

УДК 528.2(597)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИГОДНОСТИ ГЛОБАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ GECO, EGM2008 И EIGEN-6C4 ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ ВЬЕТНАМА

Фунг Ч.Т., Елшеви М.А., Эль Мокдад Б.Р., Куликовский Д.Р.

Государственный университет по землеустройству, Москва, e-mail: trungthanhpung@gmail.com

Аномалия высоты (другое название – высоты квазигеоида) – это фундаментальная величина в геодезии, которую можно измерить напрямую (комбинируя GPS-метод и нивелирование) или рассчитать по локальному квазигеоиду, или глобальным моделям геоида. Однако, чтобы свести к минимуму ошибки в измерении аномалии высоты, модели локального квазигеоида часто создают на основе геоида (эталонной модели). Статья посвящена оценке пригодности глобальных моделей Geco, EGM 2008 и EIGEN-6C4 путем сравнения аномалии высоты GPS-нивелирования и аномалии высоты глобальной модели в регионе северного Вьетнама. Цель исследования – рассчитать модель квазигеоида, которая подходит для района исследования и дальнейшего определения квазигеоида в региональном и национальном масштабах. Область исследования состоит из 302 контрольных точек, принадлежащих к национальной высотной сети Вьетнама. Контрольные точки расположены на высотах от 0 до 1600 м над уровнем моря и разделены на сети 1, 2 и 3 класса. Кроме того, аномалии высот, полученные из глобальных моделей, сравнивались с аномалиями высот, полученных из GPS-нивелирования 302 контрольных точек по средней квадратической ошибке. Результаты оценки показывают, что модель GECO и модель EIGEN-6C4 являются двумя наиболее подходящими моделями для определения модели квазигеоида северного Вьетнама. Метод, используемый в исследовании, это сбор и обработка данных измерений, таких как измерение ускорения силы тяжести, модель рельефа, измерение высоты спутниковым методом, является одним из перспективных методов в создании квазигеоида на территории северного Вьетнама.

Ключевые слова: Geco, глобальный, EGM 2008, EIGEN-6C4, квазигеоид

STUDY OF THE SUITABILITY OF GLOBAL MODELS GECO, EGM2008 AND EIGEN-6C4 TO THE TERRITORY OF VIETNAM

Phung Trung Thanh, Elshevi M.A., El Mokdad B.R., Kulikovskiy D.R.

State University of Land Management, Moscow, e-mail: trungthanhpung@gmail.com

High anomaly also known as geoid height, is a fundamental quantity in geodesy that can be measured directly (by combining GPS and leveling), or calculated from a local quasi-geoid, or global geoid models. However, in order to minimize errors in the measurement of the height anomaly, local quasi-geoid models are often created based on a geoid (reference model). The article is devoted to assessing the suitability of the global models Geco, EGM 2008 and EIGEN – 6C4 by comparing the GPS leveling altitude anomaly and the global model altitude anomaly in the North Vietnam region. The purpose of the study is to calculate a quasi-geoid model that is suitable for the study area and further define the quasi-geoid on a regional and national scale. The study area consists of 302 control points belonging to the Vietnam National Altitude Network. Control points are located at altitudes from 0 to 1600 meters above sea level and are divided into 1, 2 and 3 classes. In addition, the elevation anomalies obtained from the global models were compared with the elevation anomalies obtained from GPS – leveling 302 control points by root mean square error. The evaluation results indicate that the GECO model and the EIGEN-6C4 model are the two most appropriate models for defining the North Vietnamese quasi-geoid model. The method used in the study is the collection and processing of measurement data, such as the measurement of the acceleration of gravity, the elevation model, the measurement of altitude by the satellite method, is one of the promising methods for creating a quasi-geoid in the territory of northern Vietnam.

Keywords: GECO, global, EGM 2008, EIGEN 6C4, quasi-geoid

В настоящее время мировым научным сообществом приняты рассчитанные три глобальные модели геоида: GECO [1, 2], EGM 2008 [1, 3] и EIGEN-6C4 [1, 4]. Исходя из указанного, используя географические информационные технологии (ГИС) и возможности обработки информации компьютеров, создана глобальная модель геоида в цифровом виде.

