

УДК 004.942 (470+571)  
DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-3-16-22

## Исследование точности глобальных моделей геопотенциала EGM2008, EIGEN-6C4, GECO, SGG-UGM-1, SGG-UGM-2, XGM2019 на территории Российской Федерации

В. Ф. Канушин<sup>1</sup>, Д. Н. Голдобин<sup>1</sup>, Н. Н. Кобелева<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

\* e-mail: n.n.kobeleva@mail.ru

**Аннотация.** Улучшение гравиметрической изученности Российской Федерации и создание новых моделей гравитационного поля Земли (ГПЗ) в виде сферических гармоник геопотенциала поставило задачу о выборе наиболее пригодной модели, исходя из особенностей гравитационного поля на территории России. Спутниковые гравиметрические миссии CHAMP, GRACE и GOCE обеспечивают однородный и почти полный глобальный охват информации о ГПЗ. В работе представлены результаты исследования точности современных высокостепенных глобальных моделей геопотенциала для определения различных характеристик гравитационного поля Земли на территории Российской Федерации. В качестве тестируемых моделей геопотенциала использованы модели EGM2008, EIGEN-6C4, GECO, SGG-UGM-1, SGG-UGM-2, XGM2019. Результаты исследования представлены в виде статистических параметров и гистограмм распределения разностей  $\delta g$  между значениями силы тяжести, полученными по наземным гравиметрическим измерениям, и вычисленными по модельным данным. У высокостепенной модели EIGEN-6C4 стандартное отклонение ( $\sigma = 5,24$  мГал) меньше по сравнению с другими моделями геопотенциала. По распределению разностей можно сделать вывод, что модель EIGEN 6C4 наиболее пригодна для территории Российской Федерации.

**Ключевые слова:** модели гравитационного поля Земли, наземные гравиметрические измерения, сравнительный анализ, EGM2008, EIGEN-6C4, GECO, SGG-UGM-1, SGG-UGM-2, XGM2019

### Введение

По результатам космических гравиметрических миссий CHAMP [1], GRACE [2], и GOCE [3, 4] зарубежные специалисты создали ряд моделей гравитационного поля Земли с высокой пространственной разрешающей способностью (~10 км) и улучшенными точностными характеристиками гармонических коэффициентов геопотенциала. Основным достижением этих проектов являются подробнейшие карты аномалий ГПЗ, превосходящие по точности предыдущие карты примерно в 1 000 раз.

Появление множества высокостепенных моделей ГПЗ, основанных на наземных, спутниковых и альтиметрических данных [5–16], ставит задачу исследования их точности на территории Российской Федерации.

В данной работе выполнено исследование точностных характеристик различных параметров ГПЗ на территории Российской Феде-

рации, определенных по глобальным моделям геопотенциала.

Для решения поставленной задачи необходимо вычислить значения силы тяжести по глобальным моделям ГПЗ, представленным на сайте Немецкого научно-исследовательского центра наук о Земле (ICGEM, <http://icgem.gfz-potsdam.de>) в виде гармонических коэффициентов геопотенциала, сравнить с результатами наземных гравиметрических измерений силы тяжести на пунктах, расположенных в разных регионах территории России.

В качестве тестируемых моделей были выбраны глобальные модели геопотенциала EGM2008, EIGEN-6C4, GECO, SGG-UGM-1, SGG-UGM-2, XGM2019, опубликованные на настоящий момент. Список исследуемых моделей геопотенциала представлен в табл. 1. Все рассматриваемые модели имеют максимальную степень разложения до 2190-й степени (SGG-UGM-1 – 2159) с пространственным разрешением около 10 км.

Глобальные модели геопотенциала

Модель	Исходные данные	Ссылка
XGM2019	A, G, S(GOCO06s)T	Zingerle, P. et al, 2019
SGG-UGM-1	EGM2008, S(GOCE)	Liang, W. et al., 2018; Xu, X. et al., 2017
SGG-UGM-2	A, EGM2008, S(Goce), S(Grace)	Liang, W. et al, 2020; Liang W., Li J., Xu, X., Zhang, S., Zhao, Y. 2020
GECO	EGM2008, S(Goce)	Gilardoni, M. et al, 2016
EIGEN-6C4	A, G, S(Goce), S(Grace), S(Lageos)	Förste, Christoph et al, 2014
EGM2008	A, G, S(Grace)	Pavlis, N.K. et al, 2008

*Примечание.* Данные табл. 1 составлены по материалам ICGEM. Здесь S – данные спутниковых гравиметрических миссии; G – данные наземных гравиметрических измерений; A – данные альтиметрических измерений.

