

Пульсации неприливых сейсмогравитационных вариаций и возможные причины их возникновения

©2022 Ю. В. Антонов✉

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

Аннотация

Введение: Пульсации силы тяжести впервые были обнаружены при обработке стационарных гравиметрических наблюдений. Анализ гравитационных пульсаций показал, что они почти всегда связаны с метеорными потоками. Но в некоторых случаях такого соответствия нет. Например, самый мощный поток Персеиды не вызывает пульсаций. Такое отклонение от правила было объяснено распределением плотности в метеорном потоке. Метеорные потоки при ударе по атмосфере Земли создают колебания, которые фиксируются гравиметрами. Датчиком у гравиметров и сейсмометров является маятник Голицына. Следовательно, метеорные потоки оказывают такое же влияние на поведение сейсмографов. Поэтому сейсмические измерения можно использовать совместно с гравиметрическими данными. При отсутствии последних, можно использовать только сейсмические записи.

Методика: При обработке гравиметрических и сейсмических наблюдений использованы методы осреднения и графической подборки, что позволяет увеличить объемы данных для обработки и надежно избавиться от лунно-солнечных вариаций силы тяжести.

Результаты и обсуждение: Оказалось, что существуют пульсации силы тяжести, которые никак не связаны с ночными потоками и ночью не проявляются в небе. В качестве примера приводятся потоки в апреле и сентябре 2021 г. В настоящее время дневные потоки легко обнаруживаются с помощью радиотехнических средств.

Выводы: Наличие или отсутствие гравиметрических и сейсмических пульсаций определяется составом и плотностью пыли в метеорных потоках. Использование гравиметрических и сейсмических пульсаций в совокупности с радиотехническими данными поможет в их изучении.

Ключевые слова: лунно-солнечные вариации силы тяжести; неприливые вариации силы тяжести; корональные выбросы масс; метеорные потоки; пульсации; сейсмический шум.

Для цитирования: Антонов Ю. В. Пульсации неприливых 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>

Введение

О возможной связи пульсаций неприливых вариаций силы тяжести с метеорными потоками впервые было отмечено в [1]. При столкновении с Землей метеорных потоков изменение силы тяжести пред-

ставлено колебаниями, по амплитуде иногда соизмеримыми с амплитудой лунно-солнечных вариаций, но только с той разницей, что период колебаний у пульсаций на несколько порядков меньше. Для гравиметров (типа CG-5 AUTOGRAV), у которых имеется



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Антонов Юрий Васильевич, e-mail: yuriyantono@yandex.ru

соответствующее программное обеспечение, проявляются пульсации повышенной среднеквадратичной погрешностью измерений [2, 3]. Однако, как выяснилось, не всегда метеорным потокам соответствуют пульсации силы тяжести и, наоборот, при наличии пульсаций отсутствуют метеорные потоки. Тем не менее, при более тщательном изучении эти противоречия легко устранимы.

Пульсации непреливных вариаций силы тяжести возникают за счет колебаний земной атмосферы после ударов по ней метеорных потоков. Но также колебания могут возникать за счет корональных выбросов масс, атмосферных фронтов, внутренних гравитационных волн и т. д. [1–8]. Поэтому всегда мы должны помнить, что вне зависимости от источников возбуждения пульсации определяются атмосферой Земли.

Отметим еще одно обстоятельство. Датчиком для измерения гравитационного поля и сейсмических колебаний служит маятник Голицына. Изменение гравитационного поля во времени влечет за собой возникновение сейсмических колебаний с тем же периодом. По существу, сейсмическое поле является производной по времени от гравитационного [5]. Следовательно, 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.

Методика обработки и обсуждение результатов

Для примера рассмотрим так называемые сейсмогравитационные пульсации. Ранее [2–4] уже приводились результаты выделения и интерпретации сейсмогравитационных пульсаций. Предварительно заметим, что данные, используемые для расчетов, получены приборами, имеющими не только различную погрешность измерений, но и различные программы обработки сигналов на интервалах различной длины. Кроме того, в англоязычной литературе принято считать основной единицей силы тяжести 1 мкм/см^2 , которая в десять раз меньше привычного нам миллиГала. Примером этому является программ Тиммена для вычисления притяжения Луны и Солнца [9]. Указанные особенности надо учитывать при обработке материалов.

С обработкой сейсмических данных дело обстоит несколько сложнее, чем с гравиметрическими данными. Значения силы тяжести и сейсмические наблюдения между собой соотносятся как первообразная – производная [5].

Исходные сейсмические данные представлены наблюдаемыми значениями. Изменение сейсмического поля во времени можно представить в виде

$$V_{\text{изм}}(t) = V_{\text{лсв}}(t) + V_{\text{изм}}(t) + C, \quad (1)$$

где $V_{\text{изм}}(t)$ – измеренные значения сейсмических данных; $V_{\text{лсв}}(t)$ – значения влияния градиента лунно-солнечных вариаций силы тяжести; C – постоянная.

