

УДК 528.21

**АНАЛИЗ ПОЛУЧЕНИЯ НОРМАЛЬНЫХ ВЫСОТ ТОЧЕК ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И МОДЕЛЕЙ ГЕОИДА****К.И. МАРКОВИЧ; М.В. МАКАРОВА**  
(Полоцкий государственный университет)

*Представлен анализ возможности получения нормальных высот точек земной поверхности с использованием данных спутниковых измерений и глобальных гравитационных моделей Земли. Выполнена оценка точности моделей геоида EGM2008, EIGEN-6C4 по разностям аномалий высот, вычисленных для пунктов геодезической сети учебно-научного полигона Полоцкого государственного университета по инструментальным данным и данным моделей.*

**Ключевые слова:** спутниковые измерения, нормальные высоты, точки земной поверхности, модели геоида, разности аномалий высот.

Как известно, конечным итогом спутниковых измерений являются пространственные прямоугольные координаты определяемой точки в геоцентрической общеземной системе координат WGS-84, которые по известным формулам строго преобразуются в геодезические координаты системы WGS-84: широту  $B$ , долготу  $L$ , геодезическую высоту  $H$ . Дальнейшее преобразование координат из общеземной пространственной системы координат WGS-84 в другие системы (СК-42, СК-95) выполняется с использованием параметров перехода, представляющих собой семь элементов пространственной ортогональной модели:  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$  – линейные параметры сдвига систем;  $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$  – угловые параметры поворота систем;  $m$  – масштабный коэффициент.

В практике топографо-геодезических работ распространены плоские прямоугольные координаты в проекции Гаусса – Крюгера и нормальные высоты. Актуальным на сегодняшний день для Беларуси является возможность получения нормальных высот по данным ГНСС-измерений с точностью, удовлетворяющей крупномасштабным топографическим съемкам, а также иным видам геодезических работ.

Согласно теории Молоденского, геодезические высоты  $H$  являются суммой слагаемых: расстояния от референц-эллипсоида до поверхности квазигеоида (аномалии высоты  $\zeta$ ) и расстояния от поверхности квазигеоида до соответствующей точки поверхности Земли (нормальной высоты  $H^f$ ) [1]

$$H = H^f + \zeta. \quad (1)$$

На сегодняшний день доступными и наиболее точными для практического применения являются модель геоида национального агентства геопрограммных исследований Министерства обороны США (National Geospatial-Intelligence Agency – NGA) EGM2008 и модель Международного центра глобальных земных моделей (International Centre for Global Earth Models – ICGEM) EIGEN-6C4, имеющие полный набор гармонических коэффициентов геопотенциала до 2190-й степени [2].

Так как нормальные высоты отнесены к поверхности квазигеоида, а гравиметрические модели Земли несут информацию о геоиде, то перевод геодезических высот в нормальные высоты с использованием этих моделей будет содержать в себе ошибку, равную отклонению геоида от квазигеоида в данной точке. Строго говоря, с использованием моделей будут получены ортометрические высоты, а не нормальные. Однако практический интерес представляет возможность получения нормальных высот по данным ГНСС-измерений при помощи гравитационных моделей.

В рамках данной работы выполнен анализ возможности получения нормальных высот с использованием данных спутниковых измерений и моделей геоида EGM2008 и EIGEN-6C4. Исследование выполнялось по разностям аномалий высот, вычисленных для 10-ти геодезических пунктов учебно-научного полигона Полоцкого государственного университета.

Для получения аномалий высот на исследуемых пунктах нами были выполнены ГНСС-измерения двухчастотными спутниковыми приемниками Trimble R7 Zephyr Geodetic, а также результаты геометрического нивелирования III класса.

Аномалии высот в определяемых пунктах по гравитационным моделям Земли получены на основании данных Calculation Service сайта Международного центра глобальных земных моделей (International Centre for Global Earth Models – ICGEM) [2]. Значения аномалий высот, полученные по гравитационным моделям, представлены в таблице 1. Схема расположения геодезических пунктов на учебно-научном полигоне проиллюстрирована рисунком 1.