**Материалы и методы исследования**

Для оценки точности исследуемых современных глобальных моделей геопотенциала (см. табл. 1) выполнено сравнение значений силы тяжести, вычисленных по гармоническим коэффициентам геопотенциала, с независимыми точечными значени-

ями силы тяжести  $g$ , полученными из измерений на 48 гравиметрических пунктах, расположенных на территории Российской Федерации.

Схема расположения гравиметрических пунктов на исследуемой территории приведена на рис. 1 в цилиндрической проекции Меркатора.

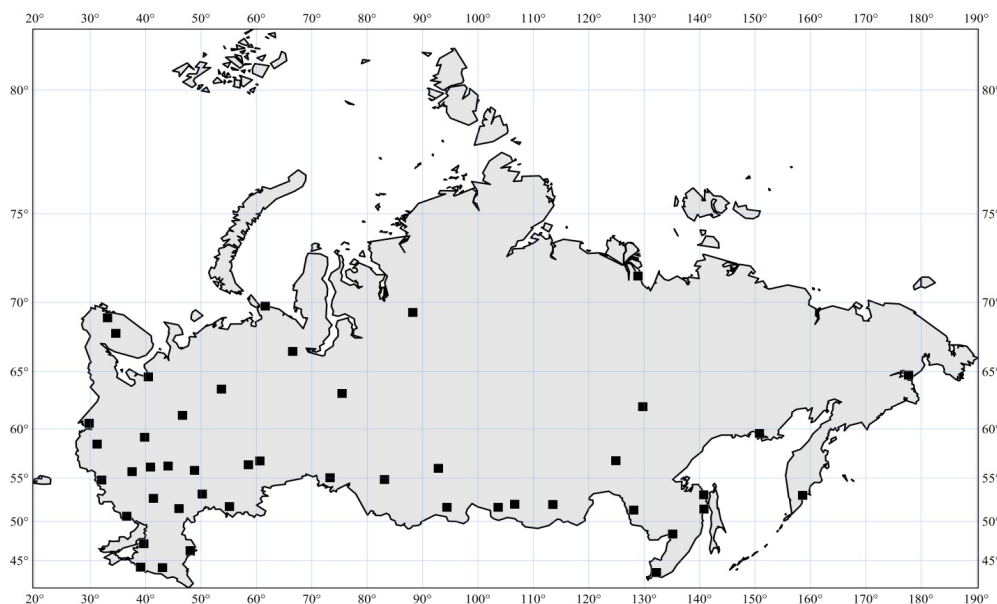


Рис. 1. Схема расположения гравиметрических пунктов на территории Российской Федерации

Во всех гравиметрических пунктах вычислены значения силы тяжести  $g_c$  по нормированным гармоническим коэффициентам геопотенциала  $\bar{C}_{nm}$  и  $\bar{S}_{nm}$  моделей EGM2008, EIGEN-6C4, GECO, SGG-UGM-1, SGG-UGM-2, XGM2019 по формуле

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

где  $\varphi, \lambda, r$  – сферические координаты (широта и долгота) и радиус-вектор пункта  $P$ ;  $\bar{P}_{nm}(\sin \varphi)$  – нормированная присоединенная функция Лежандра;  $\bar{C}_{nm}$  и  $\bar{S}_{nm}$  – безразмерные нормированные гармонические коэффициенты геопотенциала;  $\omega$  – угловая скорость вращения Земли;  $a_e$  – большая полуось эллипсоида;  $n$  и  $m$  – номер степени и порядка разложения соответственно.

Вычисления по формуле (1) выполнялись с помощью программы Geo\_ABSGRAV [17].

Между измеренными на гравиметрических пунктах значениями силы тяжести  $g$  и вычисленными в этих же пунктах по моделям  $g_c$  найдены разности  $\delta g$ . По разностям  $\delta g$  определены статистические параметры точностных характеристик исследуемых моделей на территории РФ

$$\delta g = g - g_c, \quad (2)$$

где  $g$  – измеренные значения силы тяжести;  $g_c$  – вычисленные по формуле (1) значения силы тяжести.

