

## **Анализ данных чистых и смешанных аномалий силы тяжести, полученных по результатам работы космических гравиметрических миссий GRACE, GOCE**

*И. Г. Ганагина<sup>1\*</sup>, В. Ф. Канушин<sup>1</sup>, Д.Н. Голдобин<sup>1</sup>, И.В. Зверев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет геосистем и технологии, г. Новосибирск,  
Российская Федерация  
\*e-mail: gam0209@yandex.ru

**Аннотация.** В статье анализируются данные чистых и смешанных аномалий силы тяжести на территории Новосибирской области, полученных по результатам работы космических гравиметрических миссий GRACE, GOCE. Гравиметрические и геодезические измерения, выполненные на исследуемой территории, позволили получить смешанные и смоделировать чистые аномалии силы тяжести. Полученная информация являлась исходной для анализа аномалий силы тяжести, вычисленных по коэффициентам глобальных моделей геопотенциала XGM2019e\_2159, GOCO01S. Результаты исследования позволили сделать вывод, что при вычислениях смешанных аномалий силы тяжести по данным комбинированной модели геопотенциала XGM2019e\_2159 и чистых аномалий силы тяжести по данным спутниковой модели GOCO01S получаются равные среднеквадратические погрешности (для смешанных аномалий – 3,45 мГал, для чистых – 3,44 мГал). Следовательно, современные комбинированные глобальные модели гравитационного поля можно использовать для получения чистых аномалий на земной поверхности.

**Ключевые слова:** космические гравиметрические миссии, чистые и смешанные аномалии силы тяжести

## **Analysis of data on pure and mixed gravity anomalies obtained from the results of the space gravity missions GRACE, GOCE**

*I. G. Ganagina<sup>1\*</sup>, V. F. Kanushin<sup>1</sup>, D.N. Goldobin<sup>1</sup>, I.V. Zverev<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Siberian State University of Geosystems and Technology, Novosibirsk, the Russian Federation  
\*e-mail: gam0209@yandex.ru

**Abstract.** The article analyzes the data of pure and mixed gravity anomalies on the territory of the Novosibirsk region, obtained from the results of the space gravimetric missions GRACE, GOCE. Gravimetric and geodetic measurements carried out in the study area made it possible to obtain mixed and simulate pure gravity anomalies. The information obtained was the starting point for the analysis of gravity anomalies calculated from the coefficients of the global geopotential models XGM2019e\_2159, GOCO01S. The results of the study led to the conclusion that when calculating mixed gravity anomalies according to the combined geopotential model XGM2019e\_2159 and pure gravity anomalies according to the GOCO01S satellite model data, equal root-mean-square errors were obtained (for mixed anomalies - 3.45 mGal, for pure - 3.44 mGal). Therefore, modern combined global gravity field models can be used to obtain pure anomalies on the earth's surface.

**Keywords:** space gravimetric missions, pure and mixed gravity anomalies

## *Введение*

Измеряемыми величинами, характеризующими гравитационное поле Земли, являются ускорения силы тяжести. Разность между измеренным (действительным) и нормальным (вычисленным, теоретическим) значением силы тяжести называется аномалией силы тяжести. Смешанные аномалии силы тяжести получают при использовании в вычислениях значений нормальных высот пунктов, при использовании геодезических высот – получают чистые аномалии силы тяжести. Использование данных измерений силы тяжести является актуальным при решении научных и практических задач геодезии. В зависимости от того, какие ставятся задачи, возникает необходимость введения различных поправок (редукций) и приходится иметь дело с различными видами аномалий, использовать различные алгоритмы вычислений и переходов [1–2].

В связи с появлением возможности использования современных спутниковых технологий для получения геодезических высот точек на земной поверхности и создания глобальных моделей характеристик гравитационного поля Земли актуальным является вопрос анализа получения чистых и смешанных аномалий силы тяжести [3–5].

Целью данного исследования является анализ данных чистых и смешанных аномалий силы тяжести, которые получены по результатам работы космических гравиметрических миссий GRACE, GOCE.

В настоящее время модели глобального гравитационного поля, полученные на основе спутниковых измерений гравиметрических миссий GRACE, GOCE, становятся все более детальными и точными с высоким разрешением как для статических, так и для временных характеристик гравитационного поля Земли [6–14].

