

## Об учёте лунно-солнечного влияния на грависейсмические колебания Земли с помощью осреднения

©2023 Ю. В. Антонов✉, И. Ю. Антонова

*Воронежский государственный университет, Университетская пл., 1,  
394006, г. Воронеж 394006, Российская Федерация*

### Аннотация

*Введение:* Движения Луны и Солнца деформируют Землю и атмосферу, в результате чего возникают гравитационные и сейсмические колебания с периодом, близким к суточному.

*Методика:* Для практических целей нередко требуется выделение локальной части изменения сейсмического и гравитационного полей, т.е. исключить из физических измерений влияние Луны и Солнца. Что же касается измерений силы тяжести, то этот вопрос решен давно.

*Результаты и обсуждение:* Для разделения притяжения Луны и Солнца от пульсаций можно воспользоваться методом осреднения. Периоды пульсаций на один-два порядка меньше. Тогда осреднение с небольшим интервалом практически не изменит лунно-солнечные вариации, но почти сведет к нулю влияние пульсаций.

*Выводы:* Относительно сейсмических колебаний для разделения притяжения Луны и Солнца от пульсаций можно воспользоваться методом осреднения из-за большой разности периодов колебаний между пульсациями Солнца с Луной.

**Ключевые слова:** пульсации гравитационного и сейсмического поля, лунно-солнечные вариации силы тяжести; корональные выбросы массы, метеорные потоки, метод осреднения.

*Для цитирования:* Антонов Ю. В., Антонова И. Ю. Об учёте лунно-солнечного влияния на грависейсмические колебания Земли с помощью осреднения // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2023. № 4. С. 122–128. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/4/122-128>

### Введение

Вращение Луны вокруг Земли и самой Земли вокруг Солнца деформируют Землю и ее атмосферу, вызывая тем самым гравитационные вариации и сейсмические колебания, измерения которых производятся в основном с помощью приборов, использующих в качестве датчиков маятник Голицына. К тому же изменение гравитационного и сейсмического полей идёт одновременно. Совместные измерения силы тяжести и сейсмических колебаний были ранее конкретно рассмотрены в [1–8]. Неприливные пульсации силы тяжести и сейсмических колебаний возникают не только за счет колебаний земной атмос-

феры после ударов по ней метеорных потоков. Сюда же можно присоединить корональные выбросы масс на Солнце и атмосферные фронты, внутренние гравитационные волны и т. д. [1–11].

Поскольку измерения гравитационного поля и сейсмических колебаний получены часто с помощью маятника Голицына и идут они одновременно, то возникает вопрос о первичности сейсмических колебаний или гравитационных волн. Например, изменение гравитационного поля во времени за счёт Луны и Солнца вызывает за собой возникновение сейсмических колебаний с тем же периодом, но, с другой стороны, землетрясение вызывает сейсмическое



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

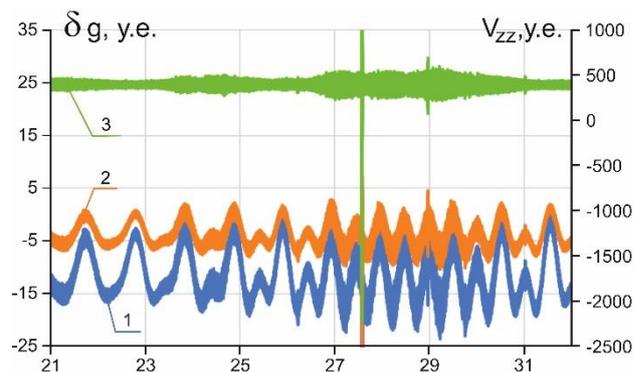
---

✉ Антонов Юрий Васильевич, e-mail: [yuriyantono@yandex.ru](mailto:yuriyantono@yandex.ru)

поле и следующее за ним гравитационное. В целом же динамическая система сейсмических и гравитационных колебаний существует взаимосвязано и не всегда можно выделить первопричину этих колебаний. Но с другой стороны движения Луны и Солнца вызывают синхронные сейсмогравитационные колебания

Ранее отмечалось [1–12], что основной причиной, вызывающей колебания атмосферы, движения Луны и Солнца относительно Земли, создающие гравитационные поля, которые изменяют форму Земли и атмосферы одновременно. Движения их соответственно воздействует на сейсмические колебания, и гравитационное поле. Для учета силы тяжести созданы программы [12], которые позволяют легко исключить влияние притяжения Луны и Солнца. Для примера рассмотрим так называемые сейсмогравитационные измерения со станции BFO в Германии (рис. 1). На рис. 1 показаны измеренные значения силы тяжести. Поскольку для измерений на станции BFO используется двухсферный гравиметр, с помощью которого одновременно измеряется сила тяжести двумя датчиками, расположенными на разных высотах, что в свою очередь позволяет вычислять вертикальный градиент силы тяжести. Результаты использования программы, уже приводились при интерпретации сейсмогравитационных пульсаций с помощью осреднения [1–5].

