

## О возможном влиянии Луны и Солнца на сейсмо-гравиметрические измерения

©2023 Ю. В. Антонов<sup>✉</sup>, И. Ю. Антонова

Воронежский государственный университет, Университетская пл., 1,  
Воронеж, 394018, Воронеж, Российская Федерация

### Аннотация

*Введение:* В гравиметрах и сейсмографах используется в качестве датчика маятник Голицына, что позволяет более полноценно интерпретировать сейсмо-гравиметрические измерения. Для выделения пульсаций основные трудности возникают при учете лунно-солнечных вариаций силы тяжести. Поскольку пульсации носят глобальный характер, то были взяты сейсмо-гравиметрические наблюдения в разных пунктах земного шара (в Канаде (FFC), Шварцвальде в Германии и Артив России).

*Методика обработки:* Исследования по выделению пульсаций сейсмических колебаний показали, что сейсмические колебания тесно связаны лунно-солнечными вариациями силы тяжести. Было высказано предположение о влиянии Луны и Солнца на сейсмические колебания. Движения Луны и Солнца деформируют Землю и атмосферу, в результате чего возникают сейсмические колебания. Предложена методика учета влияния Луны и Солнца на сейсмические колебания Земли.

*Обсуждение результатов:* Опробование методики учета влияния Луны и Солнца на сейсмические колебания проведено параллельно на станциях ВФО и Арти. Были обработаны сейсмические измерения за 2021 г. Обработанные данные, судя по морфологии пульсаций сейсмических колебаний, показали лучшее совпадение между обеими станциями.

*Заключение:* Показано, что Луна и Солнце оказывают влияние на сейсмические колебания Земли.

**Ключевые слова:** пульсации силы тяжести и сейсмического поля, лунно-солнечные вариации силы тяжести, корональные выбросы масс, метеорные потоки.

*Для цитирования:* Антонов Ю. В., Антонова И. Ю. О возможном влиянии Луны и Солнца на сейсмо-гравиметрические измерения // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2023. № 1. С. 89-96. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/1/89-96>

### Введение

В предлагаемой статье рассмотрим характер соотношения между вариациями силы тяжести и сейсмических колебаний. Это было ранее рассмотрено для измерений гравиметра и вертикальной составляющей сейсмографа [1]. Сравнение приборов показано на примере записей лунно-солнечных вариаций силы тяжести [1–8]. Неприливные вариации силы тяжести возникают не только за счет колебаний земной атмосферы после ударов по ней метеорных

потоков. Сюда же можно присоединить корональные выбросы масс, которые после взрывов на Солнце бьют по Земле и ее атмосфере, атмосферные фронты, внутренние гравитационные волны и т.д. [1–11].

Измерения гравитационного поля и сейсмических колебаний раньше производились с помощью маятника Голицына. Складывается впечатление, что изменение гравитационного поля во времени вызывает за собой возникновение сейсмических колебаний



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

---

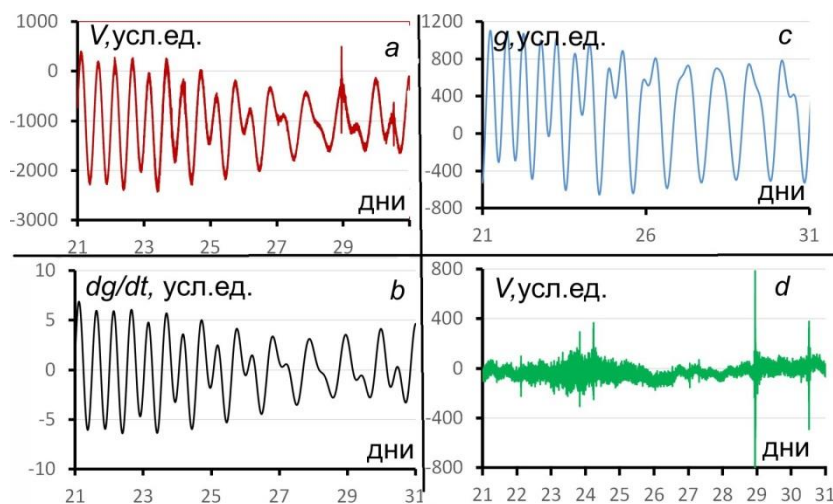
<sup>✉</sup> Антонов Юрий Васильевич, e-mail: [yuriyantov@yandex.ru](mailto:yuriyantov@yandex.ru)

с тем же периодом. Сейсмическое поле является как бы производной по времени от гравитационного [1], что не всегда верно. Действительно, если сила тяжести не меняется, то сейсмические колебания отсутствуют. И наоборот, если не имеется землетрясений, взрывов, выбросов корональных масс и т.д., то не возникает дополнительных изменений силы тяжести. 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 сейсмо-гравитационные колебания.