Остановимся более подробно на зависимости сейсмических колебаний от лунно-солнечных вариаций, а точнее от их градиента. Вариации силы тяжести получены с помощью программы [9]. А вот градиент вариаций силы тяжести по морфологии полностью совпадает с сейсмическими данными. Влияние последних не так сильно сказывается на морфологии исходных данных. Практическим путем можно подобрать для любого сейсмографа переходной коэффициент для перевода значений вариаций силы тяжести с переменным коэффициентом K

$$\Delta V(t) = V_{\text{изм}}(t) - K * (\partial g_{\text{лсв}}(t) / \partial t) \sim V_{\text{изм}}(t) - K * (g_{\text{лсв}}(t+1) - g_{\text{лсв}}(t)) \quad (2),$$

где $\Delta V(t)$ – остаточная сейсмическая вариация; $\partial g_{\text{лсв}}(t) / \partial t$ 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.

Метеорные потоки ударяют по земной атмосфере, которая начинает колебаться. Плотность потока меняется во времени, поэтому амплитуды колебаний сейсмического поля тоже меняется. Таким образом, периодичность появления пульсаций можно объяснить ударами метеорных потоков. Например, пульсации метеорного потока Квадрантиды ежегодно проявляются в последних числах декабря и начале января или Аквариды во второй половине апреля. Трудно представить, что влияние прибрежных ударов морских волн о берег будут иметь такие амплитуды, учитывая коэффициент затухания земной коры, упругие параметры которой достаточно хорошо известны [14]. Аналогично обстоит дело и с гравиметрическими наблюдениями. Здесь исходные данные и лунно-солнечные вариации примерно сопоставимы.

С влиянием температуры на сейсмические колебания и гравиметрические измерения дело обстоит несколько иначе [3]. Хотя, если взять среднесуточные изменения температуры воздуха, то ее ход находится на данном отрезке времени со сдвигом по фазе относительно давления. В целом же это правило сдвига фаз между среднесуточным ходом температуры и давлением чаще всего соблюдается. Среднесуточный ход температуры определяется многокилометровой толщей атмосферы [3]. Дневная температура изменяется в широком диапазоне (первые десятки метров атмосферы), но это практически не влияет на измеренные значения. Дело в том, что температура измеряется на поверхности Земли и отражает состояние только приземного слоя воздуха. Чтобы убрать влияние лунно-солнечных вариаций, давления атмосферы и температуры, воспользуемся методом осреднения, так как период изменения вариаций и метеоусловий в десятки раз превышает периодичность пульсаций [3]

$$\delta g(t) = g_{\text{изм}}(t) - \sum_{-n}^n g_{\text{изм}}(t) \quad (3),$$

где $\delta g(t)$ – исправленная остаточная вариация силы тяжести за давление и температуру; $\Sigma_{-n,n}^n \Delta g_{изм}(t)$ – среднее значение вариации на интервале осреднения $(-n,n)$. Интервал осреднения составляет несколько 2–5 минут.

Вернемся к метеорным потокам. При обнаружении пульсаций [1–2] сразу же было обнаружено, что не все метеорные потоки вызывают пульсации. Рассмотрим некоторые особенности морфологии пульсаций силы тяжести и её вертикального градиента (рис. 1, *a, b*) для звездопада Персеид, который из года в год появляется в середине августа. Результаты получены по измерениям двухсферного гравиметра, по которым дополнительно можно вычислить вертикальный градиент [8]. Никакой корреляции неприливной пульса-

ции силы тяжести с кривой изменения давления, а тем более с суточным ходом силы тяжести, нет. Примерно также ведут себя графики давления, суточного хода силы тяжести и остаточная аномалия в августе того же года (рис. 1, *b*). Но в данном случае есть одна существенная деталь: нет пульсаций силы тяжести в остаточной неприливной вариации (рис. 1, *a*) или, по крайней мере, еле заметны только для опытного глаза. Но в ночь с 12 на 13 августа всегда наблюдается метеорный ливень Персеид с зенитным числом более 120 единиц. Каких-либо заметных изменений на графиках давления и суточного хода силы тяжести не отмечено. Но главное то, что отсутствуют пульсации силы тяжести, которые образуются при ударе метеорных потоков об атмосферу Земли [1–8].