Предварительно заметим, что используемые данные для расчетов получены приборами, имеющими не только различную погрешность измерений, но и различные программы обработки сигналов на временных интервалах различной длины. Кроме того, в англоязычной литературе принято считать основной единицей силы тяжести  $\text{мкм/см}^2$ , которая в десять раз меньше привычного нам миллигала. Подтверждением этому является программа Тиммена для вычисления притяжения Луны и Солнца [12], в которой значения силы тяжести даны в размерности  $\text{мкм/см}^2$ . Указанные

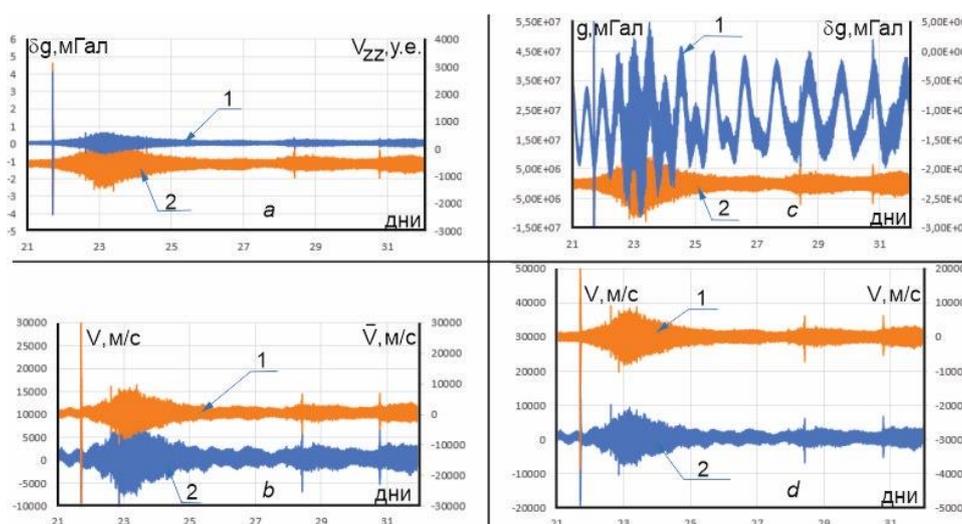


**Рис. 1.** Лунно-солнечной вариаций силы тяжести в апреле 2023 года на станции BFO (Германия) 1, 2 – измеренные вариации силы тяжести на двух сферах; 3 – вертикальный градиент силы тяжести.

**[Fig. 1.** Lunar-solar variations of gravity in April 2023 at BFO station (Germany) (1, 2) – measured variations of gravity on two spheres; (3) – vertical gradient of gravity.]

особенности надо учитывать при обработке материалов. Поэтому на графиках рисунков в качестве единиц измерений даются условные единицы.

Но вернемся к данным измерений силы тяжести на рис.1. После обработки измерений с учетом влияния лунно-солнечного притяжения [12] получены изменения силы тяжести и вертикального градиента (рис. 2а). Как и должно быть форма графиков силы тяжести и вертикального градиента совпадают между собой [5]. На рис. 2, с приведены графики наблюдаемых значений силы тяжести и остаточных локальных значений силы тяжести, полученных по одному из датчиков гравиметра с помощью осреднения. По второму датчику результаты те же самые, но с той лишь разницей, что по амплитуде в два паза меньше (точное значение в 1.998 раза) из-за разности расположения датчиков по высоте.



**Рис. 2.** Гравитационные пульсации в апреле 2021 года на станциях BFO а – графики изменения силы тяжести (кривая 1) и ее вертикального градиента (кривая 2) на станции BFO (Шварцвальд, Германия); б – графики изменений температуры (кривая 1) и атмосферного давления (кривая 2); с – график изменения силы тяжести на станции ARTI (Екатеринбург, Россия); d – обозначения, показанные на рис. 2, б.

[Fig. 2. Gravitational pulsations in April 2021 at BFO stations (a) – graphs of gravity (curve 1) and its vertical gradient (curve 2) variance at the BFO station (Black Forest, Germany); (b) – graphs of temperature (curve 1) and atmospheric pressure (curve 2) variance; (c) – graph of gravity variance at the ARTI station (Ekaterinburg, Russia); (d) – designations shown in Fig. 2b.]

Теперь перейдем к обработке сейсмологических колебаний (рис. 2, b, d). На рис. 2, b представлены графики исходных сейсмологических колебаний (кривая 2) и остаточной аномалии колебаний после обработки с использованием лунно-солнечных вариаций силы тяжести [5] (кривая 1). На рис. 2, d представлены остаточные сейсмические аномалии, полученные с помощью метода осреднения (кривая 1) и с использованием методики из [5] (кривая 2). Совпадение остаточных аномалий не только сейсмологических, но и гравитационных полное. Факт этот чрезвычайно интересен и требует тщательного изучения.

Попытаемся оценить погрешность выделения локальной и региональной составляющих при осреднении. Ранее [4] было отмечено, что локальная часть сейсмогравитационных возмущений имеет частоту

колебаний порядка 5–10 Нз. Значит при интервале осреднения более 1 мин среднее значение локальной части будет близким к нулю [3]. Таким образом остается оценить влияние осреднения на региональную составляющую сейсмогравитационных возмущений, которая связана с влиянием Луны и Солнца. Для гравиметрических колебаний это сделать легко. Так как региональная часть преимущественно представлена лунно-солнечными вариациями силы тяжести, то воспользуемся расчетами по Тиммену [12]. На рис. 3 приведены в качестве примера кривые лунно-солнечных вариаций силы тяжести со станции BFO для первой декады каждого квартала за 2021 г. Вариации были осреднены на интервалах 2 и 5 мин и определена разность между исходными и осредненными значениями (рис. 4). Разность не велика – менее 0.01 миллигала.

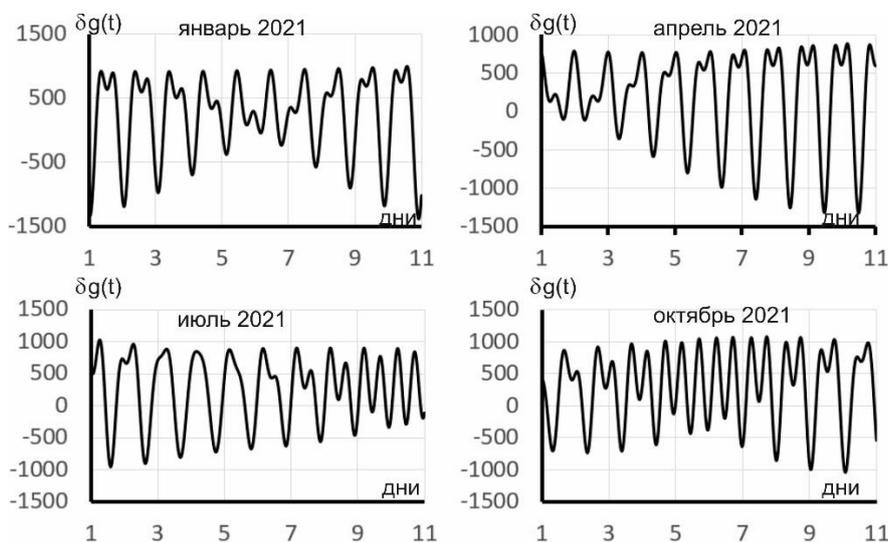


Рис. 3. Характер изменения вариаций силы тяжести в 2021 году на станции BFO.  
[Fig. 3. Patterns of gravity variations in 2021 at BFO station.]

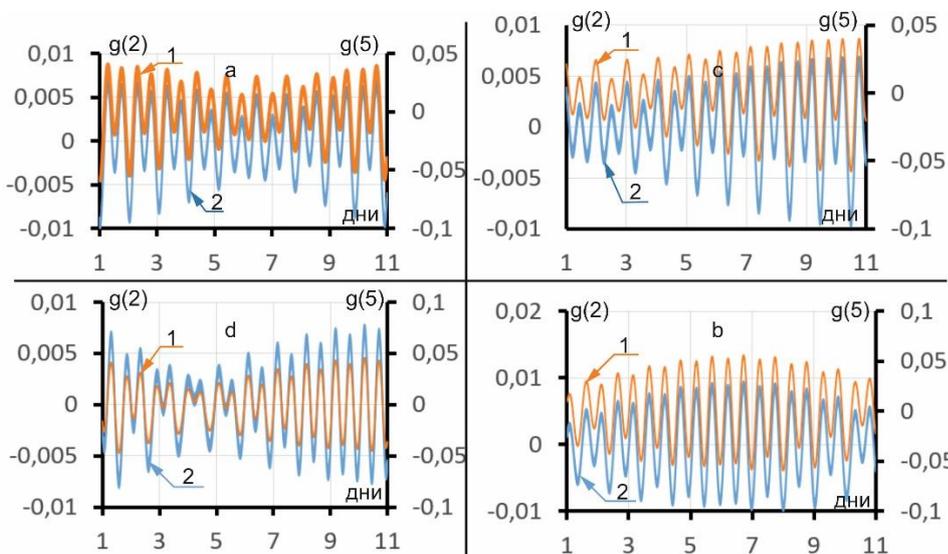
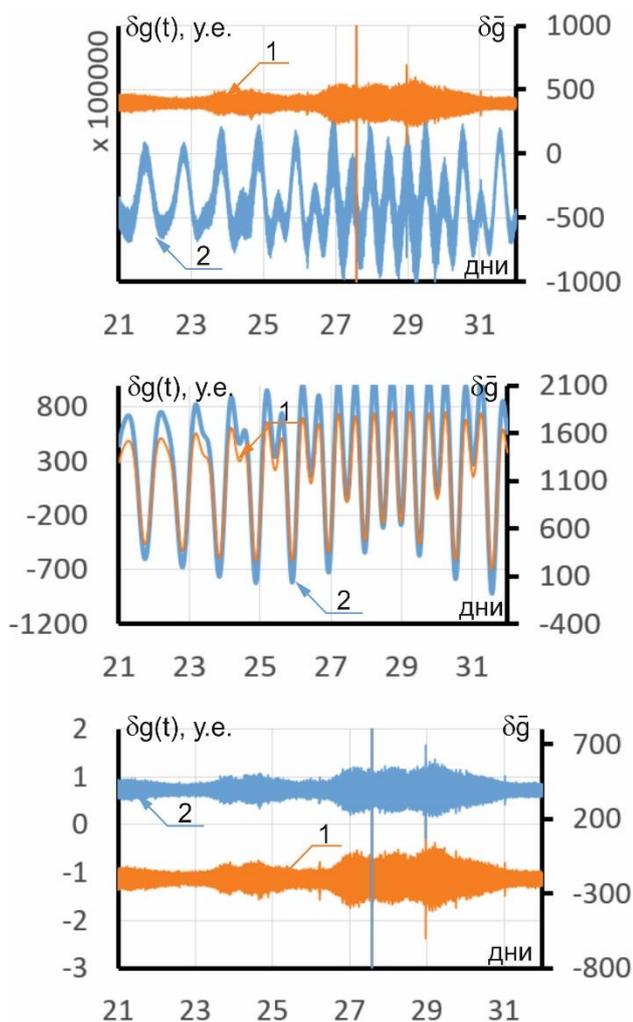


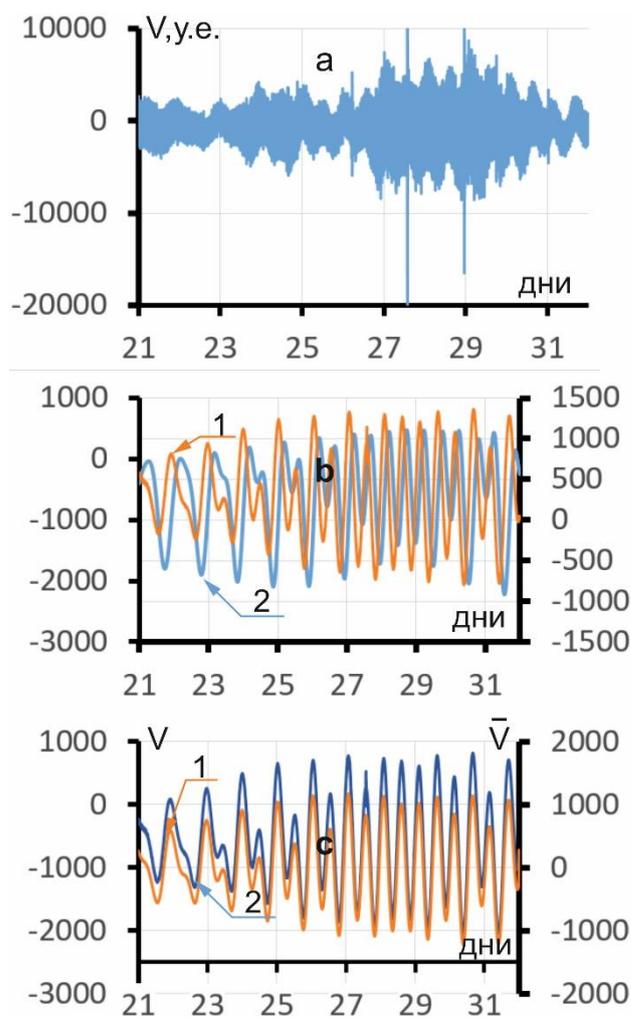
Рис. 4. Погрешность осреднения данных лунно-солнечного притяжения в зависимости от интервала осреднения.  
[Fig. 4. Averaging error of lunisolar attraction data depending on the averaging interval.]