На сайте Немецкого научно-исследовательского центра наук о Земле (ICGEM) насчитывается 177 моделей, которые доступны в виде коэффициентов сферических гармоник геопотенциала [14].

Для вычисления смешанных и чистых аномалий силы тяжести на исследуемую территорию были использованы данные двух современных моделей гравитационного поля Земли XGM2019e\_2159 и GOCO01S [15].

Ультравысокостепенная модель геопотенциала XGM2019e содержит сферические гармоники включительно до степени 2190, что соответствует пространственному разрешению 2' (~4 км). В этой модели длинноволновая часть до степени  $N = 300$  представлена набором гармонических коэффициентов геопотенциала спутниковой модели GOCO01S [13–14]. Для определения коротких волн применяется гравиметрическая и альтиметрическая информация, а также топографические данные.

Спутниковая модель гравитационного поля GOCO01S основана на градиентометрических данных спутника GOCE и измерениях проекта GRACE. Модель проверена на основе гравитационных моделей и региональных ГНСС-наблюдений [14–16].

## Методы и материалы

Анализ получения чистых и смешанных аномалий силы тяжести представлен для участка Новосибирской области, на котором в 27 пунктах гравиметрической сети II класса выполнены определения силы тяжести учреждениями, специализируемыми в области геофизики, с точностью измерения  $\pm 0,05$  мГал. По результатам измерений получены смешанные аномалии силы тяжести.

Для получения чистых аномалий силы тяжести авторами выполнено моделирование геодезических высот для исходных пунктов сети по формуле (1)

$$H_{\Gamma} = H + \zeta, \quad (1)$$

где  $H_{\Gamma}$  – геодезическая высота;  $H$  – нормальная высота;  $\zeta$  – высота квазигеоида.

По исходным моделям геопотенциала XGM2019e\_2159, GOCO01S получены высоты квазигеоида для 27 пунктов по формуле (2)

$$\zeta = R_M \sum_{n=2}^N \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \varphi). \quad (2)$$

Определение чистых и смешанных аномалий силы тяжести по данным глобальных моделей геопотенциала выполнено с использованием программы SINTEGRAV v1.1. В программе осуществлены алгоритмы вычисления высоты квазигеоида (2) и аномалий силы тяжести (3) по гармоническим коэффициентам геопотенциала

$$\Delta g = \gamma \sum_{n=2}^N (n-1) \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \varphi), \quad (3)$$

где  $\varphi, \lambda$  – сферические координаты пункта;

$\bar{P}_{nm}(\sin \varphi)$  – полностью нормированные присоединенные функции Лежандра;

$\Delta \bar{C}_{nm}, \Delta \bar{S}_{nm}$  –разности коэффициентов нормированных сферических функций реального и нормального полей, вычисляются по формулам

$$\Delta \bar{C}_{nm} = \bar{C}_{nm} - \bar{C}_{nm}^0, \Delta \bar{S}_{nm} = \bar{S}_{nm} - \bar{S}_{nm}^0, \quad (4)$$

где  $\bar{C}_{nm}^0, \bar{S}_{nm}^0$  – гармонические коэффициенты нормированных сферических функций нормального поля [17–18].

## Результаты

Результаты определения чистых и смешанных аномалий силы тяжести были визуализированы в виде картосхем, представленных на рисунках 1 и 2 для территории Новосибирской области.

В таблице 1 представлены разности значений смешанных аномалий силы тяжести, вычисленных по данным исследуемых моделей, с наземными измере-

ниями. В таблице даны максимальные различия  $X_{max}$ , минимальные различия  $X_{min}$ , диапазон различий R, среднее значение различия  $\mu$ , среднеквадратические погрешности (СКП $\sigma$ ).