### Сравнительный анализ результатов

Исследование точности моделей геопотенциала EGM2008, EIGEN-6C4, GECO, SGG-UGM-1, SGG-UGM-2, XGM2019 выполнялось путем нахождения статистических параметров распределения разностей между вычисленными по исследуемым моделям и полученными из наземных измерений значениями силы тяжести на территории Российской Федерации (см. рис. 1), приведенных в табл. 2.

Таблица 2

Статистические параметры распределения разностей  $\delta g$

Параметры	EGM2008	EIGEN-6C4	GECO	SGG-UGM-1	SGG-UGM-2	XGM2019
Количество точек	48	48	48	48	48	48
Минимум	-9,49	-10,07	-9,15	-15,59	-10,58	-31,69
Максимум	14,08	13,89	14,16	18,86	13,43	15,40
Диапазон	23,57	23,96	23,31	34,45	24,01	47,09
Среднее	1,78	1,83	2,29	2,16	1,689	2,20
Стандартное отклонение	5,31	5,24	5,37	7,94	5,62	7,77
Асимметрия	0,124	0,064	0,105	0,022	-0,012	-1,756
Эксцесс	-0,002	0,061	-0,103	-0,896	-0,343	5,626

На рис. 2 приведены гистограммы распределения разностей  $\delta g$ .

Анализ результатов проведенного исследования позволяет сделать следующие выводы:

– гистограммы, приведенные на рис. 2, показывают в целом нормальное распределение разностей по всем исследуемым моделям;

– диапазоны распределения разностей  $\delta g$  (1) составляют от 23 до 24 мГал. Исключение имеют модели SGG-UGM-1 и XGM2019, у которых диапазоны распределения разностей – 34 и 47 мГал соответственно;

– по совокупности значений статистических характеристик, наилучшей моделью для территории РФ в целом является модель EIGEN-6C4 со стандартным отклонением  $\sigma = 5,24$  мГал. Близкие к ней по точности являются модели EGM2008, GECO, SGG-UGM-2 со стандартным отклонением  $\sigma = 5,31; 5,37; 5,62$  мГал соответственно.

Модели SGG-UGM-1 и XGM2019 показали наихудшее стандартное отклонение  $\sigma = 7,94$  и  $\sigma = 7,77$  мГал.