Опробуем на конкретных наблюдениях (рис. 5). На рис. 5, а даны наблюдаемые значения силы тяжести (кривая 2) и вертикального градиента (кривая 1), а на рис. 5, б приведены значения вариаций силы тяжести, вычисленных по [12] (кривая 1) и с помощью осреднения (кривая 2). Кривые полностью совпадают между собой и с кривой вертикального градиента. Ниже (рис. 5, с) приводятся кривые лунно-солнечных вариаций

(кривая 2) и осредненных значений силы тяжести (кривая 1), что лишний раз подтверждает эффективность метода осреднения. Что же касается результатов сейсмических колебаний, то они приведены на рис. 6. Региональная составляющая (влияние Луны и Солнца) вычислена с помощью [5] (рис. 6, б, кривая 1) сравнивается с расчетными значениями силы тяжести от Луны и Солнца [12] (рис. 6, б, кривая 2). Кривые сдвинуты по



**Рис. 5.** Распределение измерений силы тяжести на станции ВФО в марте 2021 года: а – график вертикального градиента силы тяжести (кривая 1) и график наблюдаемых значений силы тяжести (кривая 2), б – график силы тяжести Луны и Солнца по Тиммену [12] (кривая 1) и осредненный график силы тяжести Луны и Солнца (кривая 2), с – график силы тяжести после исключения притяжения Луны и Солнца (кривая 1), и график осредненных измерений силы тяжести (кривая 2).  
**[Fig. 5.** Distribution of gravity measurements at BFO station in March 2021: (a) – graph of vertical gravity gradient (curve 1) and graph of observed gravity values (curve 2), (b) – graph of gravity of the Moon and the Sun according to Timmen [12] (curve 1) and graph of the average gravity of the Moon and the Sun (curve 2), (c) – graph of gravity after excluding the attraction of the Moon and the Sun (curve 1), and graph of averaged gravity measurements (curve 2).]

