

УДК [528.242:528.236]+004.9

DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-2-40-46

Методика формирования цифровых моделей высот геоида для референчных систем координат

Н. К. Шендрик^{1*}

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

* e-mail: snk_aig@mail.ru

Аннотация. Разработана методика формирования цифровых моделей высот геоида для референчных систем координат с использованием программного обеспечения «Trimble Business Center» (ПО «ТВС»). Исходными моделями могут быть известные в открытом доступе высокоточные глобальные модели высот геоида EGM2008, EIGEN6C4 и иные модели, файлы которых с расширением *.ggf совместимы с ПО «ТВС». В основу методики положена возможность экспорта из ПО «ТВС» в формате ASCII ортометрических высот на заданный пользователем участок на поверхности общеземного эллипсоида WGS-84 для заданной равномерной сетки узлов по широте и долготе. Полученная таблица данных является исходной для вычисления высот геоида для референчных систем координат, которые определены параметрами соответствующих референц-эллипсоидов и параметрами Гельмерта – пространственного положения, ориентировки и линейного масштаба относительно общеземной системы координат [1]. Перечисленные исходные данные достаточны для вычисления цифровой модели высот геоида для произвольной референчной системы координат. Актуальность разработанной методики заключается в возможности ее использования для значительно более точного вычисления параметров Гельмерта для региональных и иных территорий по сравнению с принятыми стандартными значениями и, соответственно, более точного преобразования трехмерных положений пунктов между общеземными и референчными системами координат (перечисленные вопросы будут рассмотрены в последующей публикации автора). Апробация методики выполнена для нескольких региональных территорий: Новосибирской и Московской областей, территории Западной Сибири, Республики Беларусь, выборочно, в системах координат СК-42 и СК-95. Некоторые результаты представлены графически в виде картосхем высот геоида для Новосибирской области и на территорию Западной Сибири.

Ключевые слова: методика формирования цифровых моделей высот геоида для референчных систем координат, глобальные модели высот геоида, общеземная и референчная системы координат, параметры Гельмерта, региональная территория, картосхемы высот геоида

Введение

Интенсивное применение в геодезическом производстве современных высокоточных спутниковых технологий предполагает использование расширенной номенклатуры общеземных и референчных систем координат (СК) по сравнению с классическими технологиями и, соответственно, предъявляет более высокие требования к точности преобразования положений пунктов между различными СК, а также к совершенствованию алгоритмов преобразования. Для значительной части спутниковых геодезических приемников в качестве основной, рабочей, системы координат принята общеземная СК WGS-84. Системы координат в спутниковой геодезии предполагают

трехмерные пространственные положения объектов (пунктов) в виде прямоугольных (XYZ) либо геодезических (BLH) координат. Наземные геодезические технологии используют положение пунктов с раздельным представлением в плане и по высоте в виде плоских прямоугольных координат (xy) и нормальных высот (H^N). Пространственные положения пунктов, получаемые из спутниковых измерений, имеют точность на уровне миллиметров-сантиметров, а плоские прямоугольные координаты и нормальные высоты, как правило, ограничены точностью каталогов в существующих до настоящего времени СК-42 и СК-95, которые могут иметь на порядок меньшую точность. Принятая в Российской Федерации с 01.01.2021 государственная система координат

нат ГСК-2011 [2] сопоставима с точностью спутниковых измерений в пространственном представлении, а также в представлении плоских прямоугольных координат, но нормальные высоты, к сожалению, базируются на прежних каталогах. Чтобы корректно преобразовывать нормальные высоты пунктов в геодезические для референц-эллипсоида, необходима модель высот квазигеоида для каждой референцной СК, характеризующейся параметрами референц-эллипсоида и параметрами Гельмерта – пространственного положения, ориентировки и линейного масштаба относительно общеземной системы координат. Таких моделей необходимого уровня точности в открытом доступе, к сожалению, не имеется. Поэтому для решения задачи корректного преобразования нормальных высот в референцные геодезические высоты предлагается использовать доступные в открытом информационном пространстве высокоточные глобальные модели высот геоида, в частности, модель EGM2008, файл которой в формате *.ggf совместим с ПО «ТВС». Была поставлена задача – на базе модели EGM2008 разработать методику и отработать алгоритмы формирования моделей высот геоида для произвольных референцных СК. Такие модели высот геоида должны с максимальной корректностью и точностью обес-

печивать переход от нормальных высот к геодезическим в прямом и обратном направлении и, соответственно, вычисление уточненных, адаптированных к исходным данным, параметров Гельмерта (перечисленные вопросы будут рассмотрены в последующей публикации автора). В результате станет возможным решение задачи наиболее точного преобразования трехмерных положений пунктов между общеземными пространственными положениями пунктов и плоскими прямоугольными координатами и нормальными высотами для референцных систем координат. Рассмотрению создания и применения моделей высот геоида посвящены работы [3–9].

