

В. Ф. Канушин¹, Д. Н. Голдобин¹, Н. Н. Кобелева^{1}, И. В. Зверев¹,*

Определение модели квазигеоида, адаптированной к данным ГНСС-нивелирования на территории Новосибирской области

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: n.n.kobeleva@mail.ru

Аннотация. Новосибирская область (НСО), как динамично развивающийся регион с интенсивным строительством и инфраструктурными проектами, требует современных и точных геодезических данных для проектирования и реализации различных инженерных задач. Доступность множества глобальных геопотенциальных моделей (GGM) высокой степени, таких как EGM2008, EIGEN-6C4, GECO, SGG-UGM-1, SGG-UGM-2 и XGM2019c, предоставляют пользователям широкие возможности выбора оптимальной модели для определения высот квазигеоида на территории НСО. В данном исследовании точность моделей оценивается путем сравнения с данными ГНСС/нивелирования. Различия между высотами, полученными с использованием ГНСС технологий и на основе гармонических коэффициентов моделей геопотенциала EIGEN-6C4 и XGM2019c, составляют стандартное отклонение ($\sigma = 0,075$ м), меньшее по сравнению с другими моделями геопотенциала, колеблющимися в диапазоне от 0,078 до 0,084 м. Полученные результаты могут быть полезны при разработке локальных моделей квазигеоида для Новосибирской области. Результаты исследования имеют практическую значимость для задач геодезии, картографии, а также для обеспечения точности инженерно-геодезических работ.

Ключевые слова: глобальные модели геопотенциала, квазигеоид, ГНСС технологии, геометрическое нивелирование, сравнительный анализ

V F. Kanushin¹, D. N. Goldobin¹, N. N. Kobeleva^{1} I. V. Zverev¹*

Determination of a quasi-geoid model adapted to GNSS/leveling data on the territory of the Novosibirsk region

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: n.n.kobeleva@mail.ru

Abstract. The Novosibirsk region (NSO), as a dynamically developing region with intensive construction and infrastructure projects, requires modern and accurate geodetic data for the design and implementation of various engineering tasks. The availability of a variety of high-grade global geopotential models (GGMs), such as EGM2008, EIGEN-6C4, GECO, SGG-UGM-1, SGG-UGM-2 and XGM2019c, provides users with ample opportunity to select the optimal model for determining quasi-geoid heights in the NSO. In this study, the accuracy of the models is assessed by comparison with GNSS/leveling data. The differences between the heights obtained using GNSS technologies and based on the harmonic coefficients of the EIGEN-6C4 and XGM2019c geopotential models are a standard deviation ($\sigma = 0.075$ m) smaller compared to other geopotential models, ranging from 0.078 to 0.084 m. The obtained results obtained may be useful in developing local quasi-geoid models for the Novosibirsk region. The results of the study are of practical significance for the tasks of geodesy, cartography, as well as for ensuring the accuracy of engineering and geodetic work.

Keywords: global geopotential models, quasi-geoid, GNSS technologies, geometric leveling, comparative analysis

Введение

С начала 1960-х годов были составлены многочисленные глобальные модели геопотенциала (ГМГ) с использованием разнородных материалов. Данные могут включать спутниковые измерения (полученные с помощью спутниковых градиентометрии, альтиметрии и лазерной локации), измерения наземной гравиметрии (полученные на поверхности Земли, на морской поверхности или с воздуха), топографические данные (включая цифровые модели рельефа и батиметрии) или ранее полученные показатели, рассчитанные по глобальным гравитационным моделям [1–9].

Повышение точности моделирования глобального гравитационного поля Земли и связанной с ним модели квазигеоида, в глобальном и локальном масштабах, считается одной из основных задач геодезии. В работе поставлена задача исследовать современные высокостепенные глобальные модели геопотенциала для определения модели квазигеоида на территории НСО.

Можно выделить две категории моделей: спутниковые и комбинированные.