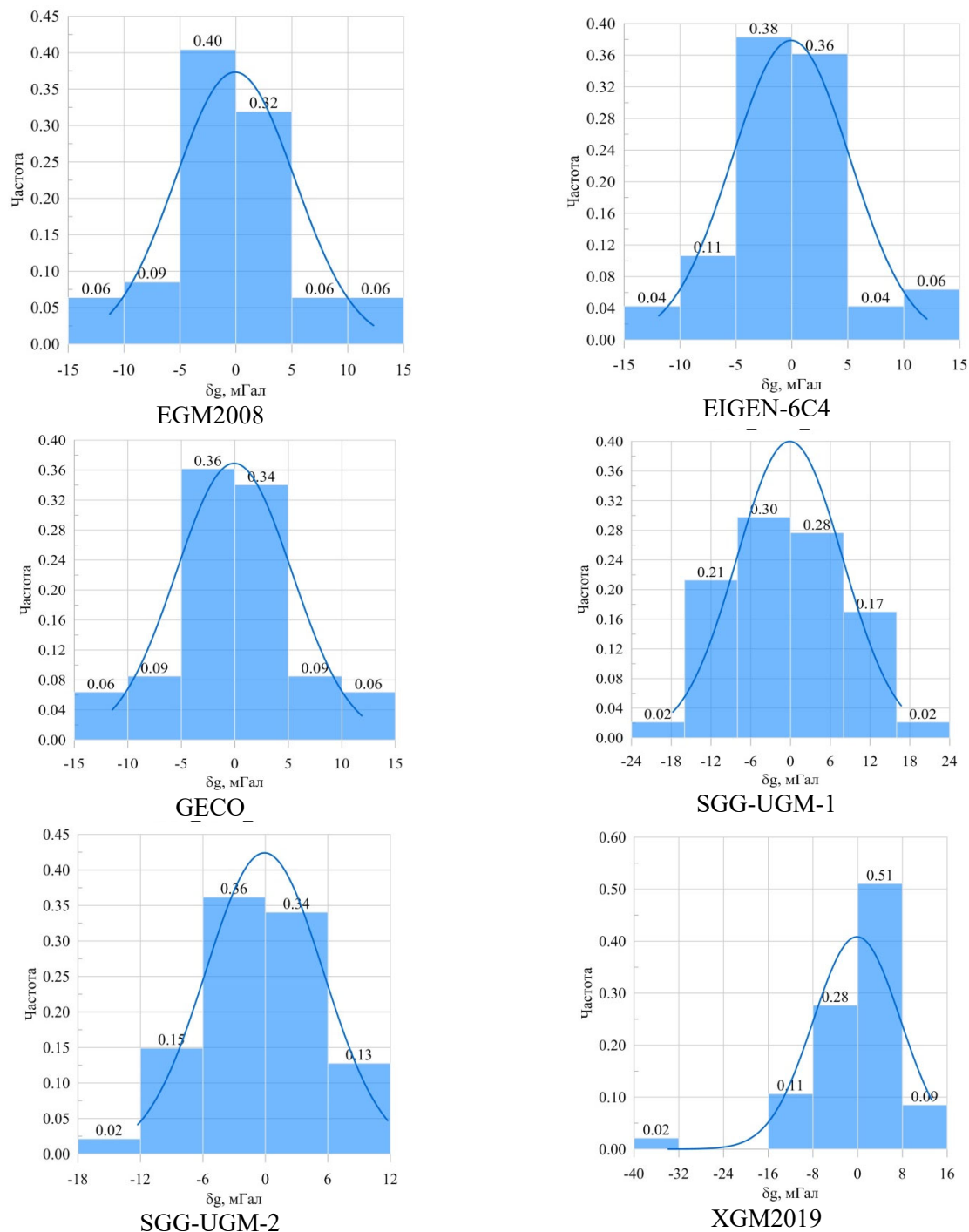


Рис. 2. Гистограммы распределения разностей  $\delta g$  на территории РФ

### Заключение

Используя гармонические коэффициенты геопотенциала современных глобальных моделей геопотенциала EGM2008, EIGEN-6C4, GECO, SGG-UGM-1, SGG-UGM-2, XGM2019, в работе выполнено тестирование данных моделей путем сравнения модельных данных с независимыми наземными измерениями на территории Российской Федерации.

Из результатов сравнительного анализа статистических характеристик моделей геопотен-

циала EGM2008, EIGEN-6C4, GECO, SGG-UGM-1, SGG-UGM-2, XGM2019 с независимыми значениями силы тяжести, полученными в результате измерений на 48 гравиметрических пунктах, расположенных на территории Российской Федерации, можно сделать вывод, что для определения различных характеристик гравитационного поля на территории Российской Федерации следует использовать модель геопотенциала EIGEN 6C4, ограниченную степенью 2190.

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

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Reigber C., Balmino G., Schwintzer P., Biancale R., Bode A., Lemoine J. M., König R., Loyer S., Neumayer H., Marty J. C., Barthelmes F. A high-quality global gravity field model from CHAMP GPS tracking data and accelerometry (EIGEN- 1S) // *Geophysical Research Letters*. – 2002. – No. 14 (29). – P. 31–37.
2. Tapley B. D., Bettadpur S., Ries J. C., Thompson P. F., Watkins M. M. GRACE measurements of mass variability in the Earth system // *Science*. – 2004. – No. 5683 (305). – P. 503–505.
3. Drinkwater M.R., Floberghagen R., Haagmans R., Muzi D., Popescu A. VII: Closing session: GOCE: ESA's first earth explorer core mission // *Space science reviews*. – 2003. – No. 1 (108). – P. 419–432.
4. Rummel R., Gruber T., Yi W., Albertella, A. GOCE: its principles and science // *In Proceedings of the Journées*. – 2011.
5. 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.
6. Конешов В. Н., Непоклонов В. Б., Спиридонова Е. С., Максимова М. В. Особенности сравнительной оценки глобальных моделей гравитационного поля земли // *Физика Земли*. – 2020. – № 2. – С. 115–126.
7. 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.
8. Канушин В. Ф., Ганагина И. Г., Голдобин Д. Н. и др. Сравнение спутниковых моделей проекта GOCE с различными наборами независимых наземных гравиметрических данных // *Вестник СГГА* – 2014. – Вып. 3 (27). – С. 21–35.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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](http://www.massentransporte.de/fileadmin/20071015-17-Potsdam/mo_1050_06_mayer.pdf).
13. 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](http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/TU_Graz/Einrichtungen/Institute/Homepages/i5210/research/ITSG-Grace2014).
14. 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](ftp://ftp.csr.utexas.edu/pub/grace/Proceedings/Presentations_GSTM2008.pdf).
15. Голдобин Д. Н. Определение геометрической структуры гравитационного поля на территории Западной Сибири по данным современных глобальных моделей геопотенциала // *Вестник СГУГиТ*. – 2019. – Т. 24 (2). – С. 19–34.