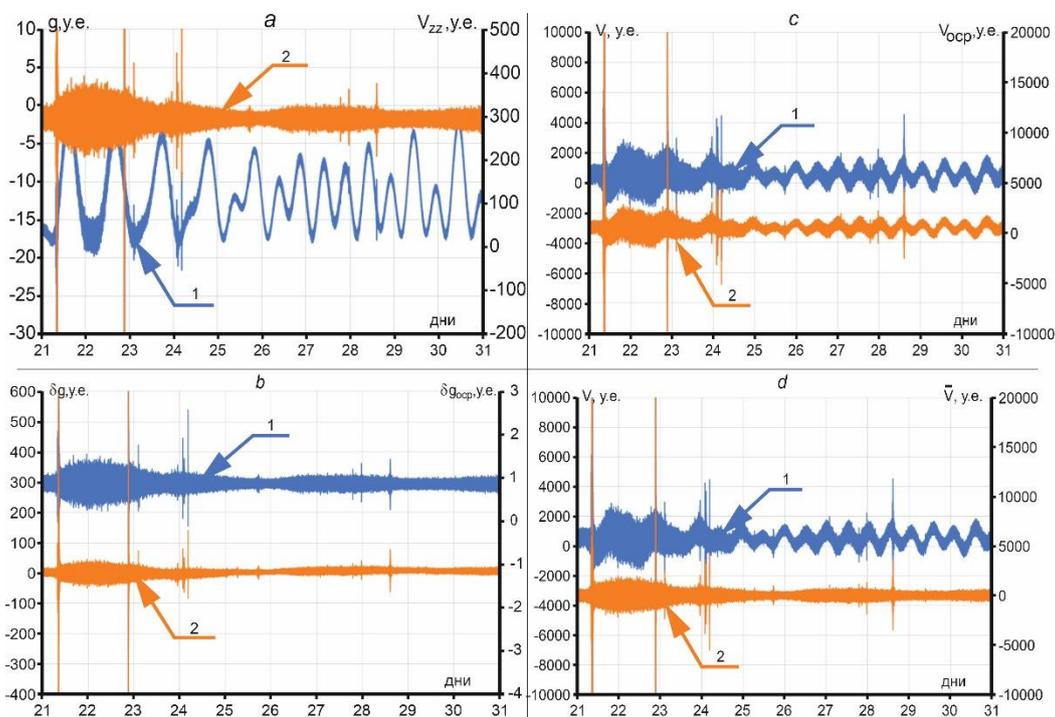


**Рис. 6.** Изменения лунно-солнечной гравитации в марте 2021 года на станции ВФО . а – график сейсмических колебаний, б – график силы тяжести Луны и Солнца по Тиммену [12] (кривая 1) и график влияния Луны и Солнца на сейсмические колебания, полученный с помощью градиента  $dg/dt$  (кривая 2), с – график влияния Луны и Солнца на сейсмические колебания, полученный с помощью градиента  $dg/dt$  (кривая 2) и график осредненных сейсмических колебаний с двухминутным параметром (кривая 1).  
**[Fig. 6.** Changes of lunisolar gravity in March 2021 at BFO station . (a) – seismic oscillations graph, (b) – gravity graph of Moon and Sun according to Timmen [12] (curve 1) and graph of influence of the Moon and Sun on seismic vibrations, obtained using  $dg/dt$  gradient (curve 2), (c) – graph of influence of the Moon and Sun on seismic vibrations, obtained using the  $dg/dt$  gradient (curve 2) and graph of averaged seismic vibrations with a two-minute parameter (curve 1).]

фазе относительно друг друга, что полностью объясняется размерностью кривых [5]. А вот сравнение кривой 1 на рис. 6, b, полученной с помощью градиента  $dg/dt$ , дает полное совпадение с осредненной кривой на рис. 6, c, что дает полное обоснование применения. Добавим, что сравнение региональных частей предпочтительнее и наглядней, чем сравнение локальных частей (пульсаций), о чем подробно изложено в [5].

В конце приведем еще один пример сравнения обработки по методике, изложенной в [5], и с помощью метода осреднения (рис. 7). На рис. 7, a даны графики значений силы тяжести по одному из датчиков и вертикального градиента силы тяжести. А на рис. 7, b приведены значения силы тяжести, полученные с помощью методики из [12] (кривая 1) и осреднением

(кривая 2). Кривые 1 и 2 совпадают между собой полностью и к тому же по морфологии совпадают с вертикальным градиентом силы тяжести. Что же касается сейсмических колебаний, то здесь дело обстоит несколько сложнее. На рис. 7, c, d (кривые 1) даны измерения сейсмических колебаний, а на рис. 7, c, d (кривые 2) даны исправленные колебания соответственно за счет использования градиента  $dg/dt$  [5] и метода осреднения. Если при использовании осреднения (рис. 7, d, кривая 2) остаточная аномалия по форме похожа на кривую 2 (рис. 7, b), в то же время кривая 2 (рис. 7, c), выполненная по методике из [5] тоже сглажена (не всегда), но все же остаются длиннопериодные колебания. Данный вопрос требует дополнительного исследования.



**Рис. 7.** Распределение измерений грависейсмических данных на станциях ВФО в апреле 2021 г: *a* – измеренные значения силы тяжести (кривая 1) и вертикальный градиент (кривая 2), *b* – значения силы тяжести с учетом Луны и Солнца [12] (кривая 1) и осреднения (кривая 2), *c, d* – пульсации сейсмического поля после учета изменений лунно-солнечной гравитации осреднения соответственно (кривые 2).

**[Fig. 7.** Distribution of gravity seismic data measurements at BFO stations in April 2021: (*a*) – measured gravity values (curve 1) and vertical gradient (curve 2), (*b*) – gravity values taking into account the Moon and the Sun [12] (curve 1) and averaging (curve 2), (*c, d*) – pulsations of the seismic field after taking into account changes in lunar-solar gravity averaging, respectively (curves 2).]

