

УДК 550.831.015:528.8

DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-3-20-31

Анализ изменений характеристик гравитационного поля Земли по данным космических миссий GRACE и GRACE FO

И. Г. Ганагина¹✉, В. Ф. Канушин¹, Д. Н. Голдобин¹

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: gam0209@yandex.ru

Аннотация. По данным динамических моделей гравитационного поля Земли (ГПЗ), созданных по результатам космической гравиметрической миссии Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE), вычислены значения аномалий силы тяжести и высот квазигеоида на пунктах, расположенных на территории Новосибирской области. Результаты, полученные за двадцать лет работы проекта GRACE и его продолжения GRACE FO с 2002 по 2022 гг., позволяют проанализировать изменения характеристик ГПЗ. Максимальный диапазон вариаций аномалии силы тяжести по данным 77 сезонных моделей геопотенциала за исследуемый период составил 15,15 мкГал, минимальный диапазон – 12,31 мкГал. Максимальный диапазон вариаций аномалии высоты по данным 77 сезонных моделей геопотенциала составил 16,40 мм, минимальный – 15,72 мм. Максимальные значения изменений характеристик ГПЗ зафиксированы на пунктах, расположенных в южной части исследуемой территории. Выявлены некоторые сезонные закономерности изменений аномалий силы тяжести и аномалий высоты. В работе представлены графики изменений характеристик ГПЗ, позволяющие выявить динамику их вариаций и сделать предположения о взаимосвязи с сезонными природными процессами.

Ключевые слова: динамические модели гравитационного поля Земли, анализ изменений во времени

Введение

Развитие методов космической геодезии повлекло за собой появление спутниковой гравиметрии, которая изменила подходы в решении задач изучения гравитационного поля Земли как в пространстве, так и во времени. В настоящее время определение параметров гравитационного поля Земли выполняется с помощью наземных измерений и методами моделирования по данным космических гравиметрических миссий «Чамп» (CHAMP), «Гоч» (GOCE), «Грейс» (GRACE) и ее продолжения – GRACE Follow On.

Результатом проектов CHAMP и GOCE являются высокоточные статические модели, созданные на основе комбинирования многолетних спутниковых данных и наземных гравиметрических измерений [1, 2], однако полученные модели не позволяют выявить временные вари-

ации гравитационного поля Земли. Для изучения изменений ГПЗ во времени используют данные проектов GRACE и GRACE Follow On.

GRACE – Gravity Recovery and Climate Experiment – совместная гравиметрическая миссия Федерального агентства National Aeronautics and Space Administration (NASA) и Германского центра авиации и космонавтики, целью которой является определение параметров глобального ГПЗ. Миссия реализована системой «спутник – спутнику», в режиме «низкий – низкий», согласно которому два спутника следуют друг за другом по околополярной орбите на высоте порядка 500 км. При полете над территориями со структурными и плотностными неоднородностями распределения масс скорость спутников меняется, а вместе с тем меняется расстояние между ними. В среднем расстояние составляет 220–250 км, измеряется с помощью микроволнового радара с точностью до первых десятков

микрон. Измеренное с высокой точностью расстояние является исходной величиной, позволяющей выявить распределение аномальных масс территорий земной поверхности, над которыми пролетают гравиметрические спутники [3].

Траектория полета спутников покрывает территорию Земли примерно за 30 суток, что позволяет отслеживать перераспределение масс на земной поверхности в динамике. Это дает возможность создавать временные модели гравитационного поля с периодичностью один раз в месяц.

Помимо микроволновой системы измерений расстояния каждый спутник оснащен дополнительным оборудованием. ГНСС-приемник, расположенный на борту спутников, позволяет определять точное положение каждого космического аппарата вдоль базовой линии. Для устранения влияния внешних негравитационных сил на борту каждого космического аппарата находится чувствительный электростатический акселерометр, расположенный вблизи центра масс спутника. На рис. 1 изображены спутники-близнецы GRACE [4].



Рис. 1. Спутники-близнецы GRACE [4]

Миссия GRACE, запущенная с космодрома Плесецк в 2002 г., прекратила функционирование в сентябре 2017 г., в мае 2018 г. запущена миссия CRACE Follow On (GRACE FO). Спутники миссии оснастили лазерной интерферометрической системой, согласованной с данными основной измерительной системы микроволнового диапазона спутников GRACE. Это позволило повысить точность измерения расстояния между спутниками почти в 30 раз, а точность гравитационных моделей увеличить на 30 %.

Результатами завершившейся миссии CRACE и активной CRACE FO являются ежемесячные данные, представленные временными моделями геопотенциала, позволяющие отследить изменение характеристик гравитационного поля Земли в динамике, сделать вы-

воды о сезонных перераспределениях масс на суше и в океане. Кроме того, результаты работы миссии существенно расширяют возможности исследований вопросов климатологии, сейсмологии и геодинамики [5–10].

Изучение характеристик гравитационного поля Земли и их изменений во времени является актуальным при решении задач координатно-временного и навигационного обеспечения территории государства и его обороноспособности.

Целью работы является анализ изменений характеристик гравитационного поля Земли по данным космических гравиметрических миссий GRACE и GRACE Follow On на гравиметрических пунктах, расположенных на территории Новосибирской области, за период с 2002 по 2022 гг.

Материалы и методы исследования

Гравитационный потенциал в точке $P(\varphi, \lambda, r, t)$, расположенной во внешнем пространстве по отношению к Земле, представляется в виде разложения в ряд по системе сферических функций геоцентрических координат – радиуса-вектора r , широты φ и долготы λ в виде [11]

$$V(\varphi, \lambda, r, t) = \frac{fM}{r} \left[1 + \sum_{n=2}^N \left(\frac{a_e}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm}(t) \cos m\lambda + \bar{S}_{nm}(t) \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \varphi) \right], \quad (1)$$

где $\bar{C}_{nm}(t)$, $\bar{S}_{nm}(t)$ – нормированные гармонические коэффициенты на момент t ; f – гравитационная постоянная; a_e – средний экваториальный радиус Земли; t – время; $\bar{P}_{nm}(\sin \varphi)$ – нормированные присоединенные функции Лежандра степени n и порядка m .