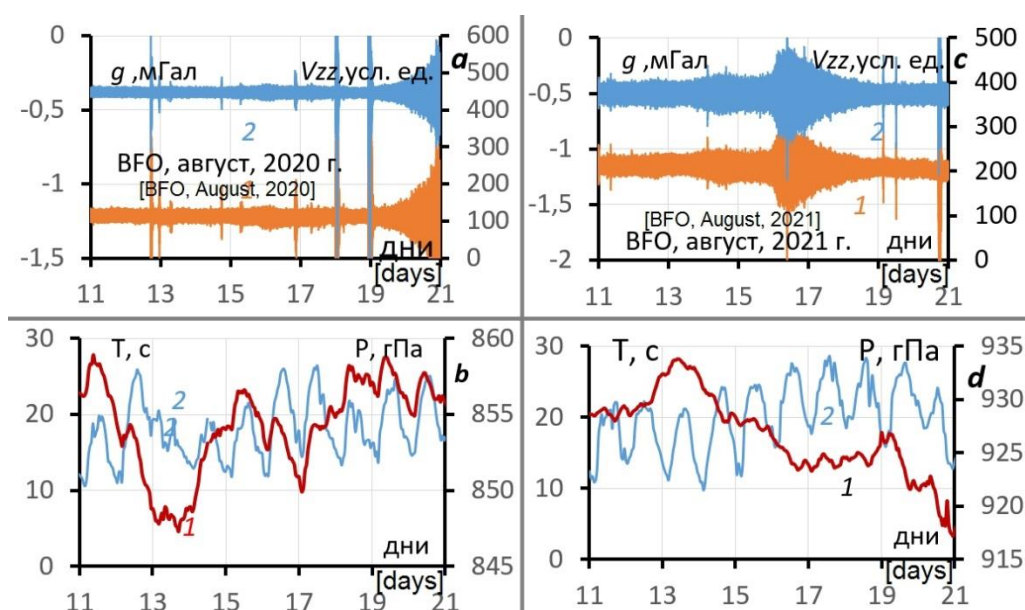


Рис. 1. Сравнение пульсаций силы тяжести при прохождении метеорного потока Персеиды в августе 2020–2021 гг: *a* – значения остаточной пульсации силы тяжести (кривая 1) и вертикального градиента силы тяжести (кривая 2); *b* – графики приземной температуры по Цельсию (T°C) и атмосферного давления в паскалях (P); *c* и *d* – те же обозначения, что на рис. 1*a, b*.
[Fig. 1. Comparison of gravity pulsations during the passage of the Perseids meteor shower in August 2020–2021: (*a*) – values of residual gravity pulsations (curve 1) and vertical gravity gradient (curve 2); (*b*) – graphs of the Earth's surface temperature in Celsius (T°C) and atmospheric pressure in pascals (P); (*c* and *d*) – the same designations as in Fig. 1*a, b*.]

Дело в том, что в астрономии принято оценивать мощность метеорных потоков по числу вспышек за час (зенитное число), а вспышку дают только крупные частицы. Но основную массу потока часто создают более мелкие частицы, которые при ударе по атмосфере обеспечивают дополнительные колебания. Кроме того, изменение плотности метеорного потока можно объяснить изменением геометрических размеров потоков во времени. Метеорные потоки в момент рождения условно можно представить в виде «пыльного тора» с переменной плотностью пыли. Со старением потока размеры потока увеличиваются, а плотность потока уменьшается. В конкретном случае диаметр потока Персеиды составляет около 80 млн км. Определение же размеров метеорных потоков вещь ненадежная и спорная. Грубо о размерах можно судить по длительности неприливых пульсаций силы тяжести.

Отсутствие пульсаций силы тяжести во время звездопадов объясняется отсутствием пыли мелкой фракции. Но размеры потока велики, и действует он в течение месяца, то есть не исключено наличие скоплений пыли в другом месте. Просмотр пульсаций за последние годы это подтвердил (рис. 1*c, d*). Совпадение пульсаций и метеорного дождя Персеид пока зафиксировано впервые за 20 лет. У астрономов для метеорного потока Персеиды появился термин "шлейф 2021 года". В этом году астрономы по всему миру заметили небывалую активность Персеид [10] после традиционного пика 13 августа. Утром 14 августа о всплеске метеорной активности сообщили японские специалисты, потом стали поступать отчеты о наблюдениях астрономов из США, Канады и Крыма. Система камер AllSky на Аляске зафиксировала активность 900–1100 метеоров ночью на 14 августа.

Таким образом, было совершено открытие нового, неизвестного до сих пор шлейфа метеорного потока Персеиды, то есть всплеска активности уже после традиционного времени пика с 12 на 13 августа.

