

УДК 528.21

АНАЛИЗ НОВЕЙШЕЙ ГЛОБАЛЬНОЙ ГРАВИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЗЕМЛИ EIGEN-6C4 ПО ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ И ГРАВИМЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПОЛОЦКОМУ ГЕОДИНАМИЧЕСКОМУ ПРОФИЛЮ

К.И. МАРКОВИЧ

(Полоцкий государственный университет)

Представлена оценка точности новейшей глобальной гравитационной модели Земли EIGEN-6C4 по разностям аномалий высот и приращениям ускорения силы тяжести, вычисленных для Полоцкого геодинимического профиля по инструментальным данным и данным модели. На основании полученных данных сделаны соответствующие выводы.

Модель гравитационного поля Земли EIGEN-6C4 является моделью Международного центра глобальных земных моделей (International Centre for Global Earth Models – ICGEM). На 2014 год EIGEN-6C4 – конечная итерация модельного подхода, результат разработки и анализа нескольких последовательно созданных гравитационных моделей EIGEN-6C2, EIGEN-6C3stat.

В результате вывода модели EIGEN-6C4 получен полный набор гармонических коэффициентов геопотенциала до 2190-й степени. Как следствие, точность модели зависит от погрешностей определения гармонических коэффициентов и от предельной степени учитываемых сферических гармоник. По набору гармонических коэффициентов геопотенциала модель гравитационного поля Земли EIGEN-6C4 превосходит такие модели, как EIGEN-6C3stat (1949), EIGEN-6C2 (1949), и сопоставима с моделью Национального агентства геопространственных исследований Министерства обороны США (National Geospatial-Intelligence Agency – NGA) EGM2008 (2190).

Модель EIGEN-6C4 включает в себя детальные гравитационные аномалии в разрешении 2×2 минуты и использует те же константы, связывающие референц-эллипсоид и нормальное гравитационное поле, что и модели EIGEN-6C2, EIGEN-6C3stat, EGM2008 [1]:

$$a = 6378137.00 \text{ м (большая полуось эллипсоида WGS 84);}$$

$$a = 1/298.257223563 \text{ (сжатие эллипсоида WGS 84);}$$

$$GM = 3.986004418 \cdot 10^{14} \text{ м}^3\text{с}^{-2} \text{ (геоцентрическая гравитационная постоянная);}$$

$$\omega = 72291115 \cdot 10^{-11} \text{ рад/с (угловая скорость вращения Земли).}$$

Из ранее выполненных исследований [2; 3] установлено, что модель Министерства обороны США EGM2008, а также модели EIGEN-6C2, EIGEN-6C3stat не уступают по точности друг другу.

В данном случае практический интерес представляет оценка точности новейшей глобальной гравитационной модели Земли EIGEN-6C4 с моделями EGM2008, EIGEN-6C2 и EIGEN-6C3stat.

Выполненный нами анализ состоит из следующих этапов:

1) оценка моделей EIGEN-6C4, EIGEN-6C2, EIGEN-6C3stat, EGM2008 по разностям аномалий высот, вычисленных для Полоцкого геодинимического профиля по результатам высокоточного геометрического и спутникового нивелирования и выбранных из моделей;

2) оценка моделей EIGEN-6C4, EIGEN-6C2, EIGEN-6C3stat, EGM2008 по приращениям ускорений силы тяжести для Полоцкого геодинимического профиля по результатам инструментальных гравиметрических измерений и данным моделей.

Для выполнения **первого этапа анализа** было отобрано 9 геодезических пунктов Полоцкого геодинимического профиля, геодезические координаты и эллипсоидальные высоты которых определены из спутниковых измерений. Ортометрические высоты этих пунктов известны из геометрического нивелирования I класса.

В результате выполнена оценка точности глобальной гравитационной модели EIGEN-6C4 в сравнении с моделями EIGEN-6C2, EIGEN-6C3stat, EGM2008 для Полоцкого профиля путем сравнения аномалий высот реперов, полученных с помощью гравитационных моделей, и аномалий высот, полученных как разность геодезических и ортометрических высот.