### Заключение

Использование метода осреднения при интерпретации грависейсмических колебаний в значительной степени упрощает обработку при сохранении необходимой точности выделения влияния Луны и Солнца. Особенно эффективным использование метода осреднения будет при обработке сейсмологических колебаний.

*Конфликт интересов.* Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов Ю. В. Разделение неприливных вариаций силы тяжести на основе спектрального анализа и метода осреднения // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2016. № 2. С. 100–106.
2. Антонов Ю. В., Антонова И. Ю. Сравнение приливных вариаций силы тяжести и вертикальной составляющей сейсмографа // *Геофизика*. 2013. № 2. С. 27–31.
3. Антонов Ю. В. Физическое истолкование некоторых трансформаций потенциальных полей // *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*. 1979. № 2. С. 64–82
4. Антонов Ю. В., Антонова И. Ю. Сейсмогравитационные пульсации на Евразийском континенте // *Геология и*

разведка. Изв. ВУЗ. 2019. № 1. С. 61–66.

5. Антонов Ю. В. О возможном влиянии Луны и Солнца на сейсмогравиметрические измерения // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2023. № 1. С. 89–96.

6. Антонов Ю. В. Высокочастотные колебания неприливных сейсмо-гравитационных пульсаций // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2022. № 3. С. 59–66.

7. Антонов Ю. В. Пульсации неприливных вариаций силы тяжести. // *Изв. ВУЗов. Геол. и разведка*. 2014. № 5. С. 54–57.

8. Антонов Ю. В., Сизаск И. А. Синхронные пульсации в неприливных вариациях гравитационного и сейсмического

полей // *Геология и разведка. Изв. ВУЗ*. 2015. № 5. С. 46–52.

9. Дикий Л. А. Теория колебаний земной атмосферы Л.: Гидрометеоздат, 1969. 195 с.

10. Абрамов Д. В., Бебнев А. С., Бычков С. Г., Горожанцев С. В., Герман В. И., Дробышев М. Н., Конешов В. Н., Красилов С. А., Овчаренко А. В., Юшкин В. Д. Одна из возможных причин синхронных континентальных микросейсм северной Евразии // *Физика Земли*. 2020. № 4. С. 123–131

11. Монахов Ф. И. Низкочастотный сейсмический шум Земли. М., Наука. 1997. 96 с.

12. Timmen L.H.-G. Wenzel Worldwide synthetic gravity tide parameters available on Internet // *Bulletin d'information-Bureau gravimétrique international*. 1994. Vol. 75. P. 32–40

## BRIEF REPORTS

UDC: 550.831 + 550.348

ISSN 1609-0691

DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/4/122–128>

Received: 10.10.2023

Accepted: 12.12.2023

Published online: 25.12.2023

### The lunar-solar influence to be considered in graviseismic oscillations of the Earth using averaging

©2023 Yu. V. Antonov<sup>✉</sup>, I. Yu. Antonova

*Voronezh State University, Universitetskaya pl., 1, 394018, Voronezh, Russian Federation*

#### Abstract

*Introduction:* Movements of the Moon and Sun deform the Earth and atmosphere, resulting in the appearance of gravitational and seismic fluctuations with a period close to daily.

*Methodology:* For practical purposes, it is often necessary to isolate the local part of the change in seismic and gravitational fields, i.e. exclude influence from physical measurements of the Moon and Sun. The issue measuring gravity was resolved a long time ago.

*Results and discussion:* To separate the attraction of the Moon and the Sun from pulsations, you can use the averaging method. The ripple periods are one or two orders of magnitude smaller. Then averaging with a small interval will practically not change the lunar-solar variations, but will almost reduce the influence of pulsations to zero

*Conclusions:* The averaging method can be used for seismic fluctuations in order to separate the attraction of the Moon and the Sun from the pulsations, due to the large difference in the oscillation periods between the pulsations of the Sun and the Moon.

**Keywords:** pulsations of gravity and seismic field, lunisolar variations of gravity; coronal mass ejections; meteor showers, averaging method.