Что касается более продолжительных метеоритных дождей, чьи орбиты выходят дальше и в меньшей степени подвержены влиянию Юпитера (те же Персеиды), они также непостоянны. В общей сложности, ученые обнаружили 18 краткосрочных и 27 долгосрочных «блуждающих» метеоритных дождей. Метеорное вещество обычно входит в атмосферу со скоростью около 15 км/сек, хотя в зависимости от направления по отношению к движению Земли скорость колеблется от 11 до 73 км/с. Нагреваясь от трения, частицы среднего размера испаряются, давая вспышку видимого света на высоте порядка 120 км и оставляя кратковременный след ионизированного газа, гаснущ к высоте порядка 70 км. Чем больше масса метеорного тела, тем ярче он вспыхивает. Такие следы, сохраняемые 10–15 минут, способны отражать радиолокационные сигналы, поэтому для обнаружения метеоров, которые слишком слабы для

визуального наблюдения (а также метеоров, появляющихся при дневном свете), используются методы радиолокации.

Пространственная плотность метеорного вещества в потоках, даже в обильных потоках, как Персеиды или Геминиды равна в среднем одной частице, видимой невооружённым глазом, на 10^6 км³. И только для наиболее плотных участков метеорных потоков, когда часовое число метеоров доходит до нескольких тысяч, взаимное расстояние между подобными рода частицами снижается до 30 и даже до 15 км, так что по расчетам притяжение всего потока ничтожно. Таким образом, пульсации силы тяжести возникают за счет удара потока по атмосфере.

Большая часть сейсмо-гравитационных пульсаций, совпадающих с метеорными потоками, приурочена к осенне-зимнему периоду. Однако такая «сезонность» не всегда соблюдается. В весенне-летний период апрель-сентябрь нередко появляются пульсации, которые не подтверждаются ночными звездопадами. Но данный вопрос был легко разрешен после применения радиолокации в астрономии [11].

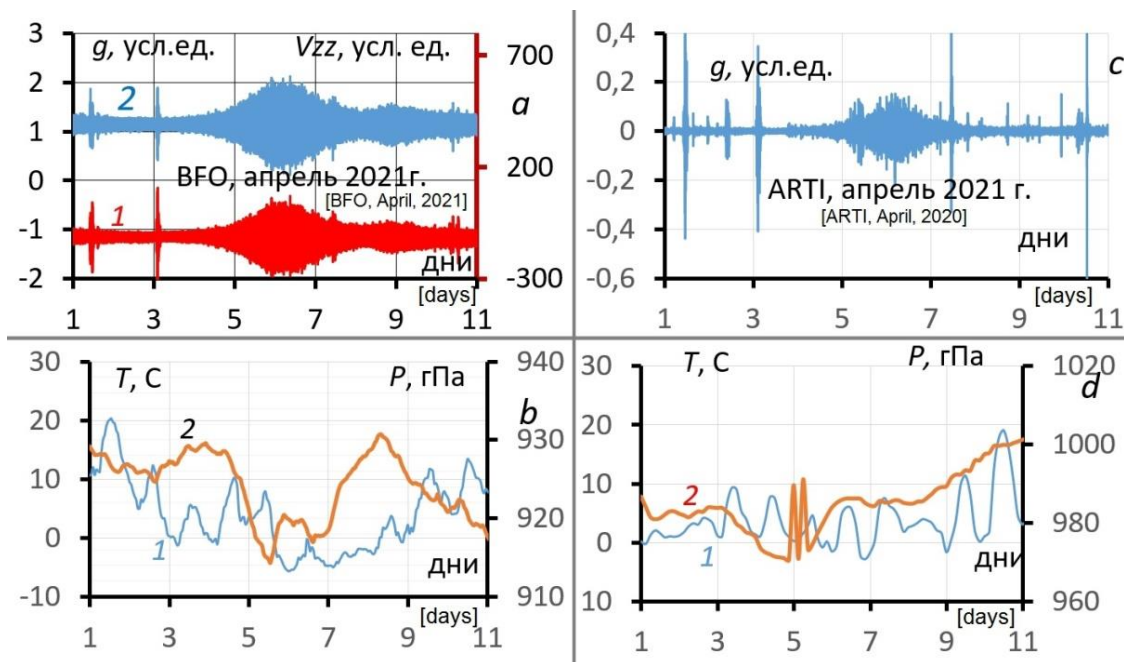


Рис. 2 Дневные пульсации силы тяжести 1–10 апреля 2021 г.: (а – BFO (Шварцвальд, Германия) и ARTI (Екатеринбург, Россия). Обозначения те же, что на рис. 1.

[Fig. 2 Daytime gravity pulsations on April 1–10, 2021: ((a) – BFO (Black Forest, Germany) and ARTI (Yekaterinburg, Russia). The same designations as in Fig. 1.)

Дело в том, что к пульсациям весенне-летнего периода приурочены дневные звездопады, которые оптически днем не наблюдаются. В качестве примера можно привести (рис. 2, 3) пульсации за 5–7 апреля. Метеорный поток (станция BFO) очень большой интенсивности, но появляется нерегулярно. Пульсациям соответствуют понижения давления и дождливая погода: поток приносит частицы мелкой фракции и способствует конденсации влаги. Многие исследователи придерживