

В. Ф. Канушин¹, Д. Н. Голдобин¹, Н. Н. Кобелева¹✉

Тестирование глобальных моделей аномалий силы тяжести по результатам наземных гравиметрических измерений

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

Аннотация. Современные глобальные модели аномалий силы тяжести играют ключевую роль в решении широкого круга геофизических и геодезических задач — от моделирования гравитационного поля Земли до определения геоцентрических координат и изучения динамики литосферы. Однако точность и надёжность этих моделей существенно варьируются в зависимости от региона, плотности наземных измерений, рельефа местности и особенностей геологического строения. В связи с этим актуальной задачей является независимая верификация и тестирование глобальных гравиметрических моделей на основе точных наземных наблюдений. В статье обсуждается альтернативная процедура проверки, основанная на сравнении глобальных моделей аномалий силы тяжести полученных по моделям геопотенциала (GGM), опубликованных за последние пять лет на сайте Международного центра глобальных моделей Земли (ICGEM, <http://icgem.gfz-potsdam.de>), с независимыми наземными данными, представленными набором из 231 значений аномалий силы тяжести в свободном воздухе, полученных из гравиметрических измерений на территории Дании.

Ключевые слова: глобальные модели геопотенциала, проверка точности, аномалии силы тяжести, гравиметрические измерения, сравнительный анализ

V. F. Kanushin¹, D. N. Goldobin¹, N. N. Kobeleva¹✉

Testing global gravity anomaly models using ground-based gravimetric measurements

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

Abstract. Modern global gravity anomaly models play a key role in solving a wide range of geophysical and geodetic problems - from modeling the Earth's gravitational field to determining geocentric coordinates and studying the dynamics of the lithosphere. However, the accuracy and reliability of these models vary significantly depending on the region, the density of ground measurements, the terrain, and the geological features. In this regard, independent verification and testing of global gravity models based on accurate ground observations is an urgent task. The paper discusses an alternative verification procedure based on a comparison of global geopotential models (GGMs) published over the last five years on the website of the International Centre for Global Earth Models (ICGEM, <http://icgem.gfz-potsdam.de>) with independent ground-truth data, represented by a set of 231 free-air gravity anomalies obtained from gravimetric measurements over Denmark.

Keywords: global geopotential models, accuracy testing, gravity anomalies, gravimetric measurements, comparative analysis

Введение

Глобальное картирование гравитационного поля Земли (ГПЗ) на основе данных спутниковых миссий относится к важным задачам современной геодезии.

Путем инверсии спутниковых данных можно оценить параметры, описывающие внешнее гравитационное поле. Сферические гармонические коэффициенты по-прежнему в настоящее время широко используются для глобальной параметризации геопотенциала в скалярном описании гравитационного поля Земли. Инверсия спутниковых данных является сложным численным процессом, который включает в себя большое количество как наблюдаемых, так и неизвестных параметров. В статье приведены результаты тестирования пяти опубликованных за последние годы на сайте Международного центра глобальных моделей геопотенциала Земли (ICGEM) [1], путем сравнения аномалии силы тяжести, вычисленных в результате гармонического синтеза по модели геопотенциала, с аномалиями силы тяжести, полученными из гравиметрических измерений в 231 пунктах на территории Дании.

Методы и материалы

В таблице 1 приведены основные характеристики тестируемых моделей геопотенциала.

Таблица 1

Глобальные модели геопотенциала

Номер по ICGEM	Модель	Год публикации	Максимальная степень разложения	Исходные данные	Ссылка
176	XGM2019	2019	2190	A, G, S(GOCO06s), T	Zingerle, P. et al, 2019
178	Tongji GMMG20215	2022	300	S(GOCE), S(Grace)	Chen, J. et al, 2022
179	GOSG02S	2023	300	S (Goce)	Xu, Xinyu et al 2023
177	SGG-UGM-2	2020	2190	A, EGM2008, S(Goce), S(Grace)	Liang, W. et al, 2020
180	WHU-SWPU-GOGR2022S	2023	300	S(Goce), S(Grace)	Zhao, Yongqi et al 2023
148	EIGEN-6C4	2014	2190	A, G, S(Goce), S(Grace), S(Lageos)	Förste, Christoph et al, 2014

Примечание: данные таблицы 1 составлены по материалам ICGEM.

Здесь: S – данные спутниковых гравиметрических миссий; G – данные наземных гравиметрических измерений; A – данные альтиметрических измерений, T – топография.