*For citation:* Antonov Yu. V., Antonova I. Yu. The lunar-solar influence to be considered in graviseismic oscillations of the Earth using averaging // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2023, no. 4, pp. 122–128. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/4/122–128>

*Conflict of interests:* The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

<sup>✉</sup> Yury V. Antonov, e-mail: [yuriyantov@yandex.ru](mailto:yuriyantov@yandex.ru)

REFERENCE

1. Antonov Yu. V. Razdelenie neprilivnykh variatsii sily tyazhesti na osnove spektral'nogo analiza i metoda osredneniya [Separation of nontidal gravity variations based on spectral analysis and averaging method]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2016, no. 2, pp. 100–106 (In Russ.)
2. Antonov Y. V., Antonova I. Yu. Sravnenie prilivnykh variatsiy sily tjazhesti i vertikalnoy. Sostavlyayutshey seismografa [Comparison of tidal variations of gravity and vertical component of the seismograph]. *Geofizika – Geophysics*, 2016, no. 2, pp. 27–31 (In Russ.)
3. Antonov Yu. V. Fizicheskoe istolkovanie nekotorykh transformatsiy potencialnykh polej [Physical interpretation of some transformations of potential fields]. *Izv. AN SSSR; Fizika Zemli – Izv. of the USSR Academy of Sciences. Ser. Physics of the Earth*, 1979, no. 2, pp. 64–82 (In Russ.)
4. Antonov Yu. V., Antonova I. Yu. Seismo-gravitatsionnye pulsatsii na Evraziyskom kontinente [Seismic and gravitational pulsations on the Eurasian continent]. *Izv. VUZov. Geologiya i razvedka – Izv. universities. Geology and exploration*, 2019, no. 1, pp. 61–66 (In Russ.)
5. Antonov Yu. V., Antonova I. Yu. O vozmozhnom vliyanii Luny i Solntsa na seismograficheskoye izmereniye [On the possible influence of the Moon and the Sun on seismic and gravimetric measurements]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2023, no. 1, pp. 89–96 (In Russ.)
6. Antonov Yu. V. Pul'satsii neprilivnykh seismo-gravitatsionnykh variatsiy i vozmozhnye prichiny ih vozniknoveniya [Non-tidal variations of seismic-induced gravitational pulsations and their possible causes]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2022, no. 3, pp. 59–66 (In Russ.)
7. Antonov Yu. V. Pul'satsii neprilivnykh variatsii sily tyazhesti [Pulsations of non-tidal variations in gravity]. *Izv. VUZov. Geologiya i razvedka – Izv. universities. Geology and exploration*, 2014, no. 5, pp. 54–57 (In Russ.)
8. Antonov Y. V., Sizask I. A. Sinkhronnye pulsatsii v neprilivnykh variatsiyakh gravitatsionnogo i seismicheskogo polej [Synchronous pulsations in non-tidal variations of gravitational and seismic fields]. *Izv. VUZ. Geologiya i razvedka – Geology and Exploration. Izv. University*, no. 5, pp. 46–52 (In Russ.)
9. Dikiy L. A. *Teoriya kolebaniy zemnoy atmosfery* [Theory of oscillations of Earth's atmosphere]. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1969, 195 p. (In Russ.)
10. Abramov D. V., Bebnov A. S., Bychkov S. G., Gorozhancev S. V., German V. I., Drobyshev M. N., Koneshov V. N., Krasilov S. A., Ovcharenko A. V., Jushkin V. D. Odnazh iz vozmozhnykh prichin sinkhronnykh kontinental'nykh mikrozejsm severnoj Evrazii [One Probable Cause of Synchronous Continental Microseisms in Northern Eurasia]. *Fizika Zemli – Physics of the Earth*, 2020, no. 4, pp. 123–131 (In Russ.)
11. Monakhov F. I. *Nizkochastotnyj seismicheskij shum Zemli* [Low-frequency seismic Earth noise.]. Moscow, Nauka publ., 1997, 96 p. (In Russ.)
12. Timmen L.H.-G. Wenzel Worldwide synthetic gravity tide parameters available on Internet // *Bulletin d'information-Bureau gravimétrique international*, 1994, vol. 75, pp. 32–40

Антонов Юрий Васильевич, д.т.н., профессор, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: yuriyantonov@yandex.ru; ORCID 0000-0002-3323-9697

Антонова Ирина Юрьевна, преподаватель, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: antonovaiu@yandex.ru; ORCID 0000-0001-5851-3122

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Yury V. Antonov, Dr. habil. In Techn., Professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: yuriyantonov@yandex.ru; ORCID 0000-0002-3323-9697

Irina Yu. Antonova, Lecturer, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: antonovaiu@yandex.ru; ORCID 0000-0001-5851-3122

Authors have read and approved the final manuscript.