Таблица 1 – Значения аномалий высот, полученные по гравитационным моделям

Имя точки	EGM2008 2190	EIGEN-6C4 (2014) 2190
1001	20,525	20,565
1002	20,522	20,562
1004	20,520	20,560
1005	20,520	20,560
1005	20,521	20,561
1006	20,512	20,552
101	20,528	20,568
102	20,487	20,527
103	20,547	20,587
104	20,539	20,580
105	20,540	20,580

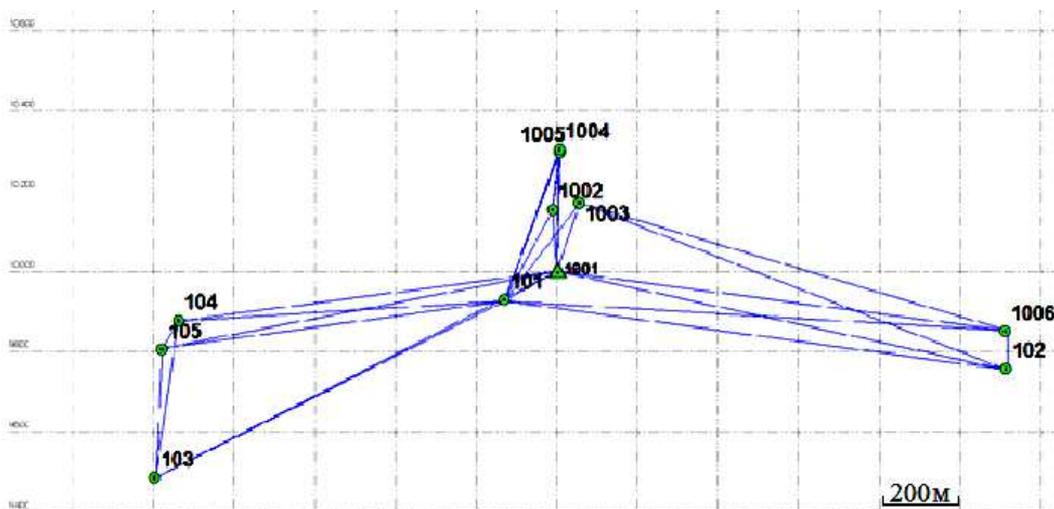


Рисунок 1. – Схематическое расположение геодезических пунктов на учебно-научном полигоне

Информация об аномалиях высот с использованием результатов ГНСС-измерений (2015 г.) была получена путем сравнения разностей геодезических высот между реперами профиля и репером № 1001, с превышениями между этими же реперами, найденными из геометрического нивелирования III класса, которые следует рассматривать как разности нормальных высот реперов. Таким образом, аномалия высоты определялась по формуле (2) [3]:

$$\zeta_i = (H_i^c - H_{\text{№1001}}^c) - \sum_{\text{№1001}}^i h, \quad (2)$$

где  $\zeta_i$  – аномалия высоты на текущем репере относительно репера № 1001;  $H_i^c$  и  $H_{\text{№1001}}^c$  – геодезические высоты соответственно текущего репера профиля и репера № 1001, полученные по спутниковым данным;  $\sum h$  – суммарное превышение между репером № 1001 до текущего репера, найденное из геометрического нивелирования.

