анализ значений остатков между высотами, вычисленными по величинам аномалий высот, определенным по ГГМ до и после введения корректирующей поверхности. Полученные поверхности для разностей ( $H_{СК42} - H_{EGM2008}$ ), ( $H_{СК42} - H_{EGM2008\text{корр}}$ ), ( $H_{СК42} - H_{GECO}$ ), ( $H_{СК42} - H_{GECO\text{корр}}$ ) представлены на рис. 3. Для модели GECO было получено наилучшее приближение к эталонной поверхности, в то время как модель EGM2008 значительно не изменилась.

Для каждой невязки до и после введения поправки были вычислены максимум, минимум, среднеквадратическая ошибка (RMSE), средняя ошибка (ME), абсолютная вертикальная точность при уровне достоверности 90 % (LE90). RMSE характеризует отличие моделируемых значений по ГГМ от эталонной (в нашем случае, поверхности высот  $H_{СК42}$ ). А значение ME дает оценку смещения построенной от референтной модели. Абсолютная вертикальная точность LE90 может быть оценена на основе RMSE [Mukherjee et al., 2013]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_{\tilde{N}\tilde{E}42} - Z_{\tilde{A}\tilde{A}i})^2} \quad (8)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_{\tilde{N}\tilde{E}42} - Z_{\tilde{A}\tilde{A}i}) \quad (9)$$