Аномалии высот в определяемых пунктах по всем моделям получены на основании данных Calculation Service сайта Международного центра глобальных земных моделей (International Centre for Global Earth Models – ICGEM) [1].

Значения аномалий высот, полученные по гравитационным моделям, представлены в таблице 1.

Значения аномалий высот, полученные по гравитационным моделям, а также по результатам GNSS-измерений и высокоточного геометрического нивелирования, выполненного в меридиональном направлении, относительно пункта № 59, принятого за стабильный, представлены в таблице 2 [4].

Таблица 1

Значения аномалий высот, полученные по гравитационным моделям

№ пункта	ζ EGM2008	ζ EIGEN 6C2	EIGEN-6C3stat	EIGEN-6C4
59	20.613	20.639	20.630	20.654
7130	20.586	20.612	20.602	20.627
8372	20.570	20.595	20.586	20.610
7701	20.532	20.556	20.498	20.523
7873	20.523	20.547	20.537	20.563
3895	20.522	20.546	20.537	20.562
6931	20.516	20.540	20.531	20.556
7100	20.483	20.507	20.498	20.523
3902	20.459	20.483	20.475	20.499
5960	20.432	20.456	20.448	20.471

Таблица 2

Значения аномалий высот относительно пункта № 59

Названия пунктов	59	7130	8372	7701	7873	3895	6931	7100	3902	5960
EGM2008, м	0	-0.027	-0.043	-0.081	-0.09	-0.091	-0.097	-0.13	-0.154	-0.181
EIGEN 6C2, м	0	-0.027	-0.044	-0.083	-0.092	-0.093	-0.099	-0.132	-0.156	-0.183
EIGEN-6C3stat, м	0	-0.028	-0.044	-0.084	-0.093	-0.093	-0.099	-0.132	-0.155	-0.182
EIGEN-6C4, м	0	-0.027	-0.044	-0.082	-0.091	-0.092	-0.098	-0.131	-0.155	-0.183
GPS-нивелирование, м	0	-0.032	-0.052	-0.085	-0.098	-0.104	-0.106	-0.134	-0.151	-0.197

Для данных пунктов проведена статистическая обработка разностей значений аномалий высот, полученных из моделей EIGEN-6C4, EIGEN-6C2, EIGEN-6C3stat, EGM2008, и разностей геодезических и ортометрических высот (геодезические высоты относительно эллипсоида WGS-84). 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-6C2 в сравнении с GPS-измерениями и геометрическим нивелированием	Модель EIGEN-6C3stat в сравнении с GPS-измерениями и геометрическим нивелированием	Модель EIGEN-6C4 в сравнении с GPS-измерениями и геометрическим нивелированием
$[\Delta]/n$, м	0.007	0.005	0.005	0.006
+ Δ , max, м	0.016	0.014	0.015	0.014
- Δ , max, м	-0.003	-0.005	-0.004	-0.004
СКП, м	0.009	0.008	0.008	0.008

По данным статистического анализа можно отметить, что закон распределения разностей аномалий высот близок к нормальному.

Систематическое смещение моделей относительно результатов GNSS-измерений и геометрического нивелирования составляет: 0,6 см для модели EIGEN-6C4; 0,5 см для модели EIGEN-6C2; 0,5 см для модели EIGEN-6C3stat; 0,7 см для модели EGM2008.

На рисунке графически отображены аномалии высот относительно пункта 59.

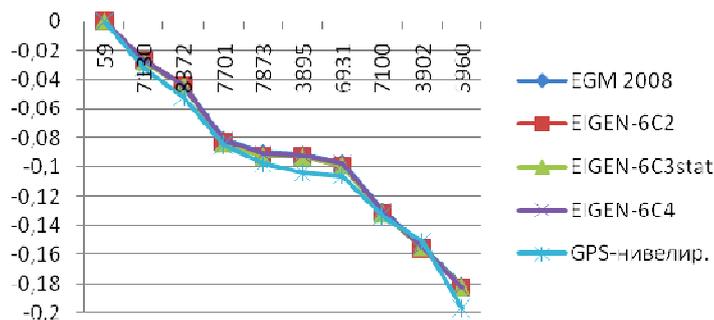


График аномалий высот относительно пункта 59

Второй этап анализа, представляющий сравнение приращений ускорения силы тяжести, полученных на основании данных гравитационных моделей и инструментальных гравиметрических данных, представлен ниже. Для определения приращений по гравитационным моделям использовались данные Calculation Service сайта Международного центра глобальных земных моделей (ICGEM). В таблице 4 приведены значения ускорения силы тяжести для пунктов профиля, полученные по моделям.

Таблица 4

Значения ускорения силы тяжести для пунктов профиля, полученные по моделям

№ пункта	EGM2008, мГл	EIGEN-6C2, мГл	EIGEN-6C3stat, мГл	EIGEN-6C4, мГл
59	981507.046	981507.461	981507.331	981508.007
7130	981507.009	981507.303	981507.180	981507.967
8372	981506.736	981506.970	981506.852	981507.693
7701	981503.709	981503.773	981503.665	981504.661
7873	981503.898	981503.969	981503.864	981504.848
3895	981504.467	981504.585	981504.482	981505.417
6931	981504.782	981504.911	981504.810	981505.732
7100	981506.596	981506.803	981506.713	981507.541
3902	981507.625	981508.080	981508.000	981508.568
5960	981508.037	981508.542	981508.471	981508.973

В качестве инструментальных гравиметрических данных были взяты гравиметрические измерения на Полоцком профиле, выполненные «Институтом геохимии и геофизики НАН Беларуси» (месяц/год: 8/2009) [данные Г.И. Каратаева, О.В. Мясникова (Институт геохимии и геофизики НАН Беларуси)]. Приращения ускорения силы тяжести между пунктами Полоцкого профиля, полученные по инструментальным гравиметрическим данным и данным глобальных гравитационных моделей Земли, представлены в таблице 5.

Таблица 5

Приращения ускорения силы тяжести между пунктами Полоцкого профиля

№ пункта	Инструментальные данные, мГл	EGM2008, мГл	EIGEN-6C2, мГл	EIGEN-6C3stat, мГл	EIGEN-6C4, мГл
59	0	0	0	0	0
7130	-2.685	-0.037	-0.158	-0.151	-0.040
8372	-0.389	-0.309	-0.491	-0.479	-0.314
7701	-1.828	-3.336	-3.688	-3.667	-3.346
7873	-0.966	-3.148	-3.492	-3.467	-3.158
3895	0.686	-2.579	-2.876	-2.849	-2.589
6931	0.673	-2.264	-2.550	-2.521	-2.275
7100	2,041	-0.450	-0.658	-0.618	-0.465
3902	0.472	0.580	0.619	0.669	0.561
5960	-3.873	0.991	1.081	1.139	0.966

Отклонения модельных приращений ускорения силы тяжести от приращений, полученных по инструментальным гравиметрическим данным, представлены в таблице 6.

Таблица 6

Отклонения модельных приращений ускорения силы тяжести от инструментальных

№ пункта	Инструментальные данные EGM-2008, мГл	Инструментальные данные EIGEN-6C2, мГл	Инструментальные данные EIGEN-6C3stat, мГл	Инструментальные данные EIGEN-6C4, мГл
59	0	0	0	0
7130	2.648	2.527	2.534	2.645
8372	0.08	-0.102	-0.09	0.075
7701	-1.508	-1.86	-1.839	-1.518
7873	-2.182	-2.526	-2.501	-2.192
3895	-3.265	-3.562	-3.535	-3.275
6931	-2.937	-3.223	-3.194	-2.948
7100	-2,491	-2.699	-2.659	-2.506
3902	0.108	0.147	0.197	0.089
5960	4.864	4.954	5.012	4.839

Для данных пунктов (см. табл. 6) проведена статистическая обработка разностей приращений ускорения силы тяжести, полученных из моделей EIGEN-6C4, EIGEN-6C2, EIGEN-6C3stat, EGM2008 и по инструментальным гравиметрическим данным. Результаты обработки представлены в таблице 7.