Теоретически изучаемая поверхность будет состоять из бесчисленного количества точек, поэтому исследователи часто создают геоид в виде сетки (Grid), путем распределения исследуемой территории уникальному

значению ячейки сетки модели геоида. Модель геоида имеет шаг сетки ΔB , ΔL и включает в себя набор значения высоты геоида. Расстояние между шагом указанной сетки представляет детализацию модели геоида. Точки на сетке имеют координаты (B, L, H), а модель геоида сохраняется в общем цифровом формате *.GGF и используется в программах настройки GPS.

Из интернета или из файлов формы *.GGF мы можем легко использовать аномалию высоты любой точки, зная координаты B, L, но точность этих значений не соответствует требованиям определения высоты

с помощью GPS измерений во Вьетнаме. Таким образом, нам, прежде всего, нужно оценить глобальную модель геопотенциала в исследуемой области, из которой выбрать соответствующую модель.

Методы оценки точности модели глобального геоида и результаты экспериментов, а также оценка глобальных геопотенциальных моделей и сравнение аномалий высот

Чтобы оценить точность в некоторой области, прежде всего, необходимо создать дубликаты данных GPS-нивелирования для точек равномерно распределенных по территории этой области.

Геодезическая высота определяется технологией GPS в системе координат WGS-84 ($H^Г$). Предположим, что в точках сети GPS одновременно с нормальной высотой ($H^Г$), определенной методом нивелирования, могут быть выявлены аномалии высоты [5]:

$$\zeta_{H^Г-H^Г} = H^Г - H^Г. \quad (1)$$

Различия между GPS-нивелированием и глобальной моделью геопотенциала $\zeta_{ГМГ}$ по аномалии высоты получаем по формуле

$$\Delta\zeta_i = \zeta_{H^Г-H^Г} - \zeta_{ГМГ} \quad (i = 1, 2, \dots), \quad (2)$$

где i – общее количество точек.

Отклонение $\Delta\zeta_i$ (2) содержит 3 типа ошибок: ошибка измерения GPS, ошибка нивелирования и ошибка глобальной геопотенциальной модели $\Delta\zeta_i$ (наибольшее значение, влияющее на итоговые вычисления).

Среднее отклонение мы получаем по формуле

$$\overline{\Delta\zeta_{cp}} = \frac{1}{n} \sum \Delta\zeta_i. \quad (3)$$

На основе отклонений $\Delta\zeta_i$ также можно рассчитать среднее квадратическое отклонение аномалии высоты по формуле

$$m = \pm \sqrt{\frac{[\Delta\zeta_i \Delta\zeta_i']}{n}}. \quad (4)$$

Точность результатов измерений оценивается средней квадратической ошибкой. Среднюю квадратическую ошибку вычисляем по формуле

$$m' = \pm \sqrt{\frac{[\Delta\zeta_i' \Delta\zeta_i']}{n-1}}, \quad (5)$$

где $\Delta\zeta_i' = \Delta\zeta_i - \overline{\Delta\zeta_{cp}}$.

Район исследования расположен на севере Вьетнама в географических границах: $19^0 N \leq \varphi \leq 23^0 N$; $102^0 E \leq \lambda \leq 107^0$ (510 км×440 км).



Рис. 1. Технологическая схема расчета оценки пригодности высоты геоида по глобальной модели и GPS-нивелирования на территории Вьетнама



Рис. 2. Географическое распределение 302 пунктов GPS-нивелирования

Все наши оценочные тесты глобальной геопотенциальной модели (GGM), ос-

нованные на высотах геоида, относятся к 302 контрольным точкам (107 пунктов первого класса, 59 пунктов второго класса, 136 пунктов третьего класса), которые находятся на севере Вьетнама, в районе исследования (рис. 2).

Статистические значения данных об аномалиях высоты, которые использовались для оценки GGM, приведены в табл. 1. Аномалии высоты GPS-нивелирования и GGM над исследуемой областью приведены на рис. 3.