$$LE90 = RMSE \times 1.6449 \quad (10)$$

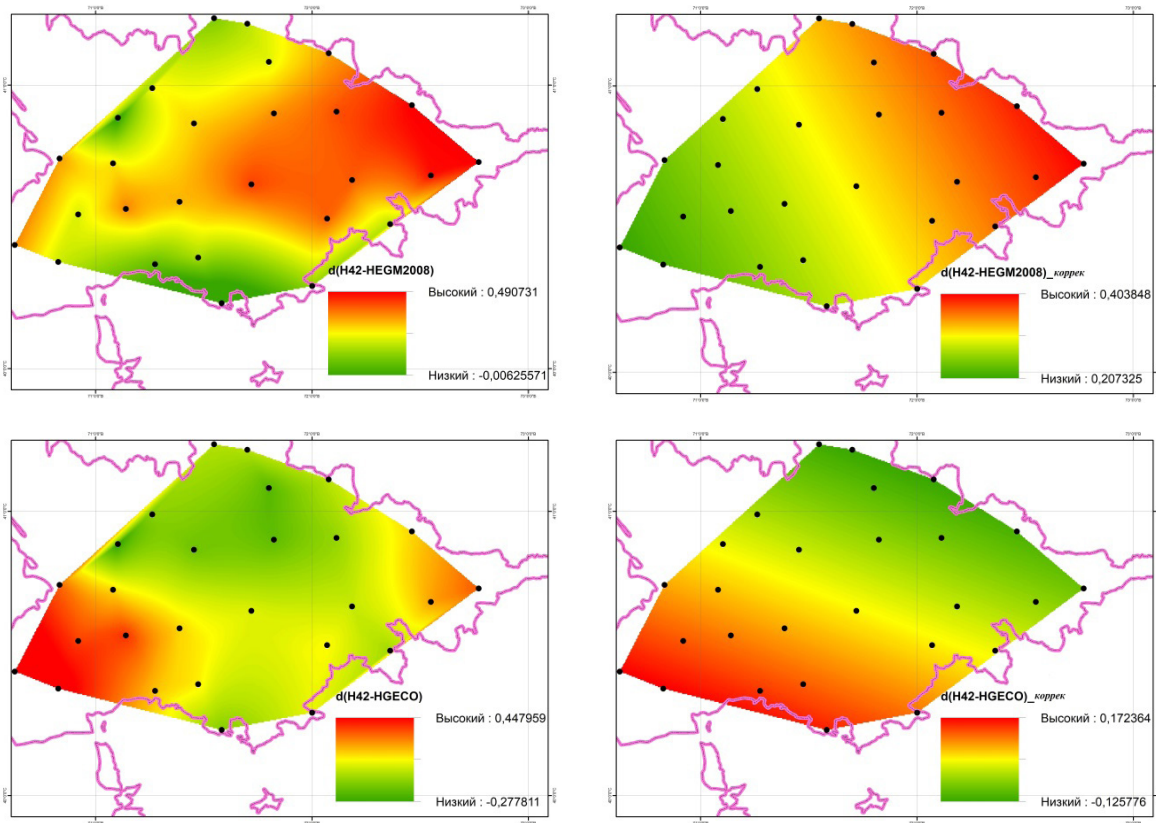


Рис. 3. Разница «модельных» и «измеренных» (в метрах) значений нормальных высот до (слева) и после введения поправки (справа)  
 Fig. 3. The difference between “modeled” and “measured” (in meters) values of normal heights without (left) and with corrective term (right)

Результаты выполненного статистического анализа (рис. 4) показывают, что высотные данные моделей GECO как до, так и после введения поправки, имеют лучшую абсолютную точность по вертикали (LE), равную 0,29 м и 0,16 м соответственно.

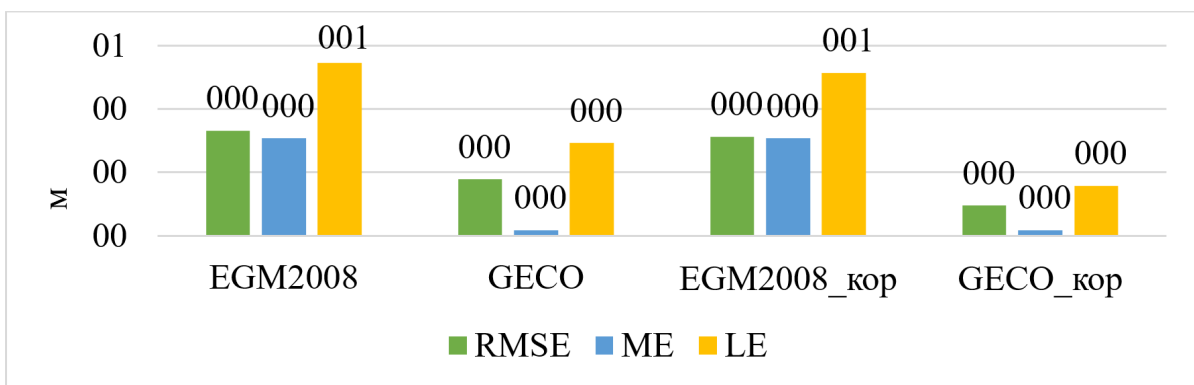


Рис. 4. Сравнительная статистика поверхностей модельных (до и после введения корректирующей поверхности) и эталонной систем нормальных высот  
 Fig. 4. Comparative statistics of modeled (before and after correction) and reference normal height surfaces

Значения статистических параметров EGM2008 хуже, чем для GECO и, к тому же, точность данной ГГМ не была улучшена после введения поправки. Параметр смещения (ME) для моделей также имеет большое различие, что подтверждает, что гравиметрическая



миссия GOCE значительно улучшила результаты своего предшественника EGM2008 и может быть использована как альтернатива для районов, где пока отсутствуют наземные гравиметрические измерения. Абсолютная вертикальная точность  $LE90=0,16$  м показывает, что ГГМ GECO также дает более точную оценку рельефа района. Поэтому ГГМ GECO может быть рекомендована для построения ЦМР для решения практических задач в данном регионе.

## ВЫВОДЫ

В данной работе были рассмотрены аномалии высот геоида, вычисленные по двум высокостепенным глобальным геопотенциальным моделям Земли EGM2008 и GECO, как возможная альтернатива для создания системы нормальных высот для территории Ферганской долины в Узбекистане. Метод построения параметрической модели (или корректирующей поверхности) с использованием нивелирных и GPS измерений в «общих точках» был протестирован на моделях для возможности их уточнения. В качестве эталонной поверхности выбран эллипсоид Красовского и соответствующая ему Балтийская система высот. Данный выбор обусловлен и перспективой создания сетки трансформации высот между локальной и геоцентрической системами координат на базе цифровых моделей рельефа. Значение аномалий высот по двум ГГМ достигает максимума для региона и имеет величину около  $-49$  м. Диапазон же вносимых поправок составил от  $-0,28$  м до  $0,29$  м. Причем модель GECO была значительно улучшена в низменной части исследуемой области с большими аномалиями геоида. Несмотря на то, что согласно предварительной оценке ЦМР значительных различий между их минимальными, максимальными, средними значениями и стандартными отклонениями по сравнению с эталонной моделью высот  $H_{СК42}$  нет, комплексный статистический анализ подтвердил, что ГГМ GECO дает лучшую оценку рельефа области. Поэтому модель GECO может быть рекомендована для построения ЦМР и решения задач исследования окружающей среды на территории Ферганской долины.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках государственного бюджетного финансирования Академии наук Республики Узбекистан.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the State Budget Foundation of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитренко А.П. *Современные трансформации определения геоида. Кривой Рог: Мунерал, 2012. 218 с.*
2. Непоклонов В.Б. Об использовании новых моделей гравитационного поля Земли в автоматизированных технологиях изысканий и проектирования. Автоматизированные технологии изысканий и проектирования, 2009. № 3. Электронный ресурс: <http://www.credodialogue.com/journal.aspx> (дата обращения: 05.02.2022).
3. Устьянцев В.Н. Механизм формирования структуры системы Земли. О роли стационарных энергетических центров в сохранении динамического равновесия системы Земли. Геотектоника, 2011. Электронный ресурс: <http://geo.web.ru> (дата обращения: 07.02.2022).
4. Фазилова Д.Ш., Эгамбердиев Ш.А., Магдиев Х.Н. Анализ глобальных гравитационных моделей Земли EIGEN-6C4 и EGM2008 по геодезическим данным применительно к Ферганской долине. Труды Института прикладной астрономии РАН. Санкт-Петербург, 2017. Вып. 42. С.133–137.
5. Altamimi Z., Rebischung P., Métivier L., Collilieux X. ITRF2014: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame Modeling Nonlinear Station Motions.

- Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2016. V. 121. No. 8. P. 6109–6131. DOI: 10.1002/2016JB013098.
6. *Barthelmes F., Köhler W.* International Centre for Global Earth Models (ICGEM), in: Drewes, H., Kuglitsch, F., Adám, J. et.al. The Geodesists Handbook, Journal of Geodesy, 2016. V. 90. No. 10. P. 907–1205. DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-3511.
  7. *Dong D., Herring T. A., King R. W.* Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data. Journal of Geodesy, 1998. V. 72. P. 200–214. DOI: 10.1007/s001900050161.