Для оценки точности тестируемых моделей геопотенциала был выбран участок, расположенный в северной части Дании и обозначенный на рисунке 1 красным прямоугольником. В пределах данной территории на суше распределены значениями аномалий силы тяжести g , полученные по результатам измерений на

231 гравиметрическом пункте. Гравиметрические пункты расположены на высотах в интервале от 0,9 до 70 метров.

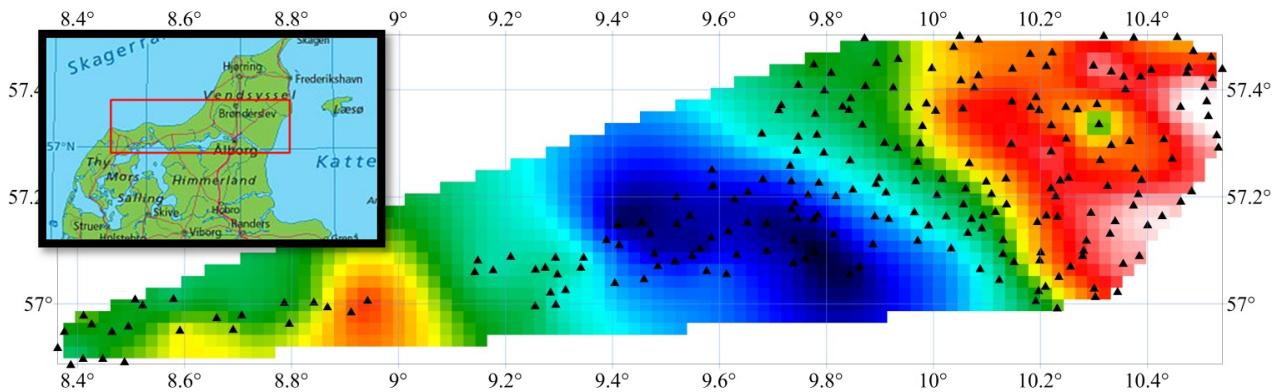


Рис. 1. Расположение гравиметрических пунктов на территории Дании и картосхема исходных аномалий силы тяжести $\Delta g_{исх.}$.

На каждом гравиметрическом пункте вычислены значения аномалий силы тяжести Δg_s по нормированным гармоническим коэффициентам геопотенциала $\bar{C}_{nm}$ и $\bar{S}_{nm}$ и тестируемых глобальных моделей XGM2019, Tongji GMMG20215, GOSG02S, SGG-UGM-2, WHU-SWPU-GOGR2022S по формуле [2]

$$\Delta g_s = \frac{fM}{r^2} \sum_{n=2}^{N_0} (n-1) \frac{a_e^n}{r^n} \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \cdot \bar{P}_{nm}(\sin \varphi), \quad (1)$$

$$\Delta \bar{C}_{nm} = \bar{C}_{nm} - \bar{C}_{nm}^0$$

где φ , λ , r – геоцентрические широта, долгота и радиус вектор гравиметрического пункта; $\bar{P}_{nm}(\sin \varphi)$ – нормированная присоединенная функция Лежандра степени n и порядка m ; $\bar{C}_{nm}$ и $\bar{S}_{nm}$ – нормированные безразмерные гармонические коэффициенты геопотенциала; $\bar{C}_{nm}^0$ – нормированные безразмерные гармонические коэффициенты нормального геопотенциала; ω – угловая скорость вращения Земли; a_e – большая полуось эллипсоида.

На рисунке 2 показаны картосхемы моделей аномалий силы тяжести, Δg_s найденных по формуле (1). Вычисления выполнялись с помощью программы SINTEGRAV разработанной на кафедре КиФГ, СГУГиТ [3].