16. 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.

17. 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.

### Об авторах

*Вадим Федорович Канушин* – кандидат технических наук, доцент кафедры космической и физической геодезии.

*Денис Николаевич Голдобин* – кандидат технических наук, доцент кафедры космической и физической геодезии.

*Наталья Николаевна Кобелева* – кандидат технических наук, доцент кафедры космической и физической геодезии.

Получено 02.04.2023

© В. Ф. Канушин, Д. Н. Голдобин, Н. Н. Кобелева, 2023

## Study of the accuracy of global geopotential models EGM2008, EIGEN-6C4, GECO, SGG-UGM-1, SGG-UGM-2, XGM2019 on the territory of the Russian Federation

*V. F. Kanushin<sup>1</sup>, D. N. Goldobin<sup>1</sup>, N. N. Kobeleva<sup>1\*</sup>*

<sup>1</sup> Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

\* e-mail: n.n.kobeleva@mail.ru

**Abstract.** The improvement of the gravimetric knowledge of the Russian Federation and the creation of new models of the Earth's gravitational field (EGF) in the form of spherical harmonics of the geopotential set the task of choosing the most suitable model based on the characteristics of the gravitational field on the territory of Russia. The satellite gravity missions CHAMP, GRACE and GOCE provide a homogeneous and almost complete global coverage of information about the Earth's gravitational field. The paper presents the results of a study of the accuracy of modern high-degree global geopotential models for determining various characteristics of the Earth's gravitational field on the territory of the Russian Federation. The models EGM2008, EIGEN-6C4, GECO, SGG-UGM-1, SGG-UGM-2 and XGM2019 were used as the tested geopotential models. The results of the study are presented in the form of statistical parameters and histograms of the distribution of differences  $\delta g$  between the gravity values obtained from ground-based gravimetric measurements and calculated from model data. The high-degree model EIGEN-6C4 has a smaller standard deviation ( $\sigma = 5,24$  mGal) compared to other geopotential models. Based on the distribution of differences, we can conclude that the EIGEN 6C4 model is the most suitable for the territory of the Russian Federation.

**Keywords:** Earth's gravity field models, ground gravity measurements, comparative analysis, EGM2008, EIGEN-6C4, GECO, SGG-UGM-1, SGG-UGM-2, XGM2019

### REFERENCES

1. Reigber, C., Balmino, G., Schwintzer, P., Biancale, R., Bode, A., Lemoine, J. M., König, R., Loyer, S., Neumayer, H., Marty, J. C., & Barthelmes, F. A. (2002). High-quality global gravity field model from CHAMP GPS tracking data and accelerometry (EIGEN-1S). *Geophysical Research Letters*, 14(29), 31–37.
2. Tapley, B. D., Bettadpur, S., Ries, J. C., Thompson, P. F., & Watkins, M. M. (2004). GRACE measurements of mass variability in the Earth system. *Science*, 5683(305), 503–505.
3. Drinkwater, M. R., Floberghagen, R., Haagmans, R., Muzi, D., & Popescu, A. (2003). VII: Closing session: GOCE: ESA's first earth explorer core mission. *Space science reviews*, 1 (108), 419–432.
4. Rummel, R., Gruber, T., Yi, W., & Albertella, A. (2011). GOCE: its principles and science. *Proceedings of the Journées*.