  8. *Drinkwater M.R., Floberghagen R., Haagmans R., Muz, D., Popescu A.* GOCE: ESA's first Earth Explorer Core mission. In Earth Gravity Field from Space – From Sensors to Earth Sciences. Space Sciences Series of ISSI. Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2003. V. 17. P. 419–432. DOI: 10.1023/A:1026104216284.
  9. *Fazilova, D., Magdiev, H.* Comparative study of interpolation methods in development of local geoid. International Journal of Geoinformatics, 2018. V. 14, No. 1. P. 29–33.
  10. *Fazilova D., Magdiev H., Sichugova L.* Vertical Accuracy Assessment of Open Access Digital Elevation Models Using GPS. International Journal of Geoinformatics, 2021. V. 17. No 1. P. 19–26.
  11. *Forsberg R., Madsen F.* High precision geoid heights for GPS levelling. Proceedings of GPS'90/SPG'90, 1990. P. 1060-1074.
  12. *Förste Ch., Bruinsma S.L., Abrikosov O., Lemoine J.-M., Marty J.Ch., Flechtner F., Balmino G., Barthelmes F., Biancale R.* 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, 2014. doi: 10.5880/ICGEM.2015.1.
  13. *Fotopoulos G., Featherstone W.E., Sideris M.G.* Fitting a gravimetric geoid model to the Australian Height Datum via GPS data. In: Tziavos, I.N. Gravity and Geoid. Department of Surveying and Geodesy, Aristotle University of Thessaloniki, 2003. P. 173–178.
  14. *Gilardoni M., Reguzzoni M., Sampietro D.* GECO: a global gravity model by locally combining GOCE data and EGM2008. Studia Geophysica et Geodaetica, 2016. V. 60. P. 228–247. DOI: 10.1007/s11200-015-1114-4.
  15. *Haagmans R., de Min E, van Gelderen M.* Fast evaluation of convolution integrals on the sphere using 1D FFT, and a comparison with existing methods for Stokes' integral. Manuscripta Geodaetica, 1993. V. 18. P. 227–241.
  16. *Hofmann-Wellenhof B., Moritz H.* Physical Geodesy. 2<sup>nd</sup> edition. Wien: Springer, 2006. 403 p. DOI: 10.1007/978-3-211-33545-1.
  17. *Herring T.A., King R.W., Floyd M., McClusky S.C.* Introduction to GAMIT/GLOBK. Release 10.7. Technical report. Massachusetts Institute of Technology, 2018. Web resource: [http://geoweb.mit.edu/gg/Intro\\_GG.pdf](http://geoweb.mit.edu/gg/Intro_GG.pdf) (accessed 10.09.2020).
  18. *IERS Conventions.* IERS Technical Note 36. Gérard Petit and Brian Luzum (eds.). Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 p.
  19. *Jäger R.* State of the art and present developments of a general concept for GPS based height determination. Proceedings of Geodesy Surveying in the Future, The Importance of Heights, International Federation of Surveyors, Gävle, Sweden, 1999. March 15–17. P. 161–174.
  20. *Mukherjee S., Joshi P., Mukherjee S., Ghosh A., Garg R., Mukhopadhyay A.* Evaluation of vertical accuracy of opensource Digital Elevation Model (DEM). International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2013. V. 21. P. 205–217. DOI: 10.1016/j.jag.2012.09.004.
  21. *Pavlis N.K., Holmes S.A, Kenyon S.C, Factor J.K.* The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012), 2012. V. 117. B04406. DOI: 10.1029/2011JB008916.
  22. *Shretha R., Nazir A., Dewitt B., Smith S.* Surface Interpolation Techniques to Convert GPS Ellipsoid Heights to Elevations. Surveying and Land Information Systems, 1993. V. 53. No. 2. P. 133–144.