Исходными данными для выполнения исследования являются временные модели гравитационного поля Земли в формате GFZ с плановым разрешением около 200 км, созданные на основе результатов космических гравиметрических миссий GRACE и GRACE FO, представленных в открытом доступе на сайте международного центра International Center for Global Gravity Field Models (ICGEM) [10].

ICGEM занимается сбором и хранением современных глобальных моделей гравитационного поля и представляет собой интерактивную платформу для расчета и визуализации характеристик глобального гравитационного поля Земли.

В экспериментальных исследованиях использованы данные 77 временных глобальных моделей гравитационного поля, по четыре модели в разные сезоны (март, июнь, сентябрь, декабрь) с 2002 по 2022 гг. Исключением является период с осени 2017 г., когда миссия GRACE завершилась, до весны 2018 г., когда начала работу GRACE FO. Выбор периодичности измерений обусловлен желанием выявить закономерности сезонных изменений аномалии силы тяжести (АСТ) и высоты геоида (ВГ) на исследуемой территории.

Исследования изменений характеристик ГПЗ по данным космических миссий GRACE и GRACE FO выполнены для 28 пунктов территории Новосибирской области (рис. 2). Рельеф исследуемой территории неоднороден. Большая часть территории расположена на равнине Обь-Иртышского междуречья, где высоты пунктов не превышают 200 м. Наиболее возвышенный район – Салаирский кряж – древние горы с абсолютными отметками высот до 450 м [12].

Вычисления характеристик гравитационного поля Земли выполнены в программе, разработанной в лаборатории физической геодезии СГУГиТ [13].

Значения ВГ и АСТ для пунктов на исследуемой территории выполнено по формулам:
– высота геоида

$$\zeta(\varphi, \lambda, r, t) = R \sum_{n=2}^N \left(\frac{a_e}{r} \right)^n \Delta Y_n(\varphi, \lambda, t); \quad (2)$$

– аномалия силы тяжести

$$\Delta g(\varphi, \lambda, r, t) = \gamma(\varphi) \sum_{n=2}^N (n-1) \left(\frac{a_e}{r} \right)^{n+1} \Delta Y(\varphi, \lambda, t), \quad (3)$$

где $\Delta Y_n(\varphi, \lambda, t) = \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm}(t) \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm}(t) \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \varphi)$; R – средний радиус Земли; a_e – экваториальный радиус Земли; r – радиус-вектор точки; λ – долгота точки; φ – широта точки.

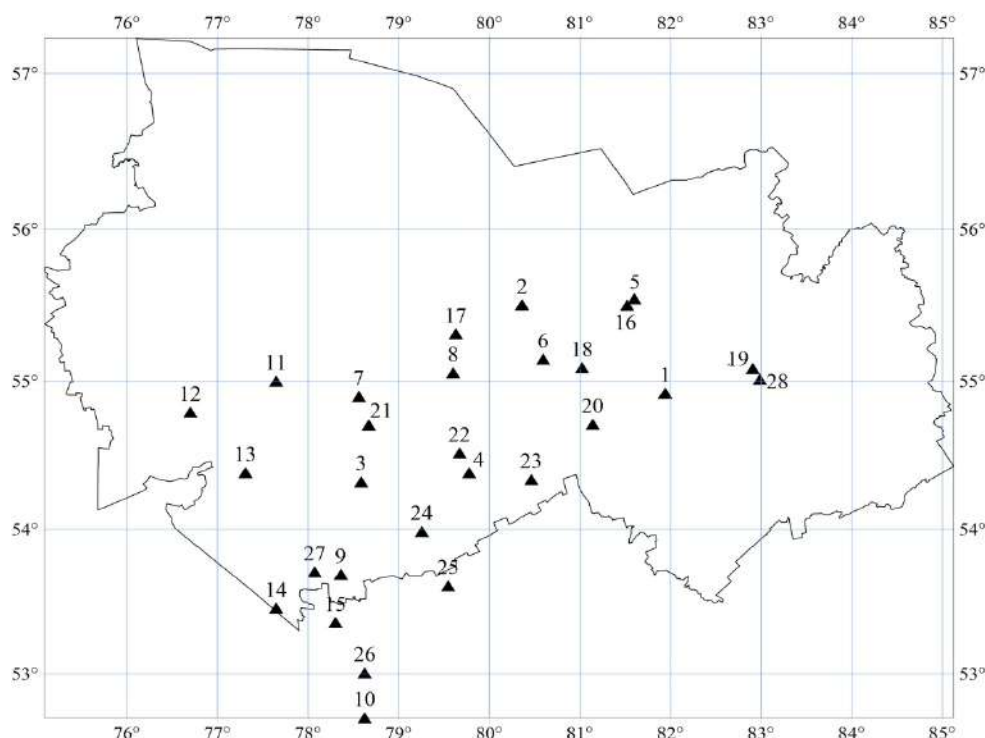


Рис. 2. Схема расположения гравиметрических пунктов на территории Новосибирской области

Результаты исследования

В качестве параметра, характеризующего временные вариации гравитационного поля в исследуемом регионе, используется определение изменений АСТ и ВГ, полученных по данным миссии GRACE и GRACE FO с дискретностью 3 месяца за период с июня 2002 по июнь 2022 г.