Различия между GPS-нивелированием и глобальной моделью геопотенциала ζ_{GGM} по аномалиям высот высчитываются по формуле (2).

Различия между GPS-нивелированием и глобальными моделями геопотенциала по аномалиям высот приведены в табл. 2.

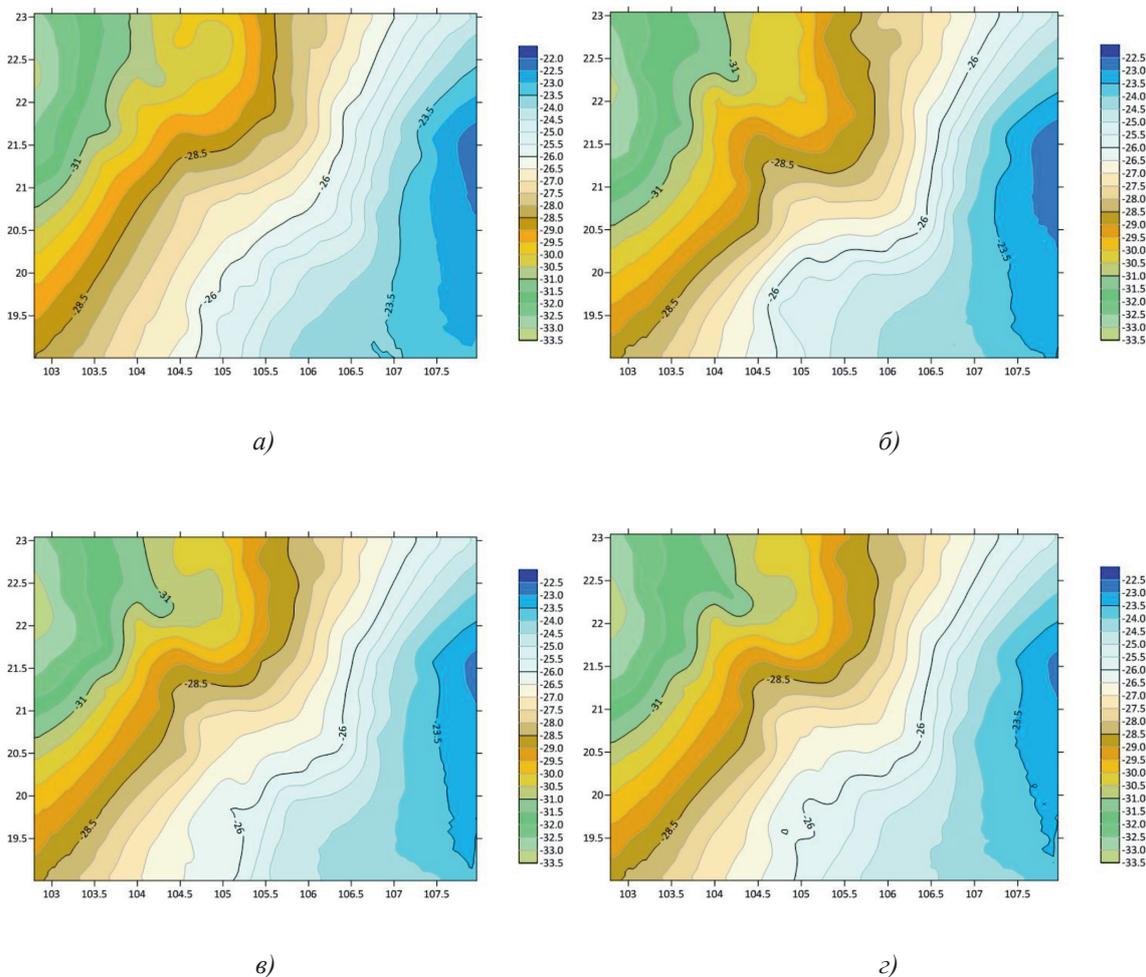


Рис. 3. а) аномалии высоты на 302 пунктах GPS-нивелирования; б) аномалии высоты на 302 пунктах модели EGM 2008; в) аномалии высоты на 302 пунктах модели GECO; г) аномалии высоты на 302 пунктах модели EIGEN-6C4