5. Koneshov, V. N., Nepoklonov, V. B., Sermyagin, R. A., & Lidovskaya, E. A. (2013). Modern global Earth's gravity field models and their errors. *Gyroscopy and Navigation*, 4(3), 147–155.
6. Koneshov, V. N., Nepoklonov, V. B., Spiridonova, E. S., & Maksimova, M. V. (2020). Peculiarities of Comparative Evaluation of Global Models of the Earth's Gravitational Field. *Fizika Zemli [Physics of the Earth]*, 2, 115–126 [in Russian].
7. Koneshov, V. N., Nepoklonov, V. B., Solovyov, V. N., & Zheleznyak, L. K. (2019). Comparison of modern global ultra-high-degree models of the earth's gravitational field. *Geofizicheskie issledovaniya [Geophysical Research]*, 1(20), 13–26 [in Russian].
8. Kanushin, V. F., Ganagina, I. G., Goldobin, D. N., Mazurova, E. M., Kosareva, A. M., & Kosarev, N. S. (2014). Comparison of the GOCE project satellite models with different sets of independent terrestrial gravimetry data. *Vestnik SSGA [Vestnik SSGA]*, 3(27), 21–35 [in Russian].
9. Karpik, A. P., Kanushin, V. F., Ganagina, I. G., & et al. (2016). Evaluation of recent Earth's global gravity field models with terrestrial gravity data. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 46(1), 1–11.
10. Kanushin, V. F., Karpik, A. P., Ganagina, I. G., Goldobin, D. N., Kosarev, N. S., & Kosareva, A. M. (2015). *Issledovanie sovremennykh global'nykh modeley gravitatsionnogo polya Zemli [Study of the current global model of the gravitational field of the Earth]*. Novosibirsk: SSUGT Publ., 270 p. [in Russian].
11. Karpik, A. P., Kanushin, V. F., Ganagina, I. G., Goldobin, D. N., & Mazurova, E. M. (2014). Analyzing spectral characteristics of the global earth gravity field models obtained from the CHAMP, GRACE and GOCE space missions. *Giroskopiya i navigatsiya [Gyroscopy and Navigation]*, 4(87), 34–44 [in Russian].
12. Mayer-Guerr, T. (n. d.). ITG-Grace03s: the latest GRACE gravity field solution. Retrieved from [http://www.massentransporte.de/fileadmin/20071015-17-Potsdam/mo\\_1050\\_06\\_mayer.pdf](http://www.massentransporte.de/fileadmin/20071015-17-Potsdam/mo_1050_06_mayer.pdf).
13. Kvas, A. (n. d.). ITSG-Grace 2014. Retrieved from [http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/TU\\_Graz/Einrichtungen/Institute/Homepages/i5210/research/ITSG-Grace2014](http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/TU_Graz/Einrichtungen/Institute/Homepages/i5210/research/ITSG-Grace2014).
14. Biancale, R. (n. d.). An improved 10-day time series of the geoid from GRACE and LAGEOS data. Retrieved from [ftp://ftp.csr.utexas.edu/pub/grace/Proceedings/Presentations\\_GSTM2008.pdf](ftp://ftp.csr.utexas.edu/pub/grace/Proceedings/Presentations_GSTM2008.pdf).
15. Goldobin, D. N. (2019) Determination of the Geometric Structure of the Gravitational Field on the Territory of Western Siberia Based on the Data of Modern Global Geopotential Models. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(2), 19–34 [in Russian].
16. 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]*, 22(1), 30–49 [in Russian].
17. Goldobin, D. N. (2018). Certificate of state registration of the computer program No. 2018666260 Geo\_ABSGRAV in the register of computer programs [in Russian].

#### Author details

Vadim F. Kanushin – Ph. D., Associate Professor, Department of Space and Physical Geodesy.

Denis N. Goldobin – Ph. D., Associate Professor, Department of Space and Physical Geodesy.

Natalya N. Kobeleva – Ph. D., Associate Professor, Department of Space and Physical Geodesy.

Received 02.04.2023

© V. F. Kanushin, D. N. Goldobin, N. N. Kobeleva, 2023