Значения аномалий высоты относительно пункта № 1001, полученные по результатам ГНСС-измерений и геометрического нивелирования, а также по данным гравитационных моделей Земли, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения аномалий высот относительно пункта № 1001

Названия пунктов	1001	1002	1004	1005	1006	1006	101	102	103	104	105
EGM2008, м	0	-0,003	-0,005	-0,005	-0,004	-0,013	0,003	-0,038	0,022	0,014	0,015
EIGEN-6C4, м	0	-0,003	-0,005	-0,005	-0,004	-0,013	0,003	-0,038	0,022	0,015	0,015
GPS-нивелирование, м	0	-0,015	-0,009	-0,001	-0,011	-0,071	0,012	-0,036	0,019	0,051	0,021

Исходя из представленных значений аномалий высоты можно отметить, что модели геоида EGM2008 и EIGEN-6C4 имеют одинаковую форму поверхности на данном участке и систематическое смещение относительно друг друга.

Для данных геодезических пунктов проведена статистическая обработка разностей значений аномалий высоты, полученных из моделей EGM2008 и EIGEN-6C4, и аномалий высоты, полученных по данным инструментальных исследований. Результаты обработки представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Статистическая обработка разностей значений аномалий высот

Погрешности	Модель EGM2008 в сравнении с GPS измерениями и геометрическим нивелированием	Модель EIGEN-6C4 в сравнении с GPS измерениями и геометрическим нивелированием
$[\Delta]/n$ , м	0,0026	0,0027
+ $\Delta$ , max, м	0,058	0,058
- $\Delta$ , max, м	-0,037	-0,036
СКП, м	<b>0,0225</b>	<b>0,0223</b>

На основании данных статистического анализа можно сделать вывод, что закон распределения разностей аномалий высоты близок к нормальному. Средние квадратические ошибки (СКП) получения аномалий высот не превышают величин, указанных создателями моделей [2]. Следует отметить, что гравитационные модели имеют систематическое смещение друг относительно друга по значениям абсолютных аномалий высот ( $\sigma \approx 40$  мм), однако формы поверхности геоида на данном участке одинаковые. Наличие систематического смещения моделей друг относительно друга вызывает трудности в выборе модели геоида при необходимости получения абсолютных отметок точек в системе нормальных высот. Однако данная ошибка может быть полностью исключена при наличии хотя бы у одной точки отметки в системе нормальных высот, определенной при помощи геометрического нивелирования.

На рисунке 2 представлены изолинии отклонений модельных аномалий высоты геоида EIGEN-6C4 от результатов инструментальных данных (относительно геодезического пункта 1001).

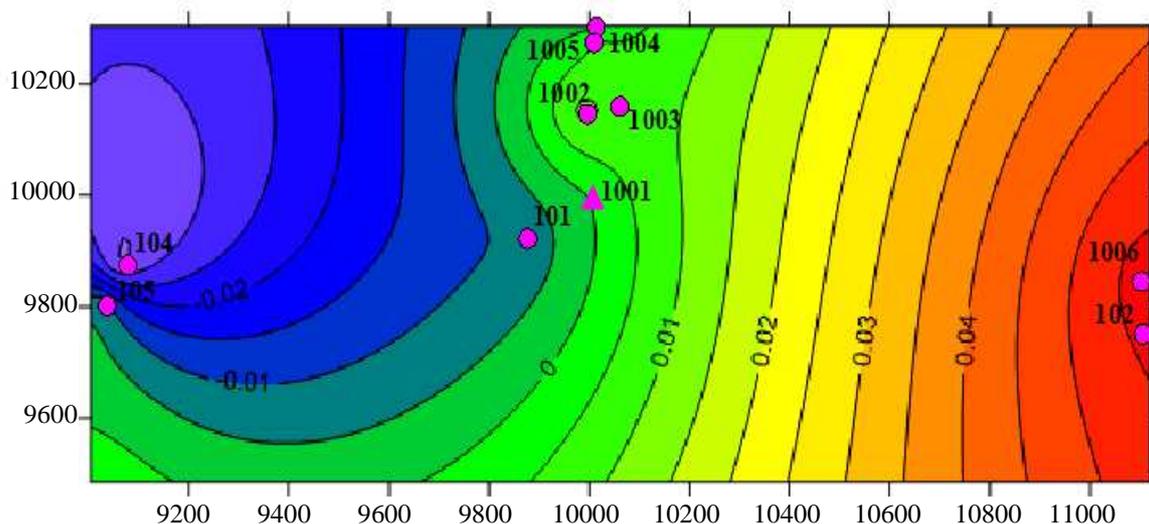


Рисунок 2. – Схема отклонений аномалий высоты геоида EIGEN-6C4 от аномалий, полученных по данным ГНСС-измерений и результатам геометрического нивелирования (сечение изолиний через 0,005 м)