Вариации АСТ и ВГ по всем временным моделям геопотенциала вычисляются относительно аналогичных характеристик, получен-

ных по данным миссии GRACE в марте 2002 г. Исходные значения аномалии силы тяжести и высоты геоида, вычисленные на март 2002 г., приняты за «нулевое» отчетное значение.

На рис. 3–5 приведены графики изменения среднегодовых значений аномалий высоты на 28 пунктах территории Новосибирской области за период с 2002 по 2022 гг. (без учета сезонных вариаций). Также на графиках нанесены линии тренда с прогнозом изменения аномалии высоты до 2024 г.

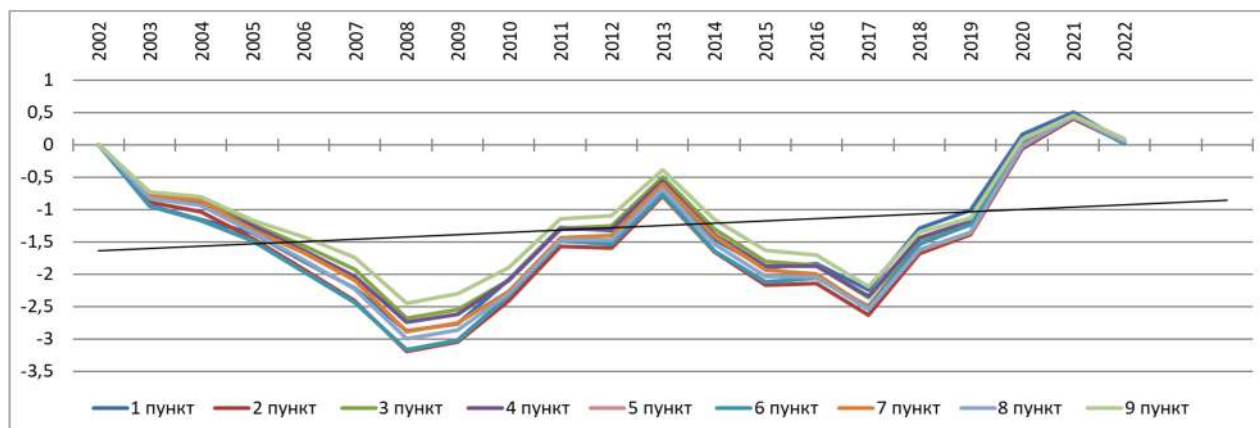


Рис. 3. Графики изменения среднегодовых значений аномалии высоты на пунктах с 1 по 9 за период с 2002 по 2022 гг. (в мм)

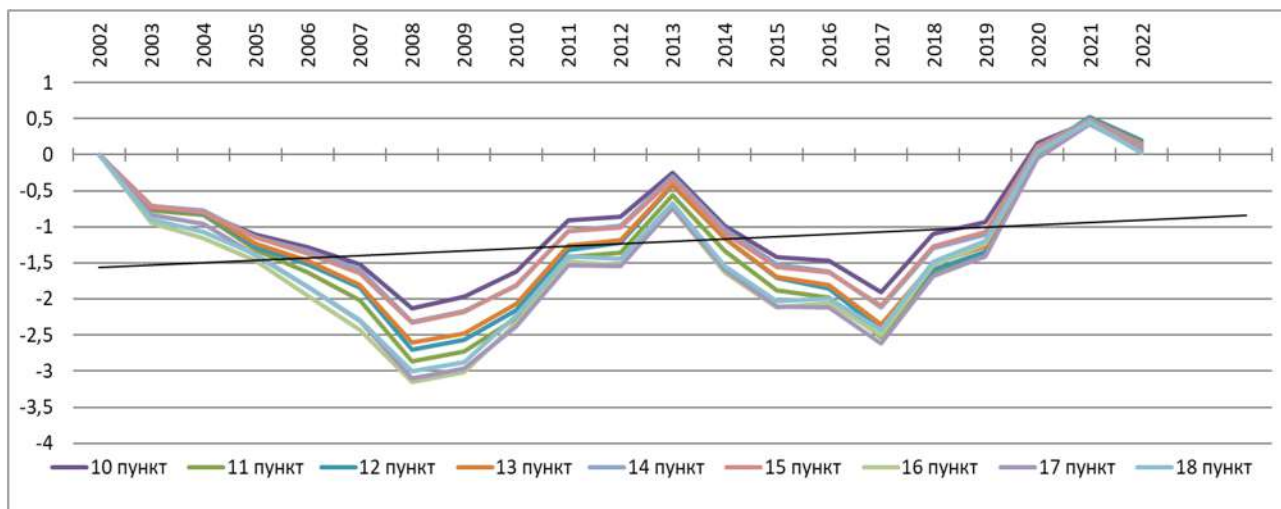


Рис. 4. Графики изменения среднегодовых значений аномалии высоты на пунктах с 10 по 18 за период с 2002 по 2022 гг. (в мм)