Методика формирования цифровых моделей высот геоида для референцных систем координат

В основу методики положено формирование цифровой таблицы ортометрических высот для заданной равномерной сетки узлов для участка на поверхности общеземного эллипсоида WGS-84 с использованием ПО «Trimble Bussines Center» и модели высот геоида EGM2008. На рис. 1 приведена схема условного расположения поверхностей общеземного эллипсоида WGS-84, референц-эллипсоида и геоида.

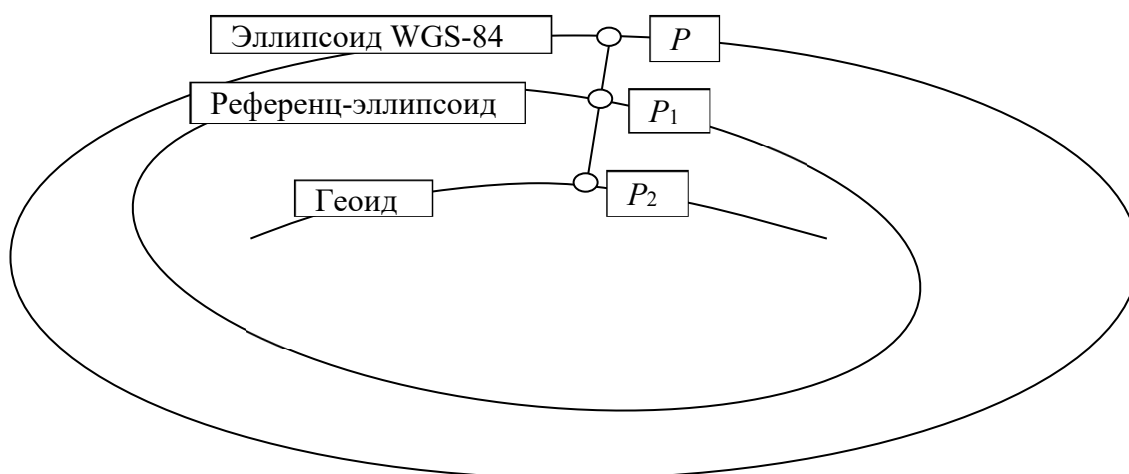


Рис. 1. Схема условного расположения поверхностей общеземного эллипсоида, референц-эллипсоида и геоида

Исходная точка P (прототип одного из узлов сетки) расположена на поверхности общеземного эллипсоида WGS-84, точки P_1

и P_2 являются ее проекциями по нормали к поверхности общеземного эллипсоида на поверхность референц-эллипсоида и по-

верхность геоида, соответственно. Несовпадениями между нормальными к поверхностям эллипсоидов и силовой линией геоида можно пренебречь [10, 11]. Тогда отрезок P_1P будет соответствовать геодезической высоте H_{hae} точки P над референц-эллипсоидом, отрезок P_2P – ортометрической высоте H_{msl} точки P над поверхностью геоида, а отрезок P_1P_2 – высоте геоида ζ относительно поверхности референц-эллипсоида. В результате можно написать следующее соотношение:

$$\zeta = H_{hae} - H_{msl}. \quad (1)$$

Преобразование модели высот геоида EGM2008 в референцную систему координат выполняется в следующей последовательности:

- 1) формирование исходного файла геодезических координат (BLH) для равномерной сетки узлов по широте и долготе на поверхности общеземного эллипсоида WGS-84 для территории, ограниченной значениями минимальных и максимальных значений по широте и долготе;
- 2) импорт исходного файла сетки узлов в проект UTM ПО «ТВС»;
- 3) экспорт преобразованного исходного файла сетки узлов, где нулевые значения геодезических высот изменяются на значения

ортометрических высот относительно эллипсоида WGS-84. На этом работа в ПО «ТВС» заканчивается;

4) преобразование исходного файла для сетки узлов с нулевыми высотами из геодезической СК (BLH) в пространственную прямоугольную СК (XYZ) для эллипсоида WGS-84 [12];

5) преобразование сетки узлов из пространственной прямоугольной СК (XYZ) для эллипсоида WGS-84 в пространственную прямоугольную СК ($X'Y'Z'$) референцной системы координат с использованием стандартных параметров Гельмерта [1, 13];

6) преобразование сетки узлов из пространственной прямоугольной СК ($X'Y'Z'$) референцной СК в геодезические ($B'L'$) координаты [12] и вычисление высот геоида для референцной СК по формуле (1);

7) окончательное формирование цифровой модели высот геоида путем добавления информации (первой) строки для участка сетки узлов с указанием минимальных и максимальных широт и долгот, дискретности сетки по широте и долготу и указание на идентификацию референцной СК для данной модели высот геоида [5].