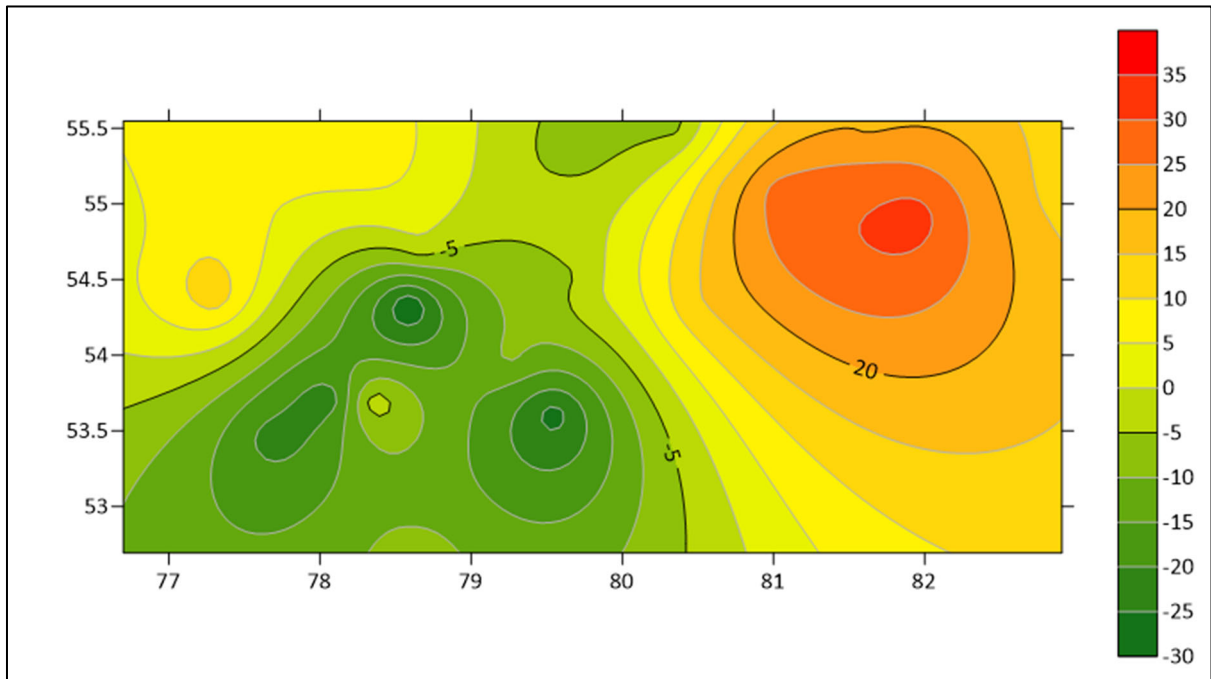


Рис. 1. Картограмма результатов определения чистых аномалий силы тяжести (наземные измерения на территории Новосибирской области)