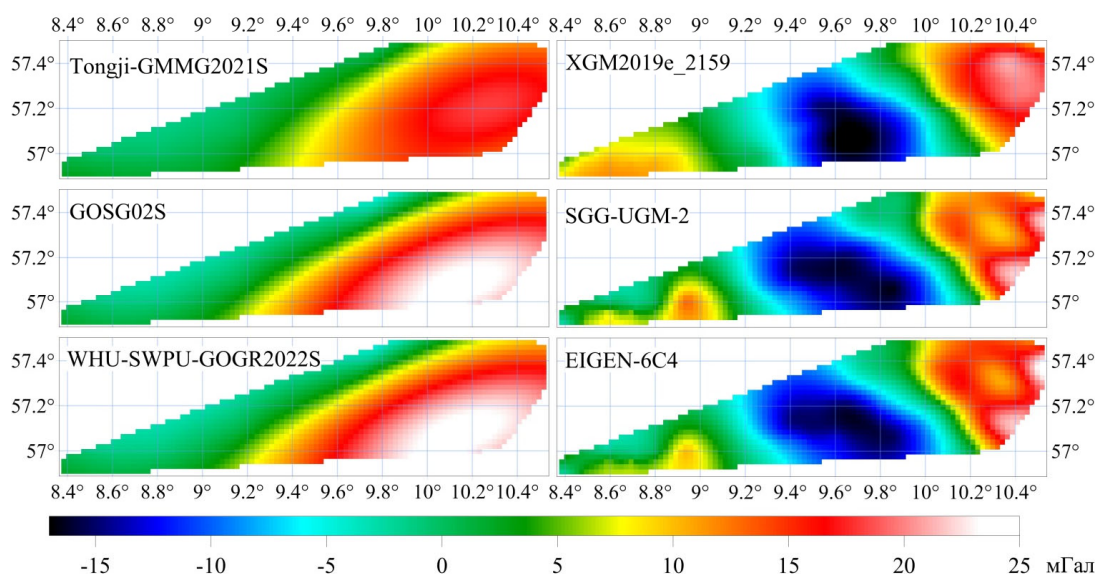


Рис.2. Картошхемы моделей аномалий силы тяжести, вычисленных по формуле (1)

На рисунке 3 приведены картошхемы разностей

$$\delta g = \Delta g_s - \Delta g_{ucx}. \quad (2)$$

между модельными аномалиями силы тяжести Δg_s вычисленными по формуле (1) и исходными аномалиями силы тяжести, расположенными на выбранной территории Дании в 231 гравиметрических пунктах.

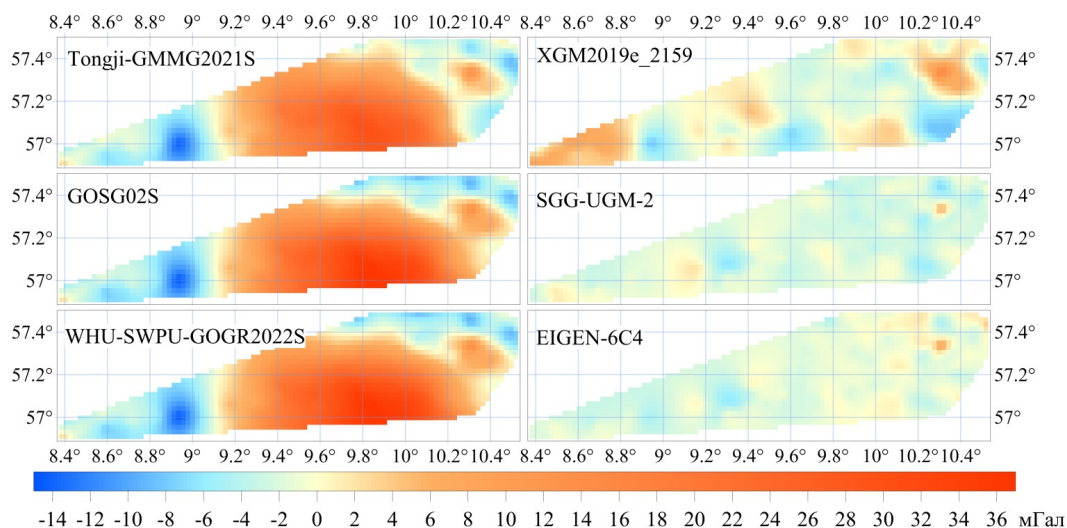


Рис.3. Картошхемы разностей δg

Из приведенных на рисунках 2 и 3 картошхем моделей аномалий и разностей δg видно, что модели аномалий силы тяжести, полученные с помощью формулы

(1), ограниченные степенью $N=300$, значительно отличаются от исходного поля аномалий силы тяжести, а модели аномалий силы тяжести, ограниченные степенью $N=2190$, практически совпадают с исходными.

На рисунке 4 показаны гистограммы распределения разностей δg .