Современные спутниковые модели основаны на данных космических миссий GRACE /GRACE Follow-On, GOCE и LAGEOS [10–12]. Комбинированные модели могут также включать данные спутниковой альтиметрии и наземных данных, а совсем недавно в них была включена топография для учета высоких частот спектра гравитационного поля Земли. Глобальные гравитационные модели представлены как набор коэффициентов сферических гармоник и редко как коэффициенты эллипсоидных гармоник. Различные модели имеют разные максимальные степени и порядки разложения в зависимости от исходных данных и подхода, которого придерживались разработавшие их исследователи.

Тестируемые глобальные модели геопотенциала представлены в таблице 1. К ним относятся как спутниковые, так и комбинированные модели, опубликованные недавно и более ранние их комбинации, доступные для публичного использования на сайте Германского научно-исследовательского центра наук о Земле (ICGEM, <http://icgem.gfz-potsdam.de>).

Таблица 1

Основные характеристики моделей

№	Наименование модели	Год публикации	Максимальная степень, d/o	Исходные данные
1	EGM2008	2008	2190	A, G, S(Grace)
2	EIGEN-6C4	2014	2190	S(Goce, Grace, Lageos), G, A
3	GECO	2015	2190	EGM2008, S(Goce)
4	SGG-UGM-1	2018	2159	EGM2008, S(Goce)
5	SGG-UGM-2	2020	2190	A, EGM2008, S(Goce), S(Grace)
6	XGM2019e_2159	2019	2190	A, G, S(GOCO06s), T

В таблице 1 приняты следующие обозначения:

S – данные спутниковых гравиметрических миссии;

T – гравитационное влияние рельефа;

G – данные наземных гравиметрических измерений;

A – данные альтиметрических измерений.

Методы и материалы

Для оценки точности исследуемых моделей использован участок на территории Новосибирской области, на котором на 199 пунктах $P(\varphi, \lambda)$ получены значения высот квазигеоида $\zeta_T(P)$, относительно эллипсоида WGS-84. Схема расположения геодезических пунктов на территории НСО, приведена на рис. 1.