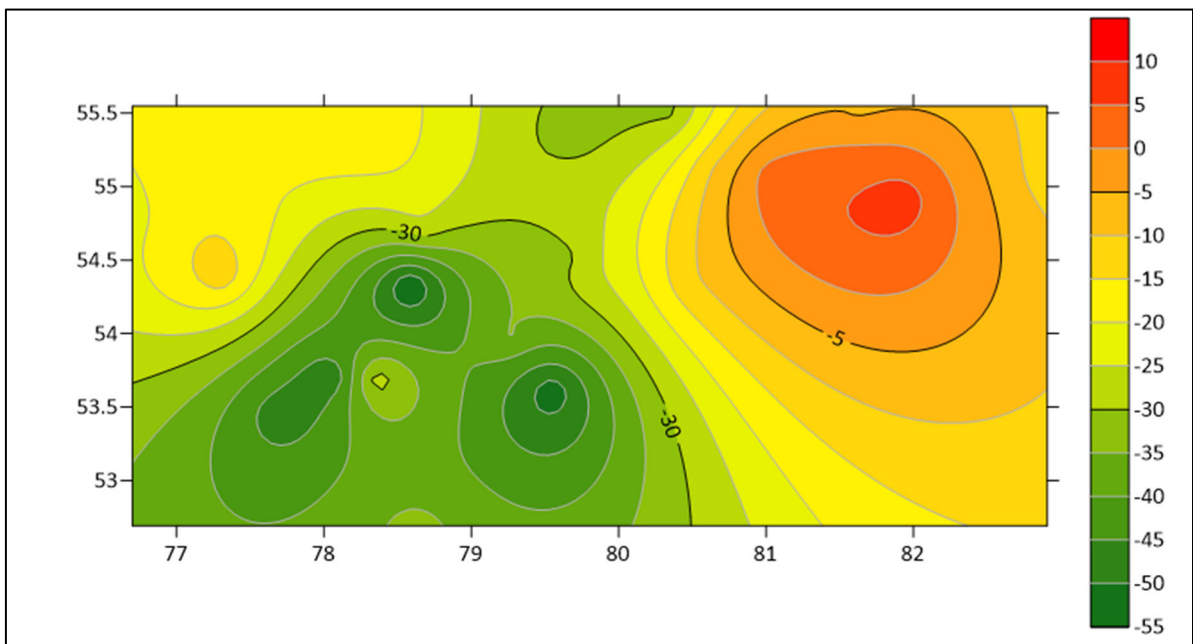


Рис. 2. Картограмма результатов определения смешанных аномалий силы тяжести (наземные измерения на территории Новосибирской области)

Таблица 1

Разности значений смешанных аномалий силы тяжести, рассчитанных по данным исследуемых моделей, с наземными измерениями

Модели геопотенциала	$X_{max}$ (мГал)	$X_{min}$ (мГал)	R (мГал)	$\mu$ (мГал)	СКП $\sigma$ (мГал)
XGM2019e_2159	4,236	-9,364	13,599	-2,785	3,450
GOCO01S	7,178	-8,661	15,840	-2,220	4,062

Результаты, представленные в табл. 1, позволяют сделать вывод, что ультравысокостепенная модель XGM2019e\_2159 является более точной моделью, демонстрируя СКП, равную 3,450 мГал. Спутниковая модель GOCO01S показала наилучшую минимальную разность -8,661 мГал и позволяет получить СКП, равную 4,062 мГал.

В таблице 2 представлены разности значений чистых аномалий силы тяжести, которые вычислены по данным исследуемых моделей с наземными измерениями.

Таблица 2

Разности значений чистых аномалий силы тяжести, рассчитанных по данным исследуемых моделей, с наземными измерениями

Модели геопотенциала	$X_{max}$ (мГал)	$X_{min}$ (мГал)	R (мГал)	$\mu$ (мГал)	СКП $\sigma$ (мГал)
XGM2019e_2159	4,282	-9,353	13,636	-2,795	3,441
GOCO01S	7,321	-9,067	16,389	-2,240	4,147

Результаты, представленные в табл. 2, позволяют сделать вывод, что СКП вычисления чистых аномалий силы тяжести по данным ультравысокостепенной модели XGM2019e\_2159 составляет 3,441 мГал, что на 20 % лучше результатов, полученных по данным спутниковой модели GOCO01S. Спутниковая модель GOCO01S показала наилучшую минимальную разницу -9,067 мГал и СКП, равную 4,147 мГал.

Диаграммы разностей значений аномалий силы тяжести, вычисленных по данным гравиметрических моделей, с результатами наземных измерений представлены на рисунках 3, 4.

Точность восстановления значений смешанных и чистых аномалий силы тяжести по данным глобальной ультравысокостепенной модели XGM2019e\_2159 составляет 0,009 мГал и находится в пределах точности гравиметрических измерений.

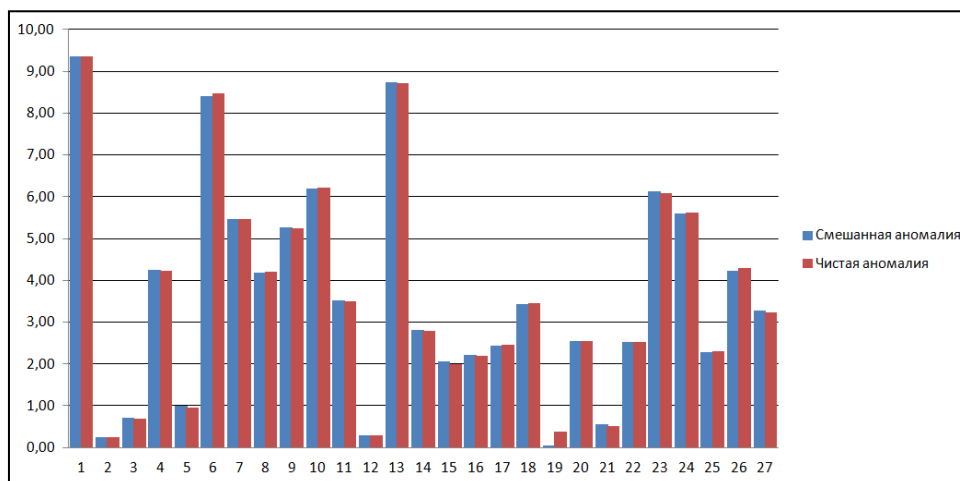


Рис. 3. Разность измеренных и вычисленных значений аномалий силы тяжести (XGM2019e\_2159)