Фрагмент файла сформированной цифровой модели высот геоида для референцной СК-95 на территорию Новосибирской области приведен в таблице.

Фрагмент файла цифровой модели высот геоида для референцной системы координат СК-95 для Новосибирской области

53,00	57,00	75,00	85,00	0,0125	EGM2008	СК95	NSO
	52,999555779				75,000892732		-5,9004
	52,999555689				75,013392342		-5,9089
	52,999555599				75,025891951		-5,9173
	52,999555509				75,038391561		-5,9258
	52,999555419				75,050891171		-5,9342

В первой строке-шапке файла указаны в градусах – минимальные и максимальные значения границ участка территории по широте и долготу, дискретность сетки узлов и идентификатор референцной системы координат. В последующих строках по столбцам следуют в референцной СК координаты узлов сетки по широте, долготу и значения

высот геоида. Потенциально модели высот геоида для референцных СК можно сформировать на любые территории. Но так как в ПО «ТВС» имеются ограничения по количеству обрабатываемых узлов, то для больших территорий рекомендуется последовательно формировать участки с количеством узлов до 200 000–250 000, варьируя разме-

рами участков и дискретностью сетки, а затем объединяя их в файл.

Апробация методики формирования цифровых моделей высот геоида для референционных систем координат

Апробация методики формирования цифровых моделей высот геоида для референционных систем координат, кроме табличного формата, выполнена для наглядности в виде графических изображений картосхем высот геоида, в частности, для территории Новосибирской области в системе координат СК-95 и для территории Западной Сибири в системе координат СК-42. Для системы координат ГСК-2011 высоты геоида практически идентичны WGS-84, так как размеры и форма эллипсоидов, а также значения параметров

Гельмерта отличаются незначительно. Средние высоты геоида для систем координат WGS-84 и ГСК-2011 в Новосибирской области составляют порядка 35 метров. На рис. 2, 3 показаны изображения вариантов картосхем высот геоида, полученные с помощью ПО «Surfer». Координатные оси на картосхемах даны в градусах по широте и долготе.

Для референционной системы координат СК-95, образованной относительно эллипсоида Красовского, средние высоты геоида на территории Новосибирской области значительно меньше, чем для WGS-84 или ГСК-2011, имеют значения порядка –6 метров, что указывает на лучшее приближение поверхности эллипсоида Красовского к поверхности геоида. На данной картосхеме условными обозначениями показаны положения пунктов СДГС Новосибирской области.

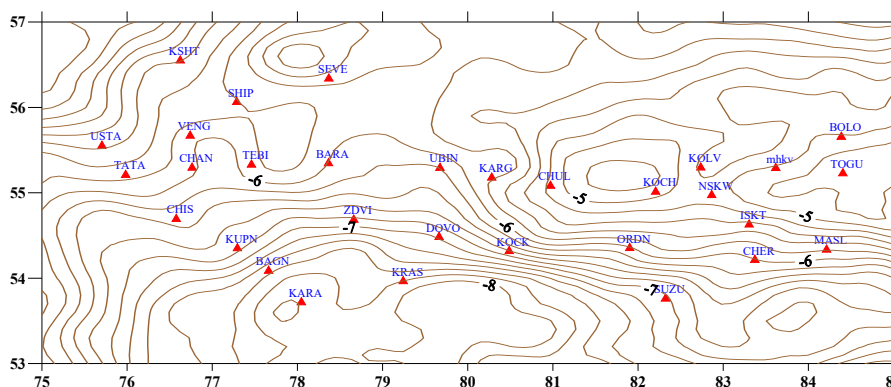


Рис. 2. Картосхема высот геоида EGM2008 на территорию Новосибирской области для референционной системы СК-95 (сечение изолиний 0,2 метра)