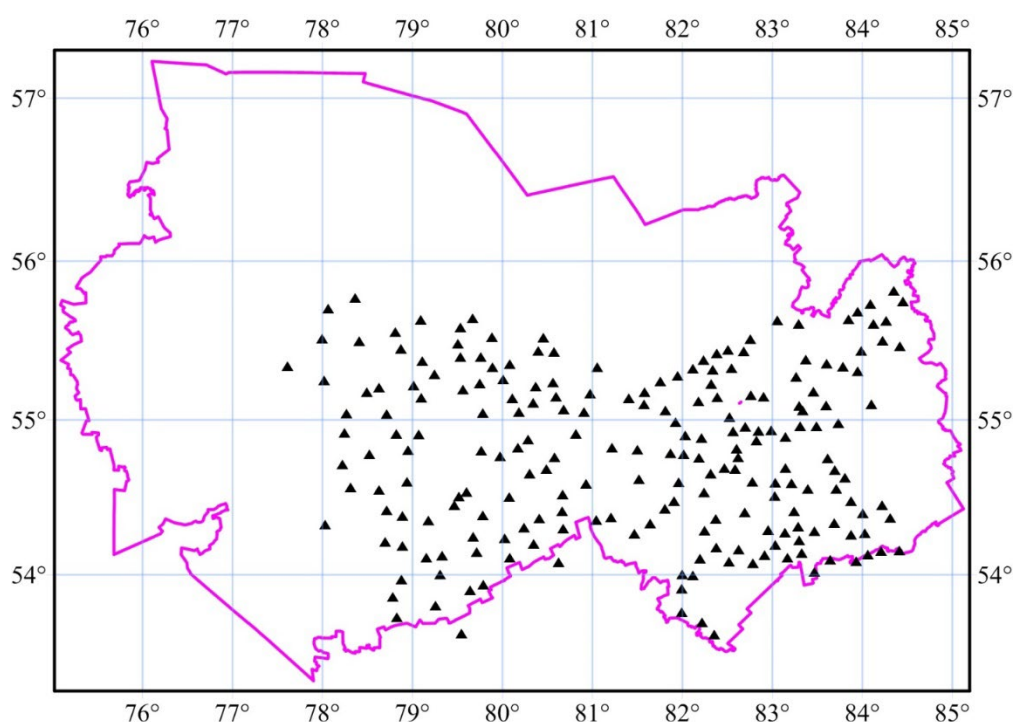


Рис. 1. Расположение геодезических пунктов на территории НСО

На каждом геодезическом пункте $P(\varphi, \lambda)$ заданы нормальные высоты $H^g(P)$, полученные из геометрического нивелирования 1-4 классов. На этих же пунктах выполнены спутниковые координатные определения в рамках развития геодезической сети активных базовых станций (ГС АБС) [13, 14]. В результате получены геодезические высоты $H^r(P)$, средние квадратические погрешности которых из уравнивания спутниковой сети находятся в интервале от 1,5 см до 3,1 см, а в среднем – 1,8 см.

Сравнительная оценка точности тестируемых глобальных моделей выполнена по формуле

$$\delta\zeta(P) = \zeta_T(P) - \zeta_c(P), \quad (1)$$

где $\zeta_c(P)$ – высота квазигеоида, вычисленная на пункте $P(\varphi, \lambda)$ по нормированным гармоническим коэффициентам \bar{C}_{nm} и \bar{S}_{nm} тестируемых моделей геопотенциала, по формуле

$$\zeta_c(\varphi, \lambda, \rho) = \frac{fM}{\rho\gamma(\varphi)} \sum_{n=2}^N \left(\frac{a_e}{\rho} \right)^n \sum_{m=0}^n (\Delta\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \varphi), \quad (2)$$

где φ, λ, ρ – геоцентрические широта, долгота и радиус-вектор притягиваемой точки P , здесь $\rho = R + H^y(P)$;

$\bar{P}_{nm}(\sin \varphi)$ – нормированная присоединенная функция Лежандра степени n и порядка m ;

$\Delta\bar{C}_{nm} = \bar{C}_{nm} - \bar{C}_{nm}^0$ – разность нормированных гармонических коэффициентов геопотенциала реального и нормального поля силы тяжести;

\bar{C}_{nm}^0 – безразмерные нормированные гармонические коэффициенты геопотенциала нормального поля силы тяжести (отнесенного к общеземному эллипсоиду WGS-84);

\bar{C}_{nm} и \bar{S}_{nm} – безразмерные нормированные гармонические коэффициенты геопотенциала;

n и m – номер степени и порядка разложения соответственно;

a_e – большая полуось эллипсоида.

Значения высот квазигеоида $\zeta_T(P)$ на геодезических пунктах найдены по формуле

$$\zeta_T(P) = H^T(P) - H^y(P), \quad (3)$$

где $H^T(P)$ – геодезическая высота, полученная по спутниковым данным, $H^y(P)$ – нормальная высота, найденная по результатам геометрического нивелирования.

Вычисления по формуле (1-3) выполнялись с помощью программы Geo_ABSGRAV [15].

Результаты

В таблице 2 приведены статистические параметры распределения разностей $\delta\zeta(P)$, полученных в результате сравнения высот квазигеоида $\zeta_T(P)$, вычисленных с применением формулы (2) по данным моделей EGM2008, EIGEN-6C4, GECO, SGG-UGM-1, SGG-UGM-2, XGM2019, которые представлены в виде набора гармонических коэффициентов геопотенциала до степени $N_{\max} = 2190$, с

высотами квазигеоида $\delta\zeta(P)$, полученными на 199 пунктах $P(\varphi, \lambda)$ на территории Новосибирской области.

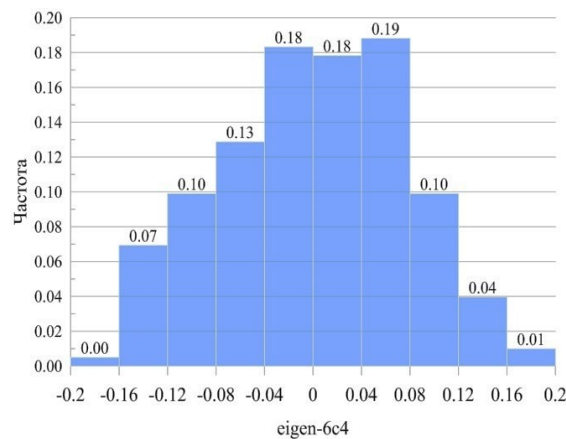
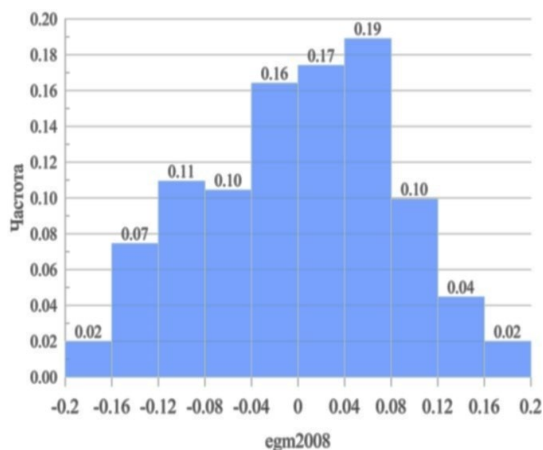
Таблица 2

Статистические параметры распределения разностей $\delta\zeta(P)$

Модели геопотенциала	EGM2008	EIGEN-6с4	GECO	SGG-UGM-1	SGG-UGM-2	XGM2019e 2159
Числовое значение	199	199	199	199	199	199
Минимум (м)	-0,219	-0,190	-0,188	-0,210	-0,218	-0,215
Максимум (м)	0,180	0,177	0,164	0,194	0,155	0,136
Диапазон (м)	0,399	0,368	0,352	0,404	0,373	0,351
Среднее (м)	-0,012	-0,008	-0,012	-0,010	-0,035	-0,036
Стандартное отклонение (м)	0,084	0,075	0,078	0,081	0,080	0,075

Из табл. 2 видно, что у моделей EIGEN-6с4 и XGM2019e стандартное отклонение составляет $\sigma = 0,075$ м и меньше по сравнению с другими моделями геопотенциала на величины от 0,003 до 0,009 м.

Гистограммы распределения разностей $\delta\zeta(P)$ между высотами квазигеоидов, полученными по данным моделей (EGM2008, EIGEN-6с4, GECO, SGG-UGM-1, SGG-UGM-2, SGG-UGM-2), и высотами квазигеоида, полученными по данным совместного использования спутниковых и наземных геодезических измерений (в метрах) на территории Новосибирской области, приведены на рисунке 2.