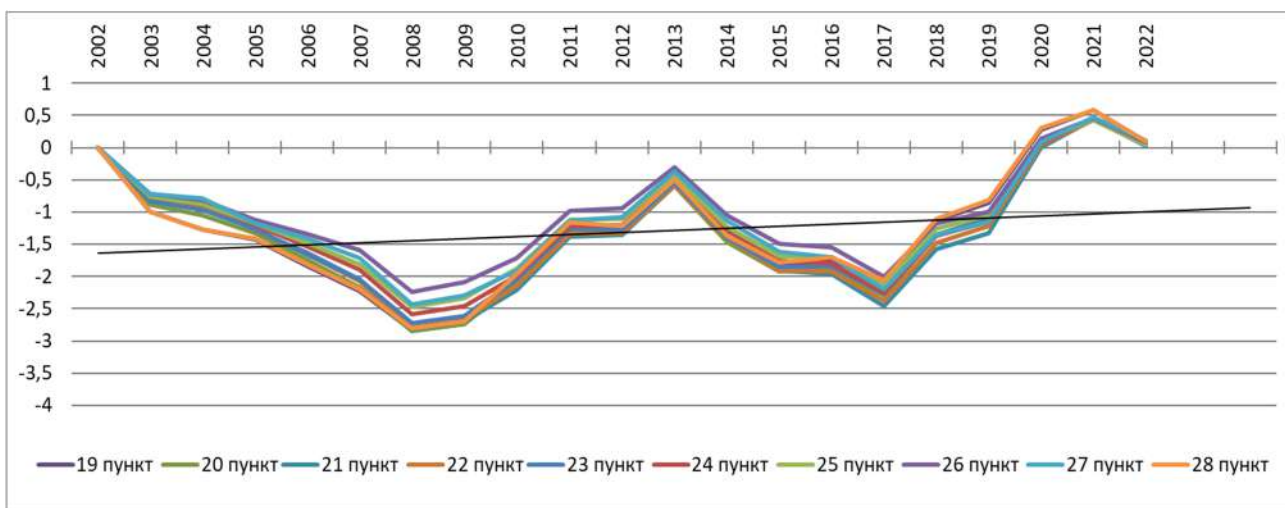


Рис. 5. Графики изменения среднегодовых значений аномалии высоты на пунктах с 19 по 28 за период с 2002 по 2022 гг. (в мм)

Анализ рис. 3–5 позволяет сделать следующие выводы:

- максимальные изменения среднегодовых значений аномалии высоты для 28 пунктов территории Новосибирской области составили от 2,5 до 3,5 мм;

- с 2002 по 2008 гг. и с 2013 по 2017 гг. изменения среднегодовых значений аномалии высоты уменьшались от –2,2 до –3,0 мм, с 2008 по 2013 гг. и с 2017 по 2022 гг. идет увеличение значений изменения изучаемой характеристики ГПЗ до 3,0 мм;

- в 2021 г. изменения среднегодовых значений аномалии высоты для всех пунктов на

территории Новосибирской области впервые превысили «нулевое» среднее значение, полученное в 2002 г. и принятое за отчетное;

- линия тренда показывает увеличение значений аномалии высоты за исследуемый период вычислений.

На рис. 6–8 приведены графики изменения среднегодовых значений аномалий силы тяжести на 28 пунктах территории Новосибирской области за период с 2002 по 2022 гг. (без учета сезонных вариаций). Также на графиках нанесены линии тренда с прогнозом изменения характеристики ГПЗ до 2024 г.

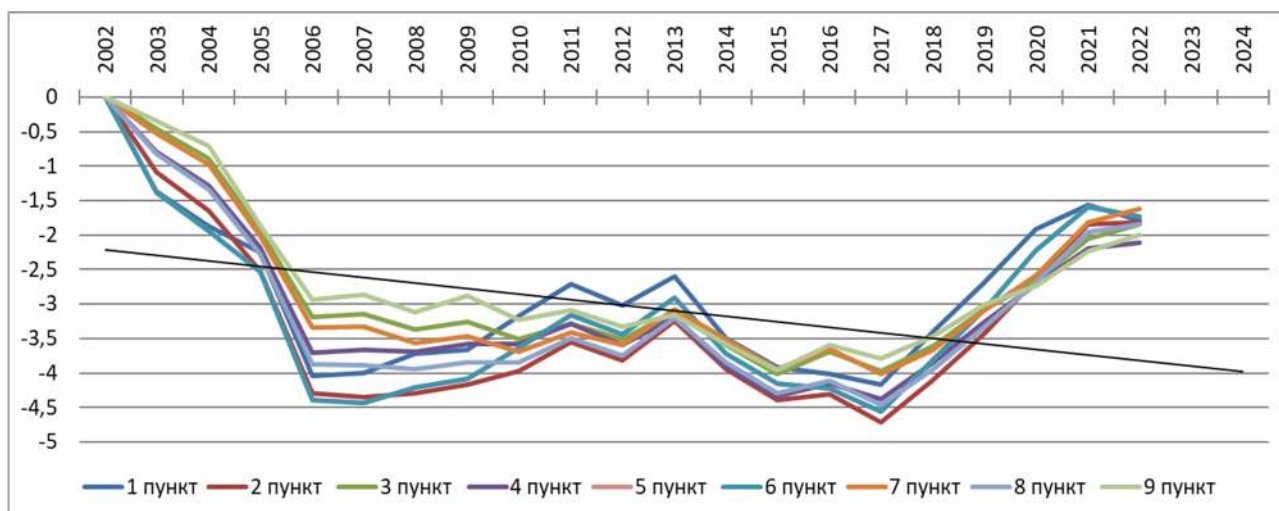


Рис. 6. Графики изменения среднегодовых значений аномалии силы тяжести на пунктах с 1 по 9 за период с 2002 по 2022 гг. (в мкГал)