Таблица 7

Результаты статистической обработки разностей приращений ускорения силы тяжести

Погрешности	EGM2008	EIGEN-6C2	EIGEN-6C3stat	EIGEN-6C4
[Δ]/n, мГл	-0.243	-0.705	-0.675	-0.532
+Δ, max, мГл	4.864	4.954	5.012	4.839
-Δ, max, мГл	-3.265	-3.562	-3.535	-3.275
Число + разности	4	3	3	4
Число - разности	5	6	6	5
СКП, мГл	2.650	2.812	2.808	2.650

По данным статистического анализа можно отметить, что систематическое смещение моделей относительно результатов инструментальных гравиметрических измерений составляет: 0,532 мГл для модели EIGEN-6C4; 0,705 мГл для модели EIGEN-6C2; 0,675 мГл для модели EIGEN-6C3stat; 0,243 мГл для модели EGM2008.

На основании полученных данных можно сделать следующие **выводы**:

- согласно данным аномалий высот, полученным как с помощью гравитационных моделей, так и с помощью сочетания GNSS-измерений и геометрического нивелирования, можно утверждать, что корректное использование данных гравитационных моделей дает неплохие по точности результаты, которые могут быть использованы и без привлечения других данных. Кроме того, модели EGM2008, EIGEN-6C2, EIGEN-6C3stat не уступают по точности определения аномалий высоты новейшей гравитационной модели EIGEN-6C4. Модели дают практически одинаковые результаты и имеют хорошую сходимость с результатами, полученными на основе данных спутниковых измерений, и данных геометрического нивелирования;

- анализ разностей приращений ускорения силы тяжести на пунктах Полоцкого профиля показал сходимость по точности модели EIGEN-6C4 в сравнении с моделью EGM2008. Следует отметить, что все модели имеют плохую сходимость с инструментальными гравиметрическими данными (СКП 2.650-2.808 мГл), что накладывает значительные ограничения в использовании значений ускорения силы тяжести, полученных по данным моделям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Global Gravity Field Models // International Centre for Global Earth Models (ICGEM) [Электронный ресурс]. – 2015. – 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)).
2. Глобальная гравитационная модель EIGEN-6C2. Предварительный анализ // Труды молодых специалистов Полоц. гос. ун-та. – 2013. – Вып. 67. Строительство. – С. 172–176.
3. Оценка точности глобальной гравитационной модели EIGEN-6C2 в сравнении с моделью EGM2008 применительно к Полоцкому геодинамическому профилю // Труды молодых специалистов Полоц. гос. ун-та. – 2013. – Вып. 67. Строительство. – С. 168–171.
4. Недра Беларуси 13 за 2006–2010 гг. «Диагностика современных движений земной коры Беларуси по результатам геодезических и геолого-геофизических исследований»: отчет о НИР ГПОФИ / Полоц. гос. ун-т; науч. рук. Г.А. Шароглазова. – Новополоцк, 2010. – ГБ-4026.

Поступила 11.03.2015

ANALYSIS OF THE LATEST GLOBAL GRAVITY MODEL OF THE EARTH EIGEN-6C4 ON GEODETIC AND GRAVIMETRIC DATA IN RELATION TO POLOTSK GEODYNAMIC PROFILE

K. MARKOVICH

The paper presents an assessment of the accuracy of the latest global gravity model of Earth EIGEN-6C4 anomalies from the difference of heights and increments of the acceleration of gravity calculated for Polotsk geodynamic profile on instrumental data and model data.