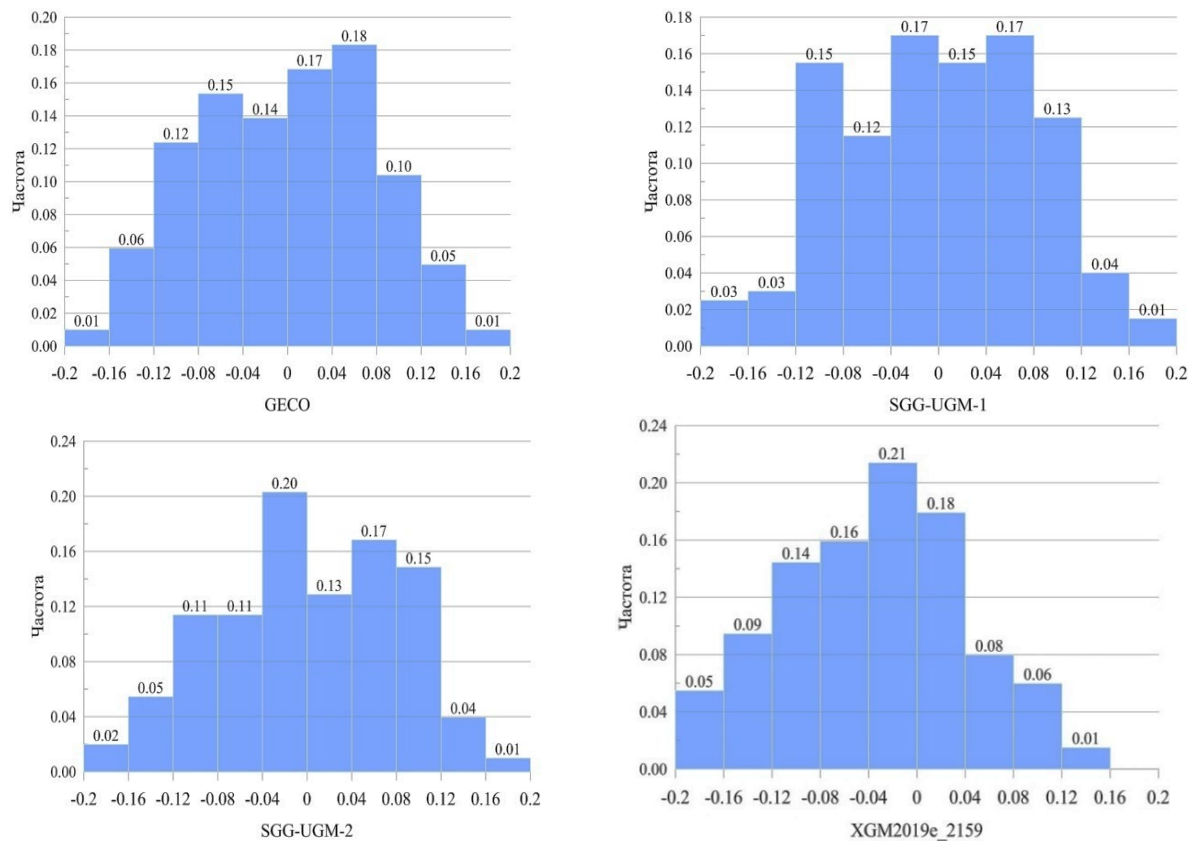


Рис. 2 Гистограммы распределения разностей $\delta\zeta$, м

Проанализировав гистограммы, приведенные на рисунке 2, видно, что распределение разностей $\delta\zeta$ близко к нормальному распределению. Однако, наибольший их процент (62 %), попадающих в интервал ± 7 см, имеют гистограммы, построенные по разностям $\delta\zeta$ между значениями высот квазигеоида, полученными по формуле (3) и вычисленным по формуле (2) по данным моделей XGM2019e и EIGEN 6c4. Однако по характеру распределения разностей $\delta\zeta$ в интервале ± 14 см можно сделать вывод о том, что модель XGM2019e наиболее пригодна для территории Новосибирской области.

Заключение

Таким образом, используя гармонические коэффициенты геопотенциала современных глобальных моделей EGM2008, EIGEN-6C4, GECO, SGG-UGM-1, SGG-UGM-2 и XGM2019c в работе выполнено тестирование моделей путем сравнения модельных данных с независимыми данными, полученными с помощью ГНСС и геометрического нивелирования на территории НСО.

Из результатов сравнительного анализа моделей геопотенциала EGM2008, EIGEN-6C4, GECO, SGG-UGM-1, SGG-UGM-2 и XGM2019 с независимыми значениями высот геоида, полученными в результате ГНСС технологий и геометрического нивелирования на 199 геодезических пунктах на территории Новосибирской области, можно сделать вывод о том, что высокостепенная модель геопотенциала