### Методика обработки

Причины, вызывающие колебания атмосферы, весьма различны: от погодных до космических [1–11]. Движения Луны и Солнца создают гравитационные поля, которые изменяют форму Земли и атмосферы одновременно. Деформация их соответственно воз-

действует на сейсмические колебания, и гравитационное поле. Что же касается силы тяжести, то с помощью программы [12] легко исключаем влияние Луны и Солнца. Для примера рассмотрим так называемые сейсмо-гравитационные измерения в Канаде на станции FFC (рис. 1). Ранее [1–4] уже приводились результаты выделения и интерпретации сейсмо-гравитационных пульсаций. 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 мкм/см<sup>2</sup>, 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 мкм/см<sup>2</sup>. Указанные особенности надо учитывать при обработке материалов.



**Рис. 1.** Сравнение вариаций лунно-солнечной гравитации с сейсмическими данными обсерватории FFC (Канада, март 2019 г.): *a* – сейсмическая запись; *b* – вариации лунно-солнечной гравитации; *c* – градиент вариаций лунно-солнечной гравитации; *d* – пульсация сейсмического поля.

**[Fig. 1.** Comparison of lunar-solar gravity variations with seismic data at the FFC Observatory (Canada, March 2019): *(a)* – seismic record; *(b)* – variations of lunar-solar gravity; *(c)* – gradient of lunar-solar gravity variations; *(d)* – pulsation of the seismic field.]

Метеорные потоки и другие внешние источники ударяют по земной атмосфере, которая начинает колебаться. Плотность потока меняется во времени, поэтому амплитуды колебаний сейсмического и гравитационного полей тоже меняются. Трудно представить, что влияние прибрежных ударов волн будут иметь такие амплитуды, учитывая коэффициент затухания земной коры, упругие параметры которой достаточно хорошо известны и изучены [10]. Но при всем этом забывают, что Луна и Солнце деформируют не только атмосферу, но и Землю.

Еще одним неудобством является представление измерений в банках хранения без указания цены деления приборов. Для силы тяжести этот вопрос решается следующим образом. На участках, где нет пульсаций и землетрясений, можно сравнить наблюдаемые и расчетные значения лунно-солнечных вариаций [12]. Коэффициент соотношения между ними достаточно стабилен. Но лучше всего использовать метод осреднения.

$$\delta g(t) = \text{гизм}(t) - \sum_{(-n)^n} \llbracket \text{гизм}(t) \rrbracket \quad (1),$$

где  $\delta g(t)$  – остаточная вариация силы тяжести после осреднения;  $\sum_{(-n)^n} \llbracket \text{гизм}(t) \rrbracket$  – среднее значение вариации на интервале осреднения  $(-n, n)$ . Интервал осреднения составляет несколько минут (1–5). Среднее значение остаточной вариации силы тяжести на таких интервалах осреднения практически не изменяет лунно-солнечную вариацию, а пульсация при наличии периода колебаний в 5–10 секунд полностью исчезают. Использование метода осреднения намного упрощает методику обработки. Данное утверждение проверено на очень большом объеме измерений. Кроме того, с исключением лунно-солнечных вариаций также исключается влияние атмосферного давления и температуры.

С обработкой сейсмических данных дело обстоит несколько сложнее, чем с гравиметрическими данными. Как уже отмечалось выше, сила тяжести и сейсмические наблюдения между собой соотносятся как первообразная – производная [1]. Изменение сейсмического поля во времени можно представить в виде

$$V_{\text{изм}}(t) = V_{\text{лсв}}(t) + V_{\text{нп}}(t) + C, \quad (2)$$

где  $V_{\text{изм}}(t)$  – измеренные значения сейсмических данных;  $V_{\text{лсв}}(t)$  – значения сейсмических колебаний за счет влияния градиента лунно-солнечных вариаций силы тяжести;  $V_{\text{нп}}(t)$  – неприливая сейсмическая пульсация;  $C$  = постоянная.

Температура, которая приведена в базе данных, на сейсмические колебания и гравиметрические измерения практически не влияет [4–8]. Это связано с тем, что дневная температура воздуха измеряется на высоте нескольких метров от поверхности Земли.