23. Soycan M. Improving EGM2008 by GPS and leveling data at local scale. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 2014. V. 20 No 1. P. 3–18. DOI: 10.1590/s1982-21702014000100001.
24. Tapley B.D., Bettadpur S., Watkins M., Reigber C. The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. *Geophys. Res. Lett.*, 2004. V. 31. L09607.

#### REFERENCES

1. Altamimi Z., Rebischung P., Métivier L., Collilieux X. ITRF2014: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame Modeling Nonlinear Station Motions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016. V. 121. No. 8. P. 6109–6131. DOI: 10.1002/2016JB013098.
2. Barthelmes F., Köhler W. International Centre for Global Earth Models (ICGEM), in: Drewes, H., Kuglitsch, F., Adám, J. et.al. *The Geodesists Handbook*, Journal of Geodesy, 2016. V. 90. No. 10. P. 907–1205. DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-3511.
3. Dmitrenko A.P. Modern transformations of the geoid definition. Monography. Krivoy Rog: Mineral, 2012. 218 p. (in Russian).
4. Dong D., Herring T.A., King R.W. Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data. *Journal of Geodesy*, 1998. V. 72. P. 200–214. DOI: 10.1007/s001900050161.
5. Drinkwater M.R., Floberghagen R., Haagmans R., Muz, D., Popescu A. GOCE: ESA's first Earth Explorer Core mission. In *Earth Gravity Field from Space – From Sensors to Earth Sciences*. Space Sciences Series of ISSI. Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2003. V. 17. P. 419–432. DOI: 10.1023/A:1026104216284.
6. Fazilova, D., Magdiev, H. Comparative study of interpolation methods in development of local geoid. *International Journal of Geoinformatics*, 2018. V. 14, No. 1. P. 29–33.
7. Fazilova D., Magdiev H., Sichugova L. Vertical Accuracy Assessment of Open Access Digital Elevation Models Using GPS. *International Journal of Geoinformatics*, 2021. V. 17. No 1. P. 19–26.
8. Fazilova D.Sh., Ehgamberdiev Sh.A, Magdiev H.N. Analysis of the global gravity models of the Earth EIGEN-6C4 and EGM2008 on geodetic data in relation to Fergana valley. *Transactions of IAA RAS*. St. Petersburg, 2017. V. 42. P.133–137. (in Russian).
9. Forsberg R., Madsen F. High precision geoid heights for GPS levelling. *Proceedings of GPS'90/SPG'90*, 1990. P. 1060-1074.
10. Förste Ch., Bruinsma S.L., Abrikosov O., Lemoine J.-M., Marty J.Ch., Flechtner F., Balmino G., Barthelmes F., Biancale R. 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*, 2014. doi: 10.5880/ICGEM.2015.1.
11. Fotopoulos G., Featherstone W.E., Sideris M.G. Fitting a gravimetric geoid model to the Australian Height Datum via GPS data. In: Tziavos, I.N. *Gravity and Geoid*. Department of Surveying and Geodesy, Aristotle University of Thessaloniki, 2003. P. 173–178.
12. Gilardoni M., Reguzzoni M., Sampietro D. GECO: a global gravity model by locally combining GOCE data and EGM2008. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 2016. V. 60. P. 228–247. DOI: 10.1007/s11200-015-1114-4.
13. Haagmans R., de Min E, van Gelderen M. Fast evaluation of convolution integrals on the sphere using 1D FFT, and a comparison with existing methods for Stokes' integral. *Manuscripta Geodaetica*, 1993. V. 18. P. 227–241.
14. Hofmann-Wellenhof B., Moritz H. *Physical Geodesy*. 2<sup>nd</sup> edition. Wien: Springer, 2006. 403 p. DOI: 10.1007/978-3-211-33545-1.
15. Herring T.A., King R.W., Floyd M., McClusky S.C. Introduction to GAMIT/GLOBK. Release 10.7. Technical report. Massachusetts Institute of Technology, 2018. Web resource: [http://geoweb.mit.edu/gg/Intro\\_GG.pdf](http://geoweb.mit.edu/gg/Intro_GG.pdf) (accessed 10.09.2020).
16. *IERS Conventions*. IERS Technical Note 36. Gérard Petit and Brian Luzum (eds.). Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 p.

17. *Jäger R.* State of the art and present developments of a general concept for GPS based height determination. Proceedings of Geodesy Surveying in the Future, The Importance of Heights, International Federation of Surveyors, Gävle, Sweden, 1999. March 15–17. P. 161–174.
  18. *Mukherjee S., Joshi P., Mukherjee S., Ghosh A., Garg R., Mukhopadhyay A.* Evaluation of vertical accuracy of opensource Digital Elevation Model (DEM). International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2013. V. 21. P. 205–217. DOI: 10.1016/j.jag.2012.09.004.
  19. *Nepoklonov V.B.* On the use of new models of the Earth's gravitational field in automated survey and design technologies. Automated survey and design technologies, 2009. No. 3. Web resource: <http://www.credo-dialogue.com/journal.aspx> (accessed 05.02.2022) (in Russian).
  20. *Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C., Factor J.K.* The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012), 2012. V. 117. B04406. DOI: 10.1029/2011JB008916.
  21. *Shretha R., Nazir A., Dewitt B., Smith S.* Surface Interpolation Techniques to Convert GPS Ellipsoid Heights to Elevations. Surveying and Land Information Systems, 1993. V. 53. No. 2. P. 133–144.
  22. *Soycan M.* Improving EGM2008 by GPS and leveling data at local scale. Boletim de Ciências Geodésicas, 2014. V. 20 No 1. P. 3–18. DOI: 10.1590/s1982-21702014000100001.
  23. *Tapley B.D., Bettadpur S., Watkins M., Reigber C.* The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. Geophys. Res. Lett, 2004. V. 31. L09607.
  24. *Ustyantsev V.N.* The mechanism of formation of the structure of the Earth system. On the role of stationary energy centers in maintaining the dynamic balance of the Earth system. Geotectonics, 2011. Web resource: <http://geo.web.ru> (accessed 07.02.2022) (in Russian).
-