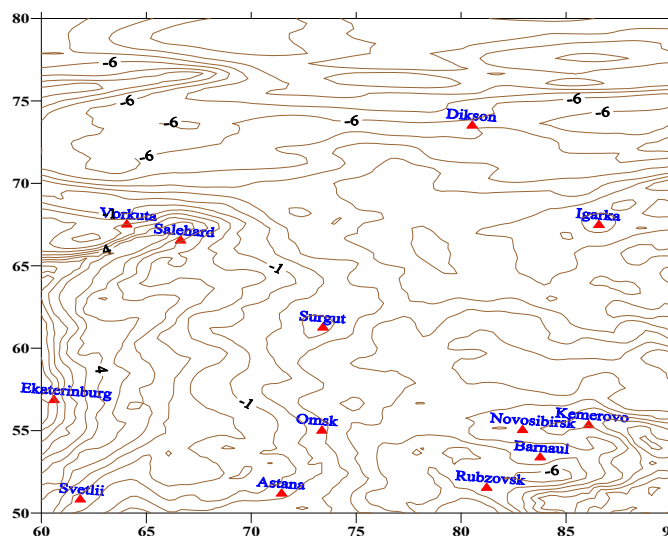


Рис. 3. Картосхема высот геоида EGM2008 на территорию Западной Сибири для референционной системы СК-42 (сечение изолиний 1,0 метра)

Заключение

Разработана методика формирования цифровых моделей высот геоида для референционных систем координат с использованием ПО «Trimble Business Center». Необходимость в данной работе обуславливалась отсутствием в открытом доступе соответствующих моделей высот квазигеоида на территорию России. Для формирования цифровых моделей высот геоида для референционных систем координат, в качестве исходной использована высокоточная глобальная модель высот геоида EGM2008 в формате *.ggf, совместимая с ПО «ТВС». Актуальность разработанной методики заключается в возможности ее использования для значительно более точного вычисления параметров Гель-

мерта для региональных и иных территорий по сравнению с принятыми стандартными значениями параметров и, соответственно, более точного преобразования трехмерных положений пунктов между общеземными и референционными системами координат (данные вопросы будут рассмотрены в последующей публикации автора). В процессе апробации методики были сформированы модели высот геоида для референционных систем координат СК-42, СК-95, ГСК-2011 для региональных территорий – Новосибирской, Кемеровской и Московской областей, территории Республики Беларусь и Западной Сибири. В качестве примера для территорий Новосибирской области и Западной Сибири результаты представлены графически в виде картосхем высот геоида.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 51794–2008. Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек. – М. : Изд-во стандартов, 2008.
2. Об установлении государственных систем координат, государственной системы высот и государственной гравиметрической системы [Электронный ресурс] : постановление Правительства Российской Федерации от 24.11.2016 № 1240. – Доступ из справочно-правовой системы «Консультант Плюс».
3. Горобец В. П. Определение связи между геоцентрической системой координат и СК-95 // Научно-технический сборник «Физическая геодезия». – М. : Научный мир, 2013. – С. 95–101.
4. Руководство пользователя по выполнению работ в системе координат 1995 года (СК-95). ГКИНП (ГНТА) - 06-278–04. – М.: ЦНИИГАиК, 2004. – 138 с.
5. Шендрик Н. К. Формирование локальной цифровой модели высот геоида на территорию Новосибирской области // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 4 (36). – С. 66–73.
6. Голдобин Д. Н., Мазурова Е. М., Канушин В. Ф., Ганагина И. Г., Косарев Н. С., Косарева А. М. Одномерное сферическое преобразование Фурье и его реализация для расчета глобальной модели квазигеоида в нулевом приближении теории Молоденского // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 3 (31). – С. 45–52.
7. Обиденко В. И., Опритова О. А., Решетов А. П. Разработка методики получения нормальных высот на территорию Новосибирской области с использованием глобальной модели геоида EGM2008 // Вестник СГУГиТ. – 2016. – № 1 (33). – С. 14–25.
8. Ганагина И. Г., Челнокова Д. С., Голдобин Д. Н. Создание модели квазигеоида на локальном участке средствами ГИС // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 3 (31). – С. 14–25.
9. 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. 24, № 1. – С. 30–49.
10. Огородова Л. В. Нормальное поле и определение аномального потенциала. – М. : Издательство МИИГАиК, 2011. – С. 39.
11. Пеллинен Л. П. Высшая геодезия (теоретическая геодезия). – М. : Недра, 1978. – С. 65.
12. Морозов В. П. Курс сфероидической геодезии. – М. : Недра, 1979. – 296 с.
13. Герасимов А. П. Спутниковые геодезические сети. – М., 2012. – 176 с.

Об авторах

Николай Кириллович Шендрик – заведующий лабораторией кафедры космической и физической геодезии.