Исследуем более подробно корреляцию сейсмических колебаний с лунно-солнечными вариациями силы тяжести. На рис. 1а, 1с представлены исходные сейсмические измерения и лунно-солнечные вариации силы тяжести. Изменения силы тяжести во времени рассчитаны с помощью формул [12]. Как видим, совпадения форм сейсмических колебаний и вариаций силы тяжести не наблюдается (рис. 1а, 1с). А вот градиент вариаций силы тяжести (рис. 1б) по морфологии полностью повторяет с сейсмические колебания (рис. 1а). После такого совпадения легко можно найти поправки за влияние Луны и Солнца. Практическим путем можно подобрать для любого сейсмографа переходной коэффициент  $K$  для перевода значений вариаций силы тяжести в сейсмические данные.

$$\Delta V(t) = V_{\text{изм}}(t) - K * (\delta g_{\text{лсв}}(t)/\delta t) \sim V_{\text{изм}}(t) - K * (g_{\text{лсв}}(t+1) - g_{\text{лсв}}(t)) \quad (3),$$

где  $\Delta V(t)$  – остаточная сейсмическая вариация;  $\delta g_{\text{лсв}}(t)/\delta t$  и  $(g_{\text{лсв}}(t+1) - g_{\text{лсв}}(t))$  – соответственно градиент лунно-солнечных вариаций силы тяжести и его численный аналог. Меняя величину коэффициента  $K$  легко получить оптимальный результат [1]

Остановимся подробно на корреляционном совпадении градиента  $\delta g_{\text{лсв}}(t)/\delta t$  и сейсмических колебаний  $V_{\text{изм}}(t)$ . Складывается вначале впечатление, что сейсмические колебания являются производной от лунно-солнечных вариаций силы тяжести, что отмечалось выше. Но размерность сейсмических колебаний  $V_{\text{изм}}(t)$  равна см/с, а размерность градиента силы тяжести  $\delta g_{\text{лсв}}(t)/\delta t$  – см/с<sup>3</sup>. Поэтому выше использован термин “корреляционное совпадение”. Здесь, наверное, с физической точки зрения более уместно говорить о действии Луны и Солнца на сейсмические колебания, чем о вариациях силы тяжести. Практически имеем дело с измерениями силы тяжести. Попробуем использовать для практических целей. Морфологическое совпадение кривых градиента силы тяжести и сейсмического поля указывает на связь между ними. Следовательно, можно найти соответствующий коэффициент и внести поправки в сейсмическое поле. На рис. 1д показано сейсмическое поле после внесения поправок (рис. 1д).

### Обсуждение результатов

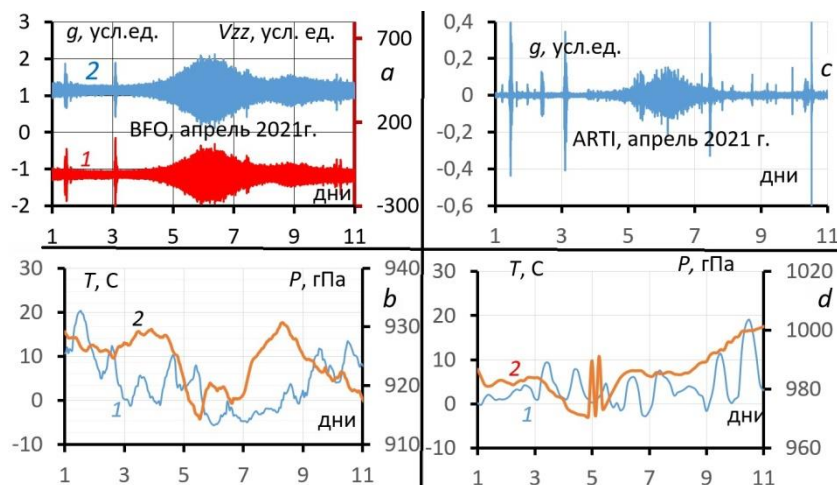
Более подробно рассмотрим соотношение сейсмических и гравитационных пульсаций в различных

пунктах Евразии. Были взяты гравиметрические и сейсмические наблюдения со станций ВФО (Шварцвальд, Германия) и Арти (Свердловская область). На станциях Арти и ВФО для измерения используется сила тяжести прибор LaCoste & Romberg. На станции ВФО дополнительно ведутся измерения на двухсферном сверхпроводящем гравиметре (GWR Dual Sphere Superconducting Gravimeter). Так как измерения на станциях Арти и ВФО с прибором LaCoste & Romberg достаточно близки между собой, то с ВФО были взяты данные для двухсферного гравиметра. Дискретность наблюдений для одного и другого приборов 1 секунда.