тенциала XGM2019с, ограниченная степенью 2190 может быть пригодной для определения высот квазигеоида на территории НСО.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках СЧ НИР «ГЕОТЕХ-КВАНТ-2» с целью создания высокоточных моделей геопотенциального поля Земли и его характеристик на территории РФ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Koneshov V. N., Nepoklonov V. B., Sermyagin R. A., Lidovskaya E. A. Modern global Earth's gravity field models and their errors // Gyroscopy and Navigation. – 2013. – Vol. 4, No. 3. – P. 147–155.
2. Конешов В. Н., Непоклонов В. Б., Соловьёв В. Н., Железняк Л. К. Сравнение современных глобальных ультравысокостепенных моделей гравитационного поля земли // Геофизические исследования. – 2019. – Т. 20, № 1. – С. 13-26.
3. Karpik A. P., Kanushin V. F., Ganagina I. G. et al. Evaluation of recent Earth's global gravity field models with terrestrial gravity data // Contributions to Geophysics and Geodesy. – 2016. – Vol. 46, No. 1. – P. 1-11.
4. Канушин В. Ф., Карпик А. П., Ганагина И. Г., Голдобин Д. Н., Косарев Н. С., Косарева А. М. Исследование современных глобальных моделей гравитационного поля Земли : монография. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – 270 с.
5. Mayer-Guerr T. ITG-Grace03s: the latest GRACE gravity field solution [Electronic resource]. – Режим доступа: http://www.massentransporte.de/fileadmin/20071015-17-Potsdam/mo_1050_06_mayer.pdf.
6. Kvas A. ITSG-Grace 2014 [Electronic resource]. – Режим доступа: http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/TU_Graz/Einrichtungen/Institute/Homepages/i5210/research/ITSG-Grace2014.
7. Голдобин Д. Н. Определение геометрической структуры гравитационного поля на территории западной сибери по данным современных глобальных моделей геопотенциала // Вестник СГУГиТ – 2019. – Т. 24 (2). – С. 19-34.
8. Канушин В. Ф., Ганагина И. Г., Голдобин Д. Н., Мазурова Е. М., Косарев Н. С., Косарева А. М. Современные глобальные модели квазигеоида: точностные характеристики и разрешающая способность // Вестник СГУГиТ – 2017. – Т. 22, № 1. – С. 30-49.
9. Канушин В.Ф., Голдобин Д.Н., Кобелева Н.Н. Исследование точности глобальных моделей геопотенциала EGM2008, EIGEN-6C4, GECO, SGG-UGM-1, SGG-UGM-2, XGM2019 на территории Российской Федерации// Вестник СГУГиТ, Т. 28, №3, 2023. – С. 16-22.
10. Mayer-Guerr T. ITG-Grace03s: the latest GRACE gravity field solution [Electronic resource]. – Режим доступа: http://www.massentransporte.de/fileadmin/20071015-17-Potsdam/mo_1050_06_mayer.pdf.
11. Kvas A. ITSG-Grace 2014 [Electronic resource]. – Режим доступа: http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/TU_Graz/Einrichtungen/Institute/Homepages/i5210/research/ITSG-Grace2014.
12. Biancale R. An improved 10-day time series of the geoid from GRACE and LAGEOS data [Electronic resource]. – Режим доступа : ftp://ftp.csr.utexas.edu/pub/grace/Proceedings/Presentations_GSTM2008.pdf.
13. Карпик, А.П. Реализация проекта наземной ифраструктуры глобальной навигационной спутниковой системы “ГЛОНАСС” на территории Новосибирской области /А.П.Карпик, Г.А.Сапожников, А.В.Дюбанов//Сб.матер.VI Междунар. конгр. “ГЕО-Сибирь-2010”. – Новосибирск, 2010.

14. Научно-технический отчет по созданию на территории НСО наземной инфраструктуры для обеспечения эффективного использования глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС / А.П.Карпик, С.В.Середович, О.В. Твердовский, А.П.Решетов. – Новосибирск, 2010.

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018666260 Geo_ABSGRAV в реестре программ для ЭВМ / Д. Н. Голдобин ; правообладатель Сиб. гос. ун-т геосистем и технологий (RU) ; дата поступления 26.11.2018; дата регистрации 13.12.2018

© В. Ф. Канушин, Д. Н. Голдобин, Н. Н. Кобелева, И. В. Зверев, 2024