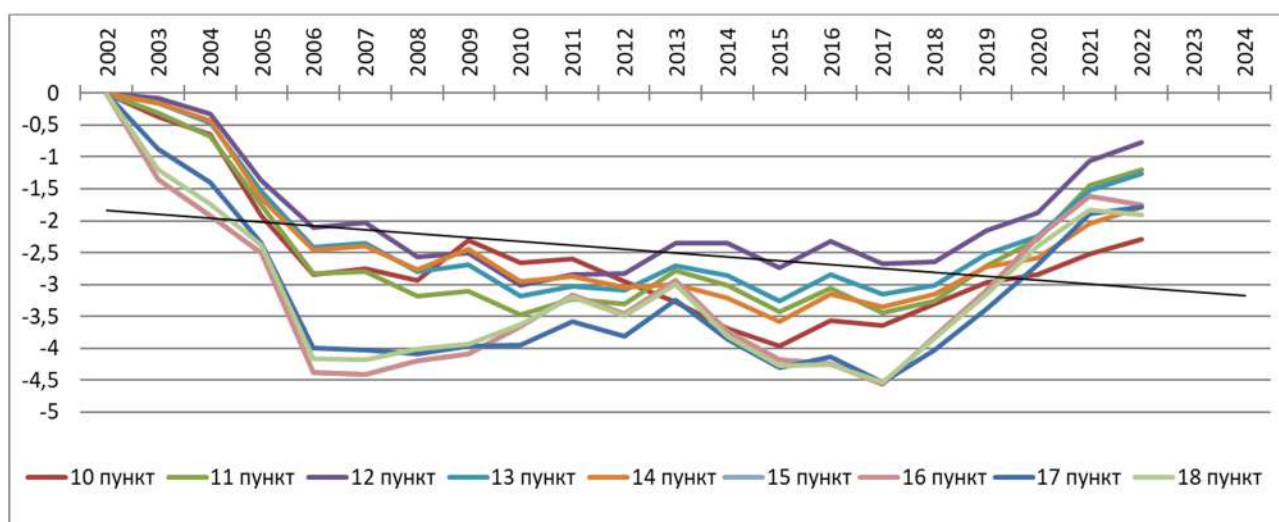


Рис. 7. Графики изменения среднегодовых значений аномалии силы тяжести на пунктах с 10 по 18 за период с 2002 по 2022 гг. (в мкГал)

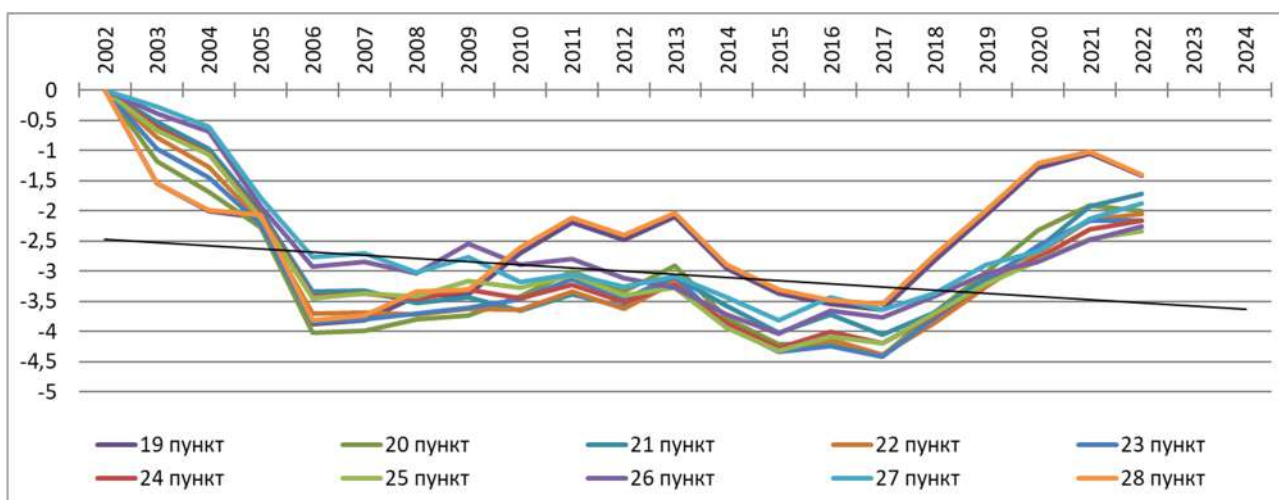


Рис. 8. Графики изменения среднегодовых значений аномалии силы тяжести на пунктах с 19 по 28 за период с 2002 по 2022 гг. (в мкГал)

Анализируя графики, приведенные на рис. 6–8, можно сделать следующие выводы:

– максимальные изменения среднегодовых значений аномалии силы тяжести для 28 пунктов территории Новосибирской области составили от $-3,0$ до $-4,5$ мкГал;

– с 2002 по 2006 гг. изменения средних значений аномалии силы тяжести уменьшались от $-3,0$ до $-4,0$ мкГал, с 2007 по 2022 гг. значения изменения изучаемой характеристики ГПЗ изменялись в пределах $\pm 2,5$ мкГал;

– линия тренда характеризует уменьшение значений аномалии силы тяжести за исследуемый период вычислений;

– полученные вариации среднегодовых значений аномалий силы тяжести для 28 пунктов на территории Новосибирской области находятся на пределе точности гравиметрической аппаратуры, которая составляет 5 мкГал.

Для анализа изменений сезонных вариаций значений аномалии высоты и аномалии силы тяжести выполнены вычисления по данным 77 временных моделей геопотенциала для 28 пунктов на исследуемой территории.

Используя полученные результаты, для каждого пункта вычислен диапазон изменений характеристик ГПЗ в период с марта 2002 по март 2022 гг. Результаты представлены в таблице.

Изменения характеристик гравитационного поля на пунктах территории Новосибирской области с марта 2002 по март 2022 гг.