Рассмотрим поведение графиков силы тяжести на обеих станциях в первой декаде апреля 2021 г. (рис. 2а, 2с). Пульсации гравитационного поля очень четко выделяются как в ВФО, так и в Арти. Дополнительно на рис. 2а приведен график измерений вертикального градиента силы тяжести, который измеряется на ВФО и по морфологии повторяет график силы тяжести. Забегая вперед, отметим, что во всех трансформациях вертикальный градиент ведет себя также, как и сила тяжести, поэтому далее на градиенте почти не будем останавливаться. Ниже приведены графики температуры и атмосферного давления (рис. 2б, 2с). На территории Шварцвальда пульсация силы тяжести четко совпадает с понижением давления и непогодой. Наоборот, в Арти падение давления отмечается перед пульсацией гравитационного поля. Из-за указанного обстоятельства следует, что, пульсация связана именно с ударом метеорного потока [8–9]. Что же касается изменений температуры то, температура не является объективным показателем. Температура отражает из-за специфики измерений состояние только нижних слоев атмосферы, а они практически не позволяют оценивать изменения силы тяжести.

А теперь рассмотрим поведение сейсмического поля для этих же станций. Исходные данные сейсмического поля представлены на рисунках 3 и 4. Ниже эти же пульсации (рис. 4), обработанные с учетом лунно-солнечных вариаций силы тяжести. Отметим, что после учета влияния лунно-солнечных вариаций графики сейсмического поля становятся более гладкими. Графики частот сейсмического шума для Шварцвальда и Арти практически одинаковы с графиками частот для пульсаций силы тяжести и меняются в пределах 0.13 – 0.10 Гц [2]. На рис. 3а приведены значения силы тяжести и сейсмического шума (рис. 3а). Заметен сдвиг по фазе между кривыми  $g$  и  $V$ , так как здесь у нас разные размерности.

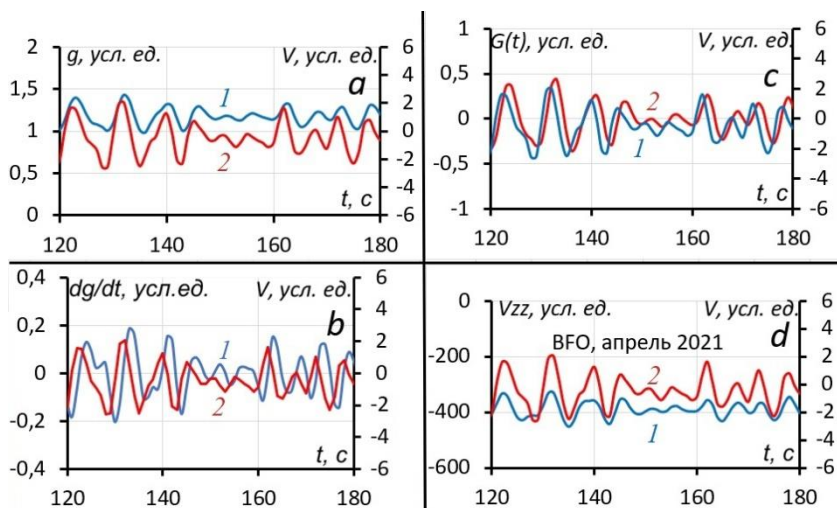
Графики производной от силы тяжести  $dg/dt$  и сейсмического поля  $V$  (рис. 3б) совпадают между собой, хотя размерности у них тоже разные. Дело в том, что вариации силы тяжести описываются  $\sin(t)$ ,  $\cos(t)$ -оидальной зависимостью. После дифференцирования синус – косинус переходят косинус – синус, поэтому сдвига фаз между сейсмическим полем и силой тяжести не должно быть. Естественно, возникает вопрос: а почему бы не воспользоваться интегрированием силы тяжести  $G(t) = \int g(t) dt$ , тогда размерности  $G(t)$  и



(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.]

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

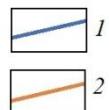
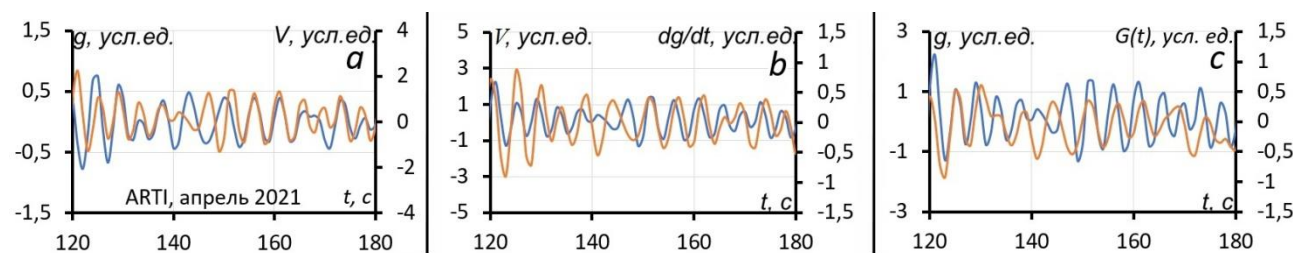
[Fig. 2. Gravitational pulsations in April 2021 at BFO and Arti stations: (a) – graphs of gravity (curve 1) and its vertical gradient (curve 2) variance at the BFO station (Black Forest, Germany);



1) and seismic measurements (curve 2); (c) – graphs for calculating the integral of the gravitational (curve 1) and seismic (curve 2) fields; (d) – graphs of measurements of the derivative of gravity (curve 1) of seismic measurements (curve 2).]

**Рис. 3.** Сравнение сейсмических и гравиметрических измерений на станции BFO: *a* – графики сейсмических (кривая 1) и гравиметрических (кривая 2) полей; *b* – графики расчета производной силы тяжести (кривая 1) и сейсмических измерений (кривая 2); *c* – графики расчета интеграла гравитационного (кривая 1) и сейсмического (кривая 2) поля; *d* – графики измерений производной силы тяжести (кривая 1) сейсмических измерений (кривая 2).

[Fig. 3. Comparison of seismic and gravity measurements at the BFO station: (a) – graphs of seismic (curve 1) and gravimetric (curve 2) fields; (b) – graphs for calculating the derivative of gravity (curve 1) and seismic measurements (curve 2); (c) – graphs for calculating the integral of the gravitational (curve 1) and seismic (curve 2) fields; (d) – graphs of measurements of the derivative of gravity (curve 1) of seismic measurements (curve 2).]



**Рис. 4.** Сравнение сейсмических и гравиметрических измерений на станции Arti. Обозначения см. рис. 3.

[Fig. 4. Comparison of seismic and gravimetric measurements at the Arti station. The designations are the same as in Fig. 3.]

$V$  будут одинаковыми. Кривые  $G(t)$  и  $V$  представлены на рис. 3с и практически полностью совпадают с кривыми  $dg/dt$  и  $V$  (рис. 3с, 3б). На практике при исправлении сейсмических измерений лучше использовать вариант дифференцирования, так как в этом случае вычисления проще и требуют меньше затрат. Следует отметить, что при дифференцировании и интегрирова-

нии имеется небольшой сдвиг фаз, что существенного влияния на вычислительный процесс не оказывает.

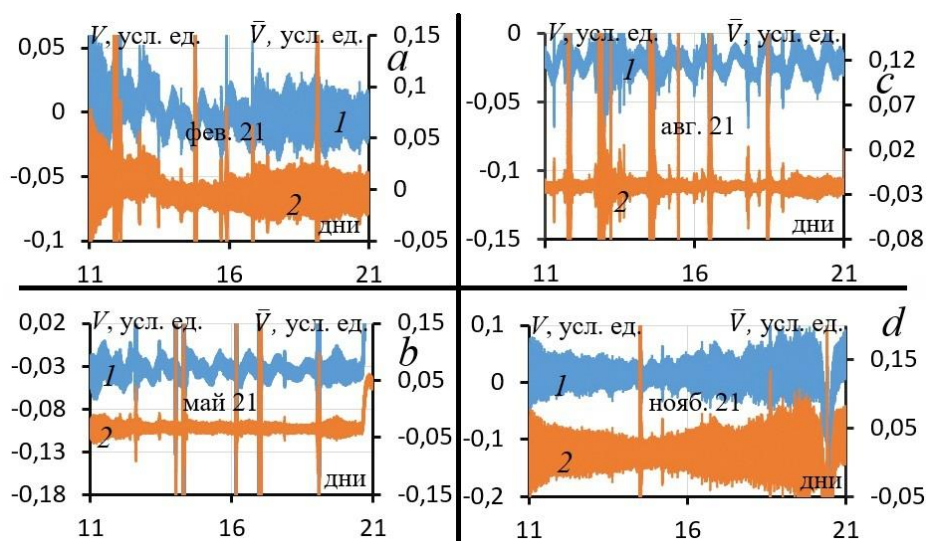
И последний вариант сравнения сейсмических измерений и вертикального градиента силы тяжести (рис. 3д) полностью совпадают между собой. Но вертикальный градиент измеряется только двухсферным гравиметром путем одновременного изме-



рения силы тяжести на двух высотах. Размерность градиента равна  $1/c^2$ .