Таблица 1

Аномалии высот: GPS-нивелирования и GGM (единицы измерения в метрах)

Аномалия высоты	Минимальная	Максимальная	Средняя	Средняя квадратическая ошибка
$\zeta_{H^{\Gamma}-H^{\gamma}}$	-33,1677	-22,122	-27,175	2,289
$\zeta_{\text{ГМГ}(EGM 2008)}$	-33,0050	-22,575	-27,603	2,266
$\zeta_{\text{ГМГ}(EIGEN-6C4)}$	-33,2367	-22,761	-27,672	2,255
$\zeta_{\text{ГМГ}(GECO)}$	-33,3481	-22,708	-27,672	2,272

Таблица 2

Отклонения значений аномалии высот GPS-нивелирования и трех глобальных моделей геоида (GGM) на 302 пунктах

Аномалии высот (м)	Min отклонение (м)	Max отклонение (м)	Сред. отклонение (м)	Средняя квадратическая ошибка
$\zeta_{H^{\Gamma}-H^{\gamma}} - \zeta_{\text{ГМГ}(EGM 2008)}$	-0,5539	1,230	0,428	0,374
$\zeta_{H^{\Gamma}-H^{\gamma}} - \zeta_{\text{ГМГ}(EIGEN-6C4)}$	-0,2443	1,014	0,497	0,229
$\zeta_{(H^{\Gamma}-H^{\gamma})} - \zeta_{\text{ГМГ}(GECO)}$	-0,1865	0,983	0,497	0,214