На основании сравнения аномалий высот, полученных как с помощью гравитационных моделей, так и с помощью сочетания ГНСС-измерений и геометрического нивелирования, можно утверждать, что модельные данные имеют хорошую сходимость с результатами инструментальных данных, что подтверждается другими исследованиями [4–6]. Кроме того, на небольшой территории поверхности моделей геоидов EGM2008 и EIGEN-6C4 имеют одинаковую форму, что подтверждает одинаковые разности аномалий высот. Оценка точности получения нормальных высот с помощью моделей геоида EGM-2008, EIGEN-6C4 показала, что применение данных моделей высот геоида на данной территории для опреде-

ления нормальных высот возможно лишь при создании съемочного обоснования для выполнения съемок с высотой сечения рельефа не менее 1 м [7].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Закатов, П.С. Курс высшей геодезии / П.С. Закатов. – М. : Недра, 1976. – 510 с.
2. Global Gravity Field Models // International Centre for Global Earth Models (ICGEM) [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: [http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/International Centre for Global Earth Models \(ICGEM\)](http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/International%20Centre%20for%20Global%20Earth%20Models%20(ICGEM)). – Дата доступа. – 20.01.2016.
3. Диагностика современных движений земной коры Беларуси по результатам геодезических и геолого-геофизических исследований ГБ-4026 : отчет о НИР (ГПОФИ «Недра Беларуси 13» за 2006–2010 гг.) / Полоц. гос. ун-т ; рук. Г.А. Шароглазова ; исполн. В.Н. Коровкин, С.К. Товбас, Д.В. Усов, А.Н. Соловьев. – Новополоцк, 2010.
4. Маркович, К.И. Анализ новейшей глобальной гравитационной модели Земли EIGEN-6C4 по геодезическим и гравиметрическим данным применительно к Полоцкому геодинамическому профилю / К.И. Маркович // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Строительство. Прикладные науки. – 2015. – № 8. – С. 190–193.
5. Маркович, К.И. Оценка точности глобальной гравитационной модели EIGEN-6C2 в сравнении с моделью EGM2008 применительно к Полоцкому геодинамическому профилю / К.И. Маркович // Труды молодых специалистов Полоц. гос. ун-та. Вып. Строительство. – 2013. – № 67. – С. 168–171.
6. Пигин, А.П. Глобальная модель геоида EGM2008. Предварительный анализ / А.П. Пигин, С.В. Березина // Инженерные изыскания. – 2009. – № 2. – С. 44–47.
7. Инженерные изыскания для строительства : СНБ 1.02.01-96 / М-во архитектуры и стр-ва. – Введ. 1996.06.01. – Минск, 1996.

Поступила 01.02.2016

#### ANALYSIS OF OBTAINING NORMAL HEIGHTS POINTS OF THE EARTH'S SURFACE USING DATA FROM SATELLITE MEASUREMENTS AND MODELS OF THE GEOID

*K. MARKOVICH, M. MAKAROVA*

*The paper presents an analysis of opportunities for normal heights points of the earth's surface using satellite data and global models of the Earth's gravity. The estimation accuracy of the geoid models EGM2008, EIGEN-6C4 on differences height anomalies calculated for points geodetic network of educational and scientific polygon Polotsk State University on instrumental data and data models.*

**Keywords:** *satellite measurements, normal heights, point the earth's surface, models of geoid anomalies the difference in elevation.*