№ пункта	Изменения аномалии силы тяжести (мкГал)			Изменения аномалии высоты (мм)		
	Максимальное значение	Минимальное значение	Диапазон	Максимальное значение	Минимальное значение	Диапазон
1	4,94	-9,70	14,63	4,62	-11,29	15,91
2	5,94	-8,29	14,24	4,68	-11,72	16,40
3	7,56	-6,20	13,76	5,39	-10,63	16,02
4	7,10	-7,70	14,81	5,31	-10,81	16,12
5	4,73	-9,38	14,12	4,57	-11,78	16,35
6	6,04	-8,58	14,62	4,70	-11,45	16,16
7	7,28	-6,20	13,48	5,02	-11,06	16,08
8	6,80	-7,49	14,29	4,88	-11,31	16,18
9	7,79	-5,79	13,57	5,77	-10,13	15,90
10	7,95	-5,64	13,59	6,28	-9,46	15,75
11	7,24	-5,07	12,31	5,07	-11,01	16,08
12	8,27	-4,09	12,36	5,21	-10,72	15,91
13	7,88	-4,60	12,48	5,28	-10,49	15,76
14	7,77	-4,81	12,58	5,85	-9,87	15,72
15	7,86	-5,60	13,46	5,95	-9,89	15,84
16	4,86	-9,33	14,19	4,58	-11,75	16,33
17	6,61	-7,50	14,11	4,77	-11,51	16,28
18	5,70	-9,00	14,70	4,68	-11,42	16,10
19	3,90	-10,08	13,98	4,58	-11,35	15,93
20	5,88	-9,13	15,01	4,917	-11,14	16,06

Окончание таблицы

№ пункта	Изменения аномалии силы тяжести (мкГал)			Изменения аномалии высоты (мм)		
	Максимальное значение	Минимальное значение	Диапазон	Максимальное значение	Минимальное значение	Диапазон
21	7,09	-7,58	14,67	5,23	-10,90	16,13
22	6,69	-8,46	15,15	5,26	-10,83	16,10
24	7,52	-7,00	14,52	5,59	-10,46	16,05
25	7,53	-7,26	14,79	5,78	-10,22	16,01
26	7,90	-5,84	13,74	6,13	-9,68	15,82
27	7,78	-5,43	13,21	5,74	-10,11	15,85
28	3,95	-10,09	14,04	4,58	-11,28	15,87

Из таблицы видно, что максимальный диапазон вариаций аномалии силы тяжести за исследуемый период зафиксирован на пункте № 23 и составляет 15,15 мкГал, минимальный диапазон – на пункте № 11 и составляет 12,31 мкГал. Максимальный диапазон вариаций аномалии высоты зафиксирован на пункте № 2 и составляет 16,40 мм, минимальный – на пункте № 14 и составляет 15,72 мм.

На рис. 9 и 10 приведены графики сезонных изменений характеристик ГПЗ для точек № 2 и 23, на которых зафиксирован максимальный диапазон вариаций.

На рис. 9 представлен график сезонных изменений величины аномалии высоты для пункта № 2 за период с 2002 по 2022 гг., на рис. 10 приведен график сезонных изменений значений аномалии силы тяжести для 23-го пункта за период с 2002 по 2022 гг.

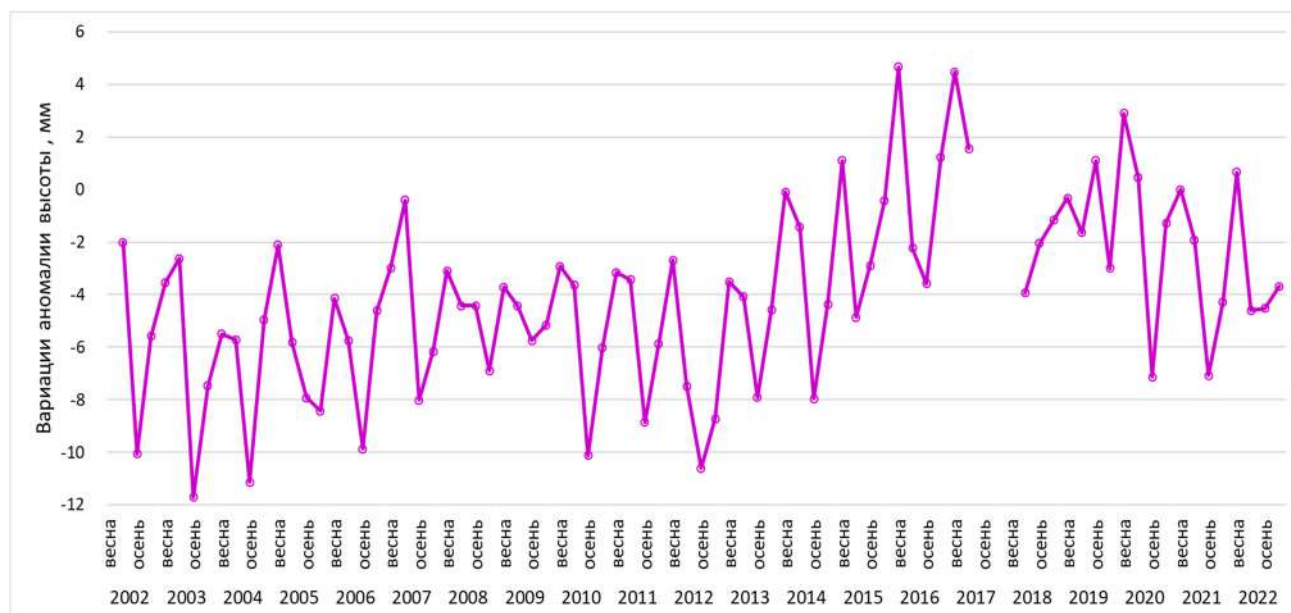


Рис. 9. График сезонных изменений значений аномалии высоты для 2-го пункта за период с 2002 по 2022 гг. (в мм)

Анализируя графики на рис. 9 и 10, можно отметить периодичность изменений исследуемых характеристик ГПЗ: с осени до весны изменения

значений характеристик ГПЗ увеличиваются, с весны до осени происходит уменьшение значений. Максимальное значение вариации аномалии

высоты в точке № 2 зафиксировано весной 2016 г., минимальное значение – осенью 2003 г., которое составило $-11,72$ мм. Минимальное значение вариации аномалии силы тяжести в точке № 23 зафиксировано осенью 2012 г. и составило $-8,46$ мкГал, максимальное значение – весной 2017 г., составившее $6,69$ мкГал.

Наблюдаемая закономерность на графиках может быть объяснена сезонным перераспределением воздушных и водных масс – сезонными изменениями уровня воды в реках и озерах, а также колебаниями уровня Мирового океана, изменениями массы льда и снега на поверхности Земли [14].

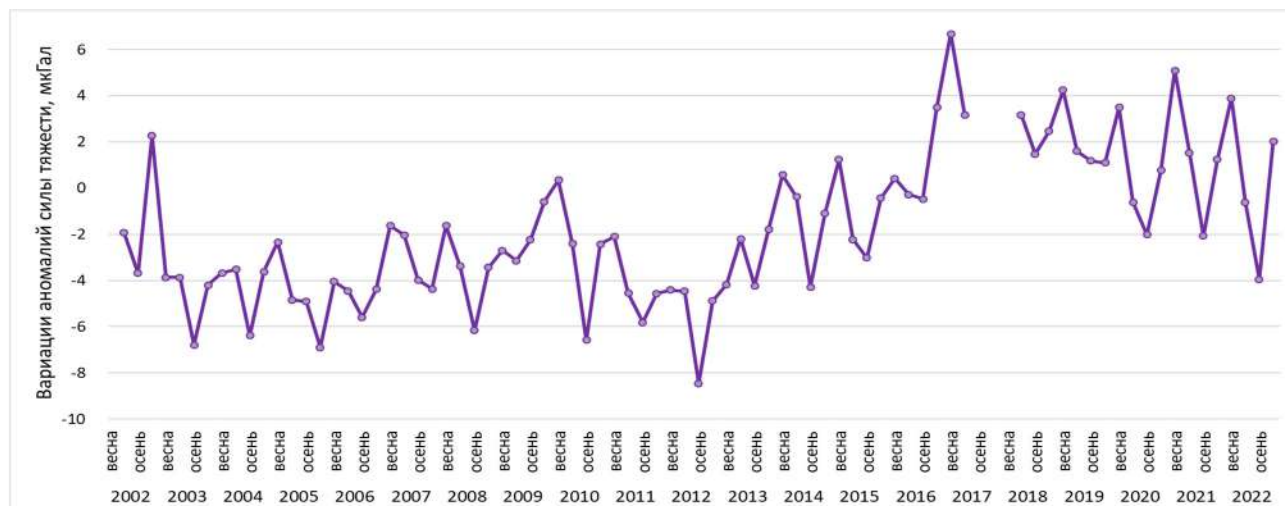


Рис. 10. График сезонных изменений значений аномалии силы тяжести для 23-го пункта за период с 2002 по 2022 гг. (в мкГал)

Обсуждение

Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности изучения изменений характеристик ГПЗ во времени на основе данных космических гравиметрических миссий GRACE и GRACE FO.

Для более полного изучения природы изменений характеристик гравитационного поля Земли на территории Новосибирской области необходимо продолжить исследования

с использованием новых данных, полученных в ходе космических гравиметрических миссий и наземных измерений. Это позволит детальнее изучить природу изменений, создать высокоточные модели характеристик ГПЗ с учетом их изменения в пространстве и во времени на любую территорию, установить связи вариаций ГПЗ с различными геодинамическими процессами на поверхности Земли и в ее недрах, а также в околоземном пространстве.

Исследование выполнено в рамках СЧ НИР «ГЕОТЕХ-КВАНТ-2» с целью возможности высокоточного моделирования характеристик ГПЗ на территорию Российской Федерации с учетом их изменения во времени.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Karpik A. P., Kanushin V. F., Ganagina I. G., Goldobin D. N., Mazurova E. M. Analyzing spectral characteristics of the global earth gravity field models obtained from the CHAMP, GRACE and GOCE space mission // Gyroscopy and Navigation. – 2015. – Vol. 6, No. 2. – P. 101–108. – DOI 10.1134/S2075108715020054.
2. Канушин В. Ф., Ганагина И. Г., Голдобин Д. Н., Мазурова Е. М., Косарев Н. С., Косарева А. М. Сравнение спутниковых моделей проекта GOCE с различными наборами независимых наземных гравиметрических данных // Вестник СГУГиТ. – 2014. – Вып. 3 (27). – С. 21–34.
3. GRACE Gravity Recovery and Climate Experiment Model [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www2.csr.utexas.edu/grace/gravity/> (accessed: 05.01.2024).

4. Kusche J., Schmidt R., Petrovic S., Rietbroek R. Decorrelated GRACE time-variable gravity solutions by GFZ, and their validation using a hydrological model // *Journal of Geodesy*. – 2009. – Vol. 83(10). – P. 903–913. – DOI 10.1007/s00190-009-0308-3.
5. Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology / GRACE FO [Electronic resource]. – Mode of access: <https://gracefo.jpl.nasa.gov/mission> (accessed: 05.01.2024).
6. GRACE Gravity Recovery and Climate Experiment Model [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www2.csr.utexas.edu/grace/gravity/> (accessed: 05.01.2024).
7. Flechtner F., Morton P., Watkins M., Webb F. Status of the GRACE Follow-On Mission // *Gravity, Geoid and Height Systems. International Association of Geodesy Symposia*, vol. 141 / U. Marti (Ed.). – Springer, Cham, 2014. – DOI 10.1007/978-3-319-10837-7_15.
8. Albertella F., Migliaccio E., Sanso G. GOCE: The Earth Gravity Field by Space Gradiometry // *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. – 2002. – Vol. 83. – P. 1–15. – DOI 10.1023/A:1020104624752.
9. Reigber Ch., Balmino G., Schwintzer P., Biancale R. et al. Global gravity field recovery using solely GPS tracking and accelerometer data from Champ // *Space Science Reviews*. – 2003. – Vol. 108(1). – P. 55–66. – DOI 10.1023/A:1026217713133.
10. ICGEM – International Center for Global Gravity Field Models [Electronic resource]. – Mode of access: <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/ICGEM.html/> (accessed: 05.01.2024).
11. Голдобин Д. Н. Разработка методики комплексного определения характеристик гравитационного поля по данным глобальных моделей геопотенциала : дис. ... канд. техн. наук / Денис Николаевич Голдобин. – Новосибирск, 2019. – 201 с.
12. Новосибирская область [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.mnr.gov.ru/activity/regions/novosibirskaya_oblast/?sphrase_id=597314 (дата обращения: 05.01.2024).
13. 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.
14. Суздалев А. С., Вовк И. Г., Артемьева Н. П. Пространственно-временные вариации гравитационного поля Земли // // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 3. – С. 20–25.

Об авторах

Ирина Геннадьевна Ганагина – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой космической и физической геодезии.

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

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

Получено 28.02.2024

© И. Г. Ганагина, В. Ф. Канушин, Д. Н. Голдобин, 2024

Analysis of changes in the characteristics of the earth's gravitational field according to data from the GRACE and GRACE FO space missions

I. G. Ganagina¹✉, V. F. Kanushin¹, D. N. Goldobin¹

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: gam0209@yandex.ru

Abstract. Based on dynamic models of the Earth's gravitational field (EGF), created as a result of the space gravimetric mission Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE), the values of

gravity anomalies and quasi-geoid heights at points located in the Novosibirsk region were calculated. The results obtained over twenty years of operation of the GRACE project and its continuation GRACE FO from 2002 to 2022 make it possible to analyze changes in the characteristics of the EGF. The maximum range of variations in the gravity anomaly according to 77 seasonal geopotential models for the study period was 15.15 μGal , the minimum range was 12.31 μGal . The maximum range of variations in the height anomaly according to 77 seasonal geopotential models was 16.40 mm, the minimum was 15.72 mm. The maximum values of changes in the characteristics of the GPZ were recorded at points located in the southern part of the study area. Some seasonal patterns of changes in gravity anomalies and height anomalies have been identified. The work presents graphs of changes in the characteristics of the gas reserve zone, which make it possible to identify the dynamics of their variations and make assumptions about the relationship with seasonal natural processes.

Keywords: dynamic models of the Earth's gravitational field, analysis of changes over time

REFERENCES

1. Karpik, A. P., Kanushin, V. F., Ganagina, I. G., Goldobin, D. N., & Mazurova, E. M. (2015). Analyzing spectral characteristics of the global earth gravity field models obtained from the CHAMP, GRACE and GOCE space mission. *Girokopiya i navigatsiya [Gyroscopy and Navigation]*, 6(2), 101–108. DOI 10.1134/S2075108715020054 [in Russian].
2. Kanushin, V. F., Ganagina, I. G., Goldobin, D. N., Mazurova, E. M., Kosarev, N. S., & Kosareva, A. M. (2014). Comparison of satellite models of the GOSE project with various sets of independent ground-based gravimetric data. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 3(27), 21–34 [in Russian].
3. GRACE Gravity Recovery and Climate Experiment Model. Retrieved from <https://www2.csr.utexas.edu/grace/gravity/> [in Russian].
4. Kusche, J., Schmidt, R., Petrovic, S., & Rietbroek, R. (2009). Decorrelated GRACE time-variable gravity solutions by GFZ, and their validation using a hydrological model. *Journal of Geodesy*, 83(10), 903–913. DOI 10.1007/s00190-009-0308-3.
5. Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology. Retrieved from <https://gracefo.jpl.nasa.gov/mission> [in Russian].
6. GRACE Gravity Recovery and Climate Experiment Model. Retrieved from <https://www2.csr.utexas.edu/grace/gravity/> [in Russian].
7. Flechtner, F., Morton, P., Watkins, M., & Webb, F. (2014). Status of the GRACE Follow-On Mission. Gravity, Geoid and Height Systems. *International Association of Geodesy Symposia*, 141. Retrieved from https://doi.org/10.1007/978-3-319-10837-7_15.
8. Albertella, F., Migliaccio, E., & Sanso, G. (2002). GOCE: The Earth Gravity Field by Space Gradiometry. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, Vol. 83, 1–15. DOI 10.1023/A:1020104624752.
9. Reigber, Ch., Balmino, G., Schwintzer, P., Biancale, R. & et al. (2003). Global gravity field recovery using solely GPS tracking and accelerometer data from Champ. *Space Science Reviews*, 108(1), 55–66. DOI 10.1023/A:1026217713133.
10. ICGEM – International Center for Global Gravity Field Models. Retrieved from <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/ICGEM.html/> [in Russian].
11. Goldobin, D. N. (2019). Razrabotka metodiki kompleksnogo opredeleniya xarakteristik gravitacionnogo polya po dannym global'nyx modelej geopotenciala [Development of a methodology for complex determination of the characteristics of the gravitational field according to global geopotential models]. *Candidate's thesis* [in Russian].
12. Novosibirskaya oblast'. Retrieved from: https://www.mnr.gov.ru/activity/regions/novosibirskaya_oblast/?sphrase_id=597314 [in Russian].
13. Goldobin, D. N. *Patent RF No. 2018666260*. Novosibirsk: IP Russian Federation.

14. Suzdalev, A. S., Vovk, I. G., & Artem'eva, N. P. (2012). Spatial and temporal variations of the Earth's gravitational field. *Intere'kspo Geo-Sibir'* [*GEO-Siberia*], 20–25 [in Russian].

Author details

Irina G. Ganagina – Ph. D., Associate Professor, Head of Department of Space and Physical Geodesy.

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.

Received 28.02.2023

© *I. G. Ganagina, V. F. Kanushin, D. N. Goldobin, 2024*