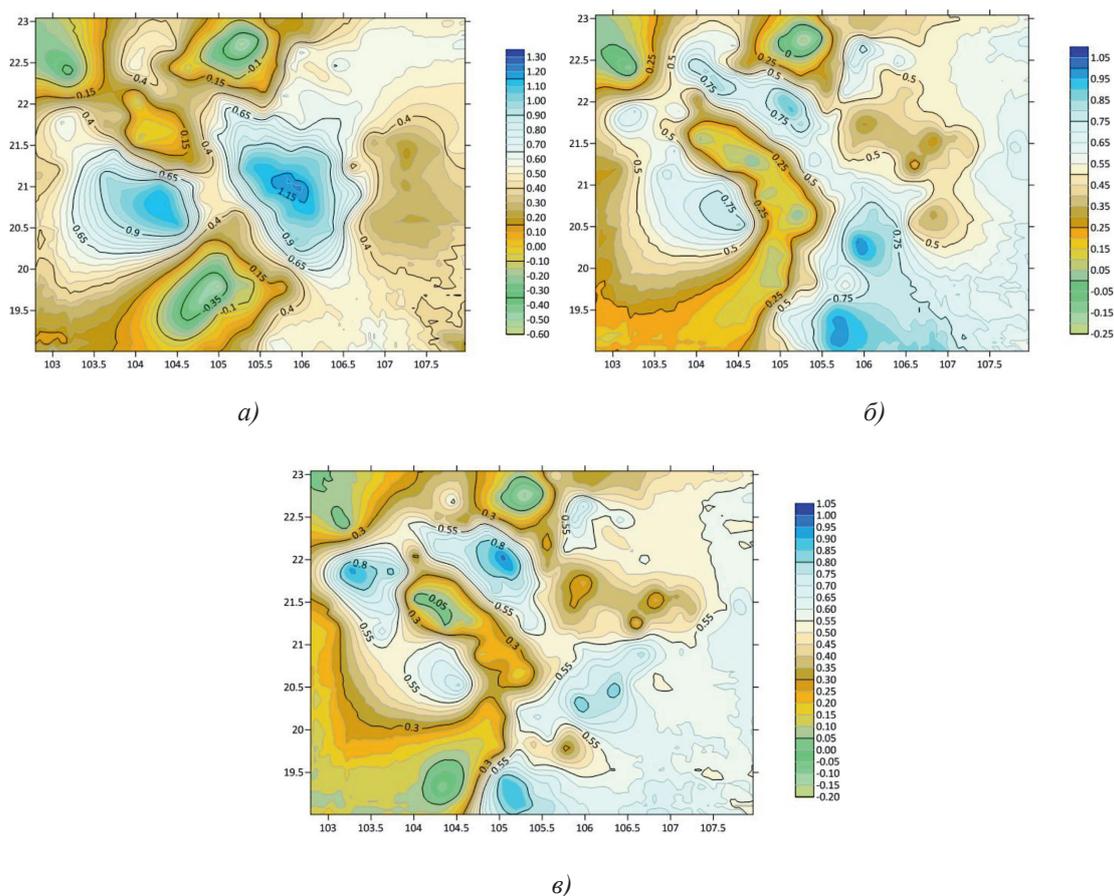


Рис. 4. а) сравнительная оценка данных аномалии высот из GPS-нивелирования с аномалиями высот модели EGM 2008 на 302 пунктах; б) сравнительная оценка данных аномалии высот GPS-нивелирования с аномалиями высот модели EIGEN-6C4 на 302 пунктах; в) сравнительная оценка данных аномалии высот GPS-нивелирования с аномалиями высот модели GECO на 302 пунктах

Заключение

Из табл. 2 очевидно, что модель GECO лучше всего подходит для данных, полученных из GPS-нивелирования, по сравнению с другими моделями в исследуемой области. Средняя квадратическая ошибка $\zeta_{(H^{\Gamma}-H^{\gamma})} - \zeta_{\text{ГМГ}(GECO)}$ меньше в 1,75 раза по сравнению с $\zeta_{H^{\Gamma}-H^{\gamma}} - \zeta_{\text{ГМГ}(EGM2008)}$, а также меньше в 1,07 раза по сравнению с $\zeta_{(H^{\Gamma}-H^{\gamma})} - \zeta_{\text{ГМГ}(EIGEN-6C4)}$. Различия аномалии высоты ($\zeta_{H^{\Gamma}-H^{\gamma}} - \zeta_{\text{ГМГ}}$) в исследуемой области показаны на рис. 4.

Из результатов оценки GGM можно сделать вывод, что GECO может быть использована в качестве эталонной геоидной модели для дальнейшего определения локального квазигеоида на территории северного Вьетнама.

Список литературы / References

1. Barthemes F. (2013) Definition of Functionals of the Geopotential and Their Calculation from Spherical Harmonic Models, Scientific Technical Report STR09/02. [Electronic resource]. URL: <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/> (date of access: 12.01.2021).
2. Maddalena Gilardoni, Mirko Reguzzoni, Daniele Sampietro. GECO: a global gravity model by locally combining GOCE data and EGM2008. *Studia Geophysica et Geodaetica*. 2016. Vol. 60. P. 228–247. DOI: 10.1007/s11200-015-1114-4.
3. Pavlis N. (2009). Версия EGM2008-WGS 84. [Электронный ресурс]. URL: http://earthinfo.nga.mil/GandG/wgs-84/gravity-mod/egm2008/egm08_wgs84.html (дата обращения: 12.01.2021).
4. Pavlis N. (2009). Version EGM2008-WGS 84. [Electronic resource]. URL: http://earthinfo.nga.mil/GandG/wgs-84/gravity-mod/egm2008/egm08_wgs84.html (date of access: 12.01.2021) (in Russian).
5. Foerste C., Bruinsma S.L., Abrikosov O., Lemoine J.-M., Marty J.C., 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.
6. Mustafa Yilmaz, Bayram Turgut, Mevlüt Güllü, Ibrahim Yilmaz. Evaluation of recent global geopotential models based on GPS/levelling data: internal aegean region. *International Journal of Engineering and Geosciences (IJEG)*. 2016. Vol. 1. P. 18–23. DOI: 10.26833/ijeg.285221.