Получено 28.09.2022

© Н. К. Шендрик, 2023

Method of forming digital models of geoid heights for reference coordinate systems

N. K. Shendrik¹*

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: snk_aig@mail.ru

Abstract. A technique was developed for generating digital models of geoid heights for reference coordinate systems using the Trimble Business Center software (TBC software). The source models can be the publicly available high-precision global geoid elevation models EGM2008, EIGEN6C4 and other models whose files with the *.ggf extension are compatible with the TBC software. The technique is based on the possibility of exporting orthometric heights from the TBC software in ASCII format to a user-specified area on the surface of the global WGS-84 ellipsoid for a uniform grid of nodes in latitude and longitude. The resulting data table is the starting point for calculating geoid heights for reference coordinate systems, which are determined by the parameters of the corresponding reference ellipsoids and Helmert parameters - spatial position, orientation and linear scale relative to the global coordinate system, according to Standard. The initial data are sufficient to calculate the digital model of the geoid heights for an arbitrary reference coordinate system. The expediency of the developed technique lies in the possibility of its use for a much more accurate calculation of the Helmert parameters for regional and other territories compared to the accepted standard values and, accordingly, a more accurate transformation of the three-dimensional positions of points between the general earth and reference coordinate systems (these issues will be discussed in a subsequent publication by the author). Approbation of the technique was carried out for several regional territories: Novosibirsk and Moscow regions, the territory of Western Siberia, the Republic of Belarus in the SK42 and SK95 coordinate systems, and the results are presented graphically in the form of geoid height maps.

Keywords: methodology of forming geoid heights digital models for reference coordinate systems, global geoid height models, global and reference coordinate systems, Helmert parameters, regional territory, geoid height maps

REFERENCES

1. Standards Russian Federation. (2008). GOST R 51794–2008. Global navigation satellite systems. Coordinate systems. Methods for transforming coordinates defined points. Moscow: Standards Publ. [in Russian].
2. Decree of the Government of the Russian Federation of November 24, 2016 No. 1240. On the establishment of state coordinate systems, state height system and state gravimetric system. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
3. Gorobets, V. P. (2013). Determination of the connection between the geocentric coordinate system and SK-95. In *Nauchno-tekhnicheskiy sbornik: Fizicheskaya geodeziya [Scientific and Technical Collection: Physical Geodesy]* (pp. 95–101). Moscow: Nauchnyy mir Publ. [in Russian].
4. Geodetic, Cartographic Instructions, Norms and Regulations. (2004). User's guide for performing work in the coordinate system of 1995 (SK-95). GKINP (GNTA) – 06-278-04. Moscow: TsNIIGAiK Publ., 138 p. [in Russian].
5. Shendrik, N. K. (2016). Formation of a local digital geoid height model on the territory of the Novosibirsk region. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 4(36), 66–73 [in Russian].
6. Goldobin, D. N., Mazurova, E. M., Kanushin, V. F., Ganagina, I. G., Kosarev, N. S., & Kosareva, A. M. (2015). One-dimensional spherical Fourier transform and its implementation for calculation of the global quasi-geoid model in the zero approximation of the theory Molodensky. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 3(31), 45–52 [in Russian].

7. Obidenko, V. I., Opritova, O. A., & Reshetov, A. P. (2016). Methodology development obtaining normal heights on the territory of the Novosibirsk region with using the global geoid model EGM2008. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1(33), 14–25 [in Russian].
8. Ganagina, I. G., Chelnokova, D. S., & Goldobin, D. N. (2016). Model creation quasi-geoid in a local area using GIS. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 3(31), 14–25 [in Russian].
9. Kanushin, V. F., Ganagina, I. G., Goldobin, D. N., Mazurova, E. M., Kosarev, N. S., & Kosareva, A. M. (2017). Modern global quasi-geoid models: accuracy characteristics and resolution. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(1), 30–49 [in Russian].
10. Ogorodova, L. V. (2011). *Normal'noe pole i opredelenie anomal'nogo potentsiala [Normal field and definition of anomalous potential]*. Moscow: MIIGAiK Publ., p. 39 [in Russian].
11. Pellinen, L. P. (1978). *Normal'noe pole i opredelenie anomal'nogo potentsiala [Higher geodesy (theoretical geodesy)]*. Moscow: "Nedra" Publ., p. 65 [in Russian].
12. Morozov, V. P. (2012). *Kurs sferoidicheskoy geodezii [Course of spheroid geodesy]*. Moscow: "Nedra" Publ., 296 p. [in Russian].
13. Gerasimov, A. P. (2012). *Sputnikovye geodezicheskie seti [Satellite geodetic networks]*. Moscow, 176 p. [in Russian].

Author details

Nikolay K. Shendrick – Head of the Laboratory of the Department of Space and Physical Geodesy.

Received 28.09.2022

© *N. K. Shendrick*, 2023