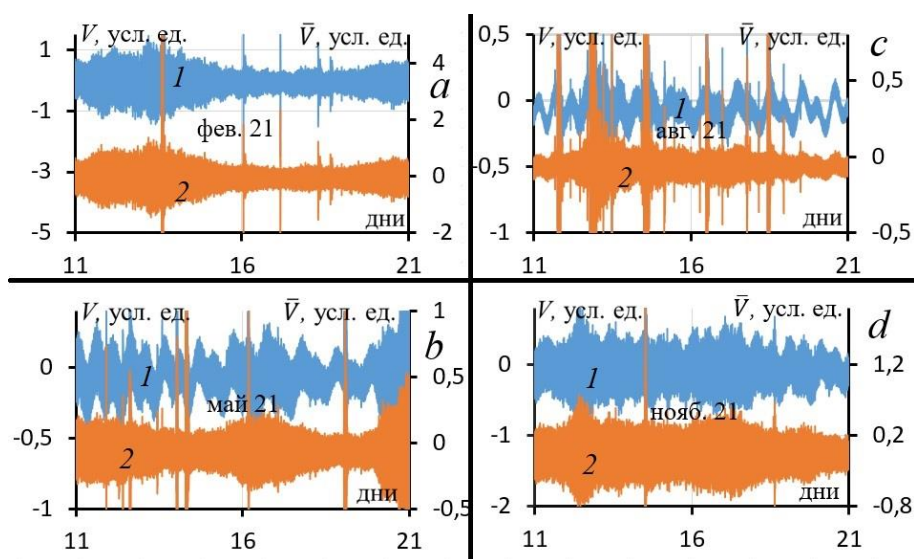
Теперь перейдем к результатам обработки сейсмических данных станции Арти (рис. 4). Сравнение кривых  $G(t)$ ,  $g(t)/dt$  и  $V$  для ВФО и Арти показывает их полное совпадение. По аналогии с вычислениями в Канаде (FFC) (рис. 1d) проведем вычисления на станциях ВФО и Арти по данным на рис. 2. На рисунках 5 и 6 представлены обработанные наблюдения за 2021 г (рис. 5, 6). Наблюдения взяты в середине месяцев (2 декада) февраля, мая, августа и ноября. Видим измеренные сейсмические данные, форма которых напоминает лунно-солнечных вариации силы тяжести которые в свою очередь приведенных

на рисунке 7. Суточные колебания сейсмических данных исчезают. Таким образом, избавляемся от лунно-солнечного воздействия на сейсмическое поле. В заключение приведем еще один пример. Как известно [1–10], сейсмо-гравиметрические пульсации летом меньше по количеству и по амплитуде. На рисунке 8 приведены сейсмические колебания в июле месяце 2021 г в ВФО и в Арти (рис. 8). Сейсмические колебания каких-либо помех практически не содержат. Заметны длинноволновые суточные колебания, связанные с лунно-солнечными вариациями силы тяжести. В результате учета лунно-солнечных вариаций сейсмические кривые практически становятся прямыми (рис. 8b, 8d).



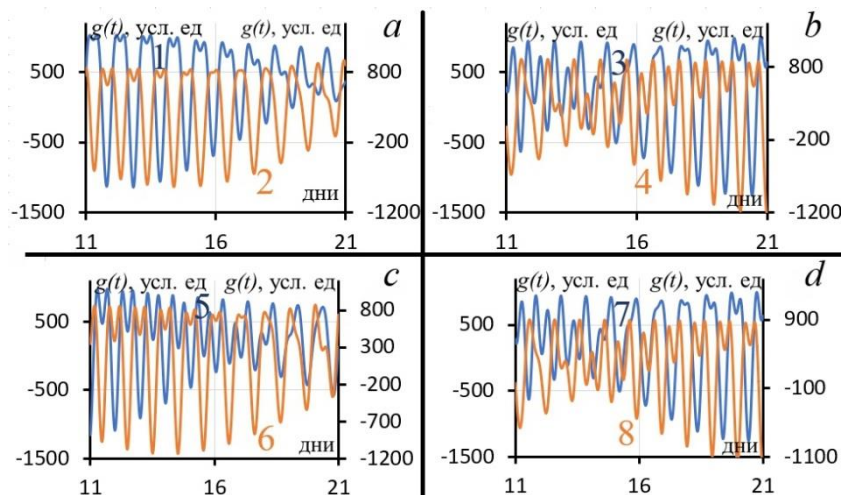
**Рис. 5.** Распределение измерений сейсмических колебаний на станции ВФО (а) в 2021 году до и после учета изменений лунно-солнечной гравитации; 1 – измеренные сейсмические колебания, 2 – скорректированные сейсмические колебания.