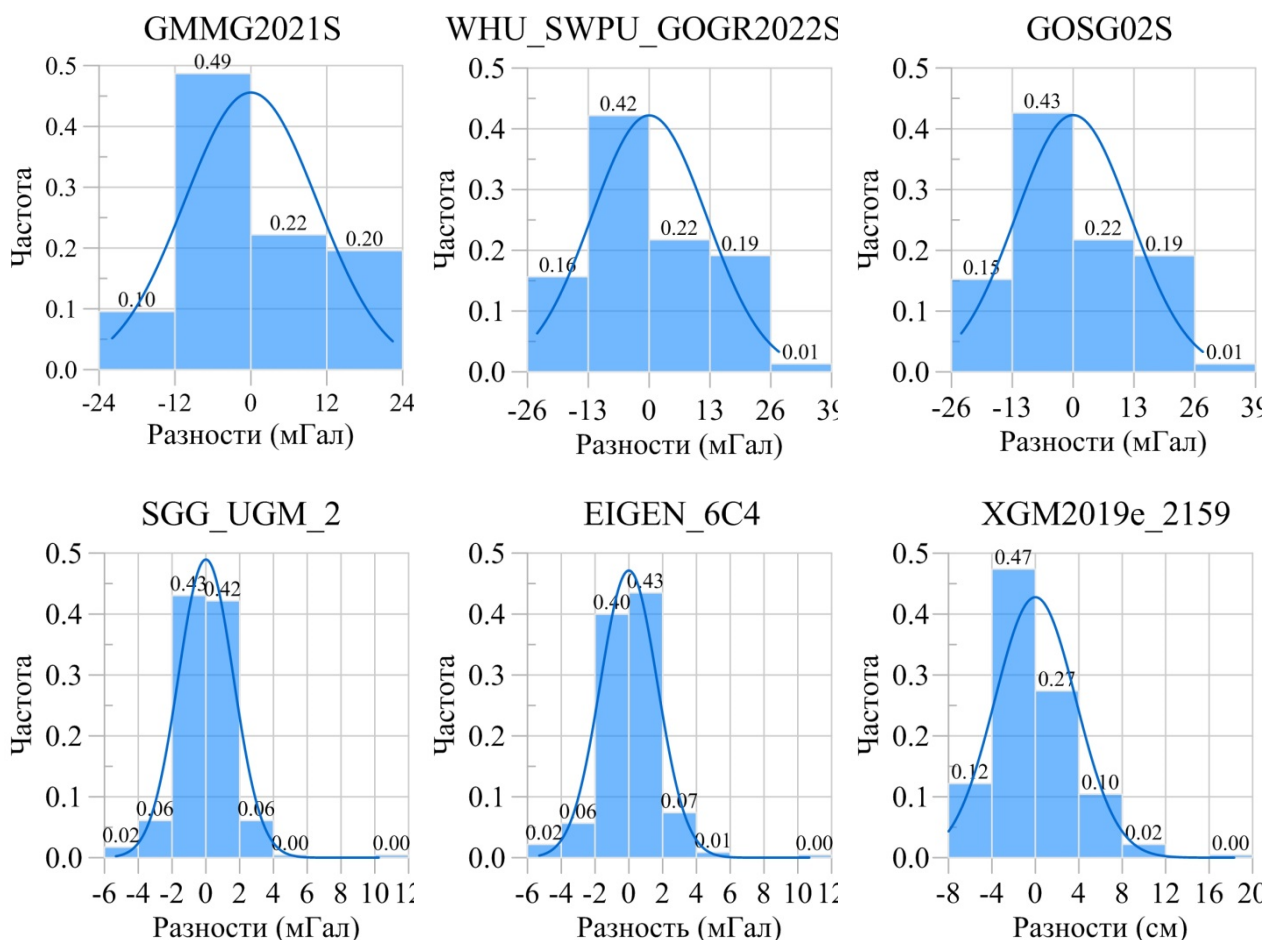


Рис. 4 Гистограммы распределения разностей δg

Как видно из гистограмм распределения δg , почти 70% разностей аномалий силы тяжести, полученных с помощью формулы (1), по моделям ГПЗ ограниченных степенью $N = 300$, не выходит за пределы ± 12 мГал, а для моделей ГПЗ ограниченные степенью $N = 2190$, находятся в пределах ± 2 мГал. Гистограммы, приведенные на рисунке 4, показывают в целом близкое к нормальному распределению по всем исследуемым моделям.