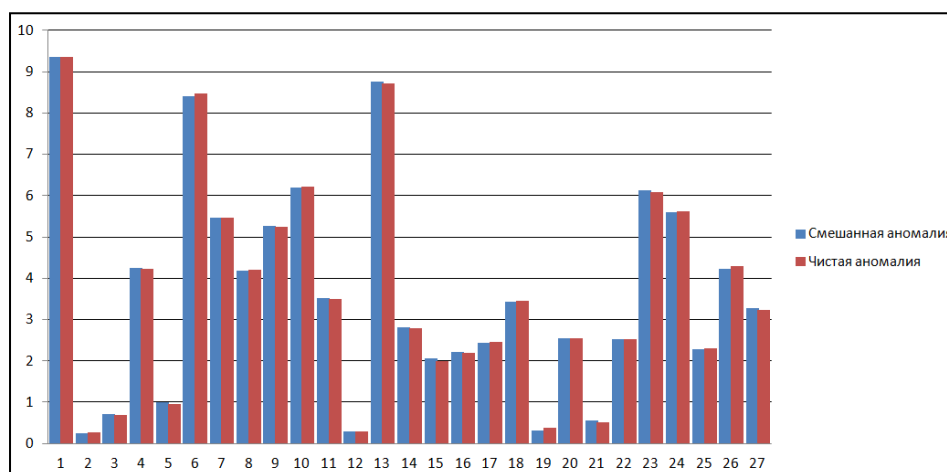


Рис. 4 – Разность измеренных и вычисленных значений аномалий силы тяжести (GOCO01S)

### Обсуждение

Современные глобальные модели геопотенциала создают новые возможности получения чистых и смешанных аномалий силы тяжести на исследуемую территорию.

Средние квадратические погрешности восстановления смешанных и чистых аномалий силы тяжести по глобальной комбинированной модели гравитационного поля XGM2019e\_2159 практически не отличаются. При создании комбинированных моделей привлекается информация о наземном гравитационном поле. Это позволяет получить величину СКП значений аномалий силы тяжести меньше, чем для чисто спутниковых моделей геопотенциала. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что современные комбинированные глобальные модели гравитационного поля можно использовать для получения чистых аномалий силы тяжести на пунктах земной поверхности в пределах точности моделирования.

## Заключение

В работе выполнен анализ чистых и смешанных аномалий силы тяжести, рассчитанных по коэффициентам глобальных моделей геопотенциала, полученных по результатам работы космических гравиметрических миссий GRACE, GOCE.

Выполнено сравнение глобальных моделей гравитационного потенциала Земли XGM2019e\_2159 и GOCO01S с независимыми наземными гравиметрическими данными, что позволило оценить точность моделирования чистых и смешанных аномалий силы тяжести.

Результаты исследования показали возможность использования данных современной глобальной ультравысококачественной модели XGM2019e\_2159 для получения чистых аномалий на пунктах земной поверхности в пределах точности моделирования.

Результаты исследования позволят оптимизировать деятельность по получению и использованию достоверной и качественной информации о характеристиках гравитационного поля Земли, которая является важной составляющей функционирования экономики и обороноспособности государства.

Исследование выполнено в рамках СЧ НИР «ГЕОТЕХ-Квант».