[Fig. 5. Distribution of seismic measurements at the BFO station (a) in 2021 before and after taking into account changes in lunar-solar gravity; (1) – measured seismic vibrations, (2) – corrected seismic vibrations.]

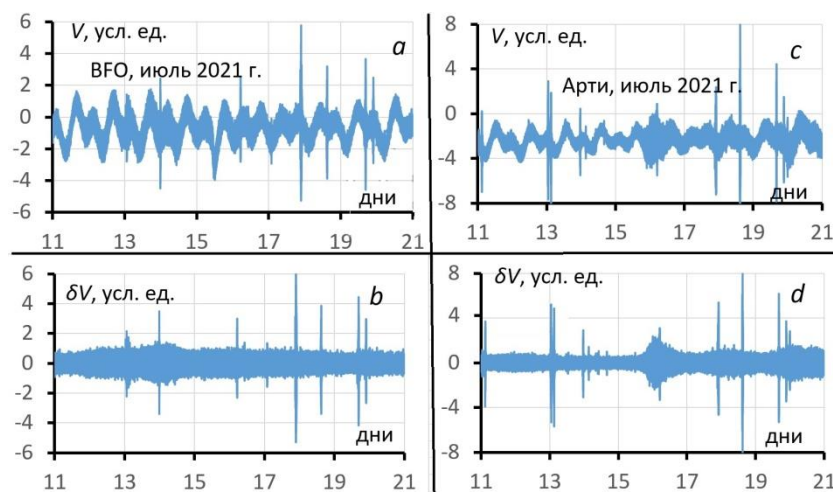


**Рис. 6.** Распределение измерений сейсмических данных по станциям. Обозначения см. рис. 5.

[Fig. 6. Distribution of seismic data measurements according to stations. Designations are the same as in Fig. 5.]



**Рис. 7.** Изменения лунно-солнечной гравитации в 2021 году на станциях BFO и ARTI. Обозначения см. рис. 2.  
**[Fig. 7.** Changes in lunar-solar gravity in 2021 at BFO and ARTI stations. Designations as in Fig. 2.]



**Рис. 8.** Распределение измерений сейсмических данных на станциях BFO (a) и ARTI (c) в июле 2021 г. b, d – пульсации сейсмического поля после учета изменений лунно-солнечной гравитации, соответственно, для BFO (a) и ARTI (c).  
**[Fig. 8.** Distribution of seismic data measurements at BFO (a) and ARTI (c) stations in July 2021 (b, d) – pulsations of the seismic field after taking into account changes in lunar-solar gravity, respectively, for BFO (a) and ARTI (c).]

**Заключение**

Цель данной работы заключается в уточнении характера и, возможно, источника микросейсмических шумов, регистрируемых синхронно приборами, работающими на разных физических принципах. Луна и Солнце оказывают влияние не только на гравиметрические, но и сейсмические измерения.

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

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Антонов Ю. В., Антонова И. Ю. Сравнение приливных вариаций силы тяжести и вертикальной составляющей сейсмографа // *Геофизика*. 2013. № 2. С. 27–30.  
 2. Антонов Ю. В., Антонова И. Ю. Сейсмо-гравитационные пульсации на Евразийском континенте // *Геология и разведка. Изв. ВУЗов*. 2019. № 1. С. 61–66.  
 3. Антонов Ю. В. Пульсации неприливных сейсмогравитационных вариаций и возможные причины их возникновения // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2022. № 1. С. 59–66. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2022.1/9100>  
 4. Антонов Ю. В. Высокочастотные колебания неприливных сейсмо-гравитационных пульсаций // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2022.

№ 3.С. 66–75. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2022/3/66-75>  
 5. Антонов Ю. В. Пульсации неприливных вариаций силы тяжести // *Геология и разведка. Изв. ВУЗов*. 2014. № 5. С. 54–57.  
 6. 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.  
 7. Антонов Ю. В., Антонова И. Ю. Синхронность сейсмогравитационных пульсаций // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2020. № 2.С. 76–82. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2020.2/2861>  
 8. 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.  
 9. Дикий Л. А. Теория колебаний земной атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 194 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., Wenzel H.-G. World wide synthetic gravity deparameter savailable on Internet // *Bulletin d'information-Bureau gravimeter ique international*. 1994. Vol. 75. P. 32–40.

## On the possible influence of the Moon and the Sun on seismic and gravimetric measurements

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

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

### Abstract

**Introduction:** In gravimeters and seismographs, the Golitsyn pendulum is used as a sensor, which allows more complete interpretation of seismic and gravimetric measurements. For identification of pulsations, the main difficulties arise when taking into account lunar-solar variations in gravity. Since the pulsations are global in nature, seismic and gravimetric observations at different points on the globe (in Canada (FFC), the Black Forest in Germany and Artie in Russia) were used.

**Processing method:** The study on the isolation of pulsations of seismic vibrations showed that seismic vibrations are closely related to lunar-solar variations in gravity. The effect of the Moon and the Sun on seismic vibrations was proposed. The motion of the Moon and the Sun deform the Earth and the atmosphere, resulting in seismic vibrations. The method to take into account the influence of the Moon and the Sun on seismic vibrations of the earth was proposed.

**Discussion:** The method to take into account the influence of the Moon and the Sun on seismic vibrations was carried out in parallel at BFO and Arti stations. Seismic measurements for 2021 were processed. The processed data, based on the morphology of seismic vibrations, showed the best match between both stations.

**Conclusions:** It was shown that the Moon and the Sun influence the seismic vibrations of the Earth.

**Keywords:** gravity and seismic field pulsations, lunar-solar gravity variations, mass coronal ejections, meteor showers.

**For citation:** Antonov Yu. V., Antonova I. Yu. 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 DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/1/89-96>

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

### REFERENCE

1. Antonov Yu. V., Antonova I. Yu. Sravnenie prilivnykh variatsii sily tyazhesti i vertikal'noi sostavlyayushchei seismografa [Comparison of tidal variations in gravity and the vertical component of a seismograph]. *Geofizika – Geophysics*, 2013, no. 2, pp. 27–30. (In Russ.)
2. Antonov Yu. V., Antonova I. Yu. Seismo-gravitacionnyye pulsatsii na Evraziyskom kontinente [Seismic and gravitational pulsations on the Eurasian continent]. *Izv. VUZov. Geologiyairazvedka – Izv. universities. Geology and exploration*, 2019, no. 1, pp. 61–66. (In Russ.)
3. Antonov Yu. V. Pul'sacii neprilivnykh seismo-gravitacionnykh 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. 1, pp. 59–66. (In Russ.)
4. Antonov Yu. V. Vysokochastotnye kolebaniya neprilivnykh seismo-gravitacionnykh pul'sacij [High-frequency oscillations of non-tidal seismic-gravitational pulsations]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya*



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

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

– *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2022, no. 3, pp. 66–75. (In Russ.)

5. Antonov Yu. V. Pul'satsii neprilivnykh variatsii sily tyazhesti [Pulsations of non-tidal variations in gravity]. *Izv. VUZov. Geologiyairazvedka – Izv.universities. Geology and exploration*, 2014, no. 5, pp. 54–57. (In Russ.)

6. Antonov Yu. V., Sizask I. A. Sinkhronnye pul'satsii v neprilivnykh variatsiyakh gravitatsionnogo i seismicheskogo polei [Synchronous pulsations in non-tidal variations of gravity and seismic fields]. *Izv. VUZov. Geologiya i razvedka – Izv. universities. Geology and exploration*, 2015, no. 5, pp. 46–52. (In Russ.)

7. Antonov Yu. V., Antonova I. Yu. Synchronism of seismo-gravitational pulsations. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2020, no. 2, pp. 76–82. (In Russ.)

8. 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.)

9. Dikiy L. A. *Teoriya kolebaniy zemnoy atmosfery* [Theory of oscillations of Earth's atmosphere]. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1969, 194 p. (In Russ.)

10. Abramov D. V., Bebnev 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. Odnа iz vozmozhnykh prichin sinhronnykh kontinental'nykh mikro-sejism severnoj Evrazii [One of the possible causes of synchronous continental micro-seisms of northern Eurasia] // *Fizika Zemli– Physics of the Earth*, 2020, no. 4, pp. 123–131. (In Russ.)

11. Monakhov F. I. *Nizkochastomyj seismicheskij shum Zemli* [Low-frequency seismic Earth noise] Moscow, Nauka publ., 1997. 96 p. (In Russ.)

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

---

Антонов Юрий Васильевич – д. тех. н., профессор, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: yuriyantov@yandex.ru; ORCID <http://orcid.org/0000-0002-3323-9697>

Антонова Ирина Юрьевна – преподаватель, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: antonovaiu@yandex.ru; ORCID <https://orcid.org/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: yuriyantov@yandex.ru; ORCID <http://orcid.org/0000-0002-3323-9697>

Irina Yu. Antonova – Lecturer, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: antonovaiu@yandex.ru; ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5851-3122>

Authors have read and approved the final manuscript.