Сравнительный анализ современных моделей геопотенциала

По разностям δg , найденным по формуле (2), между значениями аномалий силы тяжести Δg_s , вычисленными по моделям XGM2019, Tongji GMMG20215, GOSG02S, SGG-UGM-2, WHU-SWPU-GOGR2022S, и значениями аномалии

силы тяжести Δg_{ucx} , полученным, из измерений на гравиметрических пунктах, вычислены средние разности E и их стандартные отклонения σ .

$$E = E|(\Delta g_s - \Delta g_{ucx})| \quad (3)$$

$$\sigma = \sigma|(\Delta g_s - \Delta g_{ucx})| \quad (4)$$

Статистические параметры распределения разностей δg между вычисленными по моделям XGM2019, Tongji GMMG2021S, GOSG02S, SGG-UGM-2, WHU-SWPU-GOGR2022S и полученными из наземных измерений значениями аномалий силы тяжести на территории Дании приведены в табл. 2.

Таблица 2

Статистические параметры распределения разностей δg между вычисленными с помощью формулы (2) по тестируемым моделям и определенным из наземных измерений значениями аномалий силы тяжести

Параметры	EIGEN-6C4	GOSG2S	Tongji - GMMG2021S	WHU-SW-GOGR2022	SGG-UGM-2	XGM2019
Год публикации	2014	2023	2022	2023	2020	2019
Максимальная степень разложения	2190	300	300	300	2190	2190
Количество точек	230	230	230	230	230	230
Минимум	-6,54	-14,56	-14,83	-14,84	-7,57	-8,61
Максимум	9,47	29,82	36,88	36,82	8,03	17,68
Диапазон	16,01	44,38	51,71	51,66	15,60	26,29
Среднее	-1,21	7,37	9,11	9,07	-2,20	-0,63
Стандартное отклонение	1,69	10,51	12,29	12,28	1,63	3,73
Асимметрия	0,833	0,399	0,345	0,346	0,698	0,773
Экссесс	7,442	-1,012	-1,014	-1,014	6,824	2,226

Анализ результатов проведенного исследования позволяет сделать следующие выводы:

– диапазоны распределения разностей δg составляют от 44,38 до 51,70 мГал для аномалий силы тяжести, полученных с помощью формулы (1), по моделям ГПЗ ограниченных степенью $N = 300$. Для аномалий силы тяжести, полученных с помощью формулы (1), по моделям ГПЗ ограниченных степенью $N=2190$, диапазоны распределения разностей составляют от 15,56 до 26,29 мГал.

– по совокупности значений статистических характеристик, наилучшей моделью для территории Дании в целом является модель SGG_UGM-2 со стандартным отклонением $\sigma = 1,63$ мГал. Модели Tongji GMMG20215, GOSG02S и WHU-SWPU-GOGR2022S показали наибольшее стандартное отклонение, σ равны 10,51, 12,28 и 12,29 мГал соответственно.

Заключение

По результатам сравнительного анализа статистических характеристик моделей геопотенциала XGM2019, Tongji GMMG20215, GOSG02S, SGG-UGM-2, WHU-SWPU-GOGR2022S с независимыми значениями силы тяжести, полученными в результате измерений силы тяжести на 231 гравиметрическом пунктах, расположенных на территории Дании, можно сделать вывод, что для определения характеристик гравитационного поля в прибрежных районах Дании, необходимых для навигации и наведения по гравитационному полю Земли, наилучшей является высокостепенная модель геопотенциала SGG_UGM-2, ограниченная степенью 2190.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках СЧ НИР «ГЕОТЕХ-КВАНТ - 3» с целью создания высокоточных моделей геопотенциального поля Земли и его характеристик

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Barthelmes, F.; Köhler (2006): ICGEM - The International Centre for Global Earth Models, General Assembly European Geosciences Union (EGU) (Vienna, Austria 2006)
2. Карпик А. П., Канушин В. Ф., Ганагина И. Г. и др. Исследование спектральных характеристик глобальных моделей гравитационного поля Земли, полученных по космическим миссиям CHAMP, GRACE и GOCE // Гироскопия и навигация. – 2014. – № 4 (87). – С. 34–44.
3. Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ 2015661196 Российская Федерация. Геоаном ver 1.0 / Д.Н. Голдобин, В.Ф. Канушин, И.Г. Ганагина; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий». — № 2015617768; заявл. 28.08.2015; опубл. 20.11.2015. — 1 с.

© В. Ф. Канушин, Д. Н. Голдобин, Н. Н. Кобелева, 2025