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Канушин, В. Ф. Сравнение и анализ аномалий силы тяжести, полученных по данным глобальной модели EGM2008 и гравиметрических измерений на локальных участках земной поверхности / В. Ф. Канушин, И. Г. Ганагина, Д. Н. Голдобин [и др.]. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. X Междунар. науч. конгр. Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов в 2 т. Т. 1, Новосибирск, 8 – 18 апреля 2014 г. – 2014. – С. 197-203.
2. Statistical and harmonic analysis of gravity / W. M. Kaula // Journal of Geophysical Research (1896-1977). – 1959. – Т. 64. – № 12. – С. 2401-2421. – DOI: 10.1029/JZ064i012p02401.
3. Современные глобальные модели квазигеоида: точностные характеристики и разрешающая способность данных / В. Ф. Канушин, И. Г. Ганагина, Д. Н. Голдобин [и др.]. – 2017. – Т. 22. – №1. – С. 30-49.
4. Канушин В. Ф. Исследование современных глобальных моделей гравитационного поля Земли: монография / В. Ф. Канушин, А. П. Карпик, И. Г. Ганагина, [и др.]. – 2015. – 270 с.
5. Современные глобальные модели гравитационного поля Земли и их погрешности // В. Н. Конешов, В. Б. Непоклонов, Р. А. Сермягин [и др.]. // Гироскопия и навигация. – 2013. – № 1 (80). – С. 107-118
6. CHAMP, GRACE, GOCE – Satellite Projects / R. Pail // Encyclopedia of Geodesy. Springer, Cham. – 2014. – PP. 10-21.
7. Исследование спектральных характеристик глобальных моделей гравитационного поля Земли, полученных по космическим миссиям CHAMP, GRACE и GOCE / А. П. Карпик // Гироскопия и навигация. – 2014. – № 4 (87). – С. 34–44.
8. CHAMP миссия [Электронный ресурс]. URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/CHAMP\\_\(satellite\)](http://en.wikipedia.org/wiki/CHAMP_(satellite)) (дата обращения: 29.03.2022).
9. GRACE – Gravity Recovery and Climate Experiment [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.csr.utexas.edu/grace/>. (дата обращения: 20.04.2022).

10. An Assessment of the GOCE High-Level Processing Facility (HPF) Released Global Geopotential Models with Regional Test Results in Turkey // Remote Sensing in Geology. [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.3390/rs12030586> (дата обращения: 15.04.2022).
11. Сравнение спутниковых моделей проекта GOCE с различными наборами независимых наземных гравиметрических данных / В. Ф. Канушин, И. Г. Ганагина, Д. Н. Голдобин [и др.]. // Вестник СГГА. – 2014. – №3 (27). – С. 21-35.
12. GOCE gravitational gradiometry / R. Rummel, W. Yi, C. Stummer // Journal of Geodesy. – 2011. – PP. 94-103.
13. Studying the Evolution of Resolution Capabilities and Approximation Accuracy of Global Models by Spectral Characteristics / I. G Ganagina, A. P. Karpik, V. F. Kanushin // International Association of Geodesy Symposia. Springer. [https://doi.org/10.1007/1345\\_2021\\_137](https://doi.org/10.1007/1345_2021_137)– 2022. – С. 1-8.
14. International Centre for Global Earth Models (ICGEM) – [Электронный ресурс]. URL: <http://icgem.gfz-potsdam.de/home> (дата обращения: 18.04.2022).
15. Сравнение и анализ аномалий силы тяжести, полученных по данным глобальной модели EGM2008 и гравиметрических измерений на локальных участках земной поверхности / В. Ф. Канушин, И. Г. Ганагина, Д. Н. Голдобин [и др.]. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. X Международ. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов в 2 т. Т. 1. 8 – 18 апреля 2014 г., Новосибирск –2014. – С. 197-203.
16. Сравнение современных моделей глобального гравитационного поля Земли / Л. С. Сугайпова // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2011. – № 6. – С. 14–20.
17. Еремеев, В. Ф. Теория высот в гравитационном поле Земли / В. Ф. Еремеев, М. И. Юркина. – М.: Недра, 1971. – 144 с
18. Исследование взаимосвязи смешанных и чистых аномалий силы тяжести / А. В. Елагин, И. Е. Дорогова, А. В. Мареев // Вестник СГГА. – 2014. – № Вып. 3 (27). – С. 70–83.
19. Моделирование высот квазигеоида на локальных участках земной поверхности по результатам разложения в обобщенный ряд Фурье / Канушин В. Ф., Ганагина И. Г., Голдобин Д. Н. // Гироскопия и навигация. – Т. 28. – № 4 (111). – 2020. – С. 82-94.

© Г. И. Ганагина, В. М. Канушин, Д. Н. Голдобин, И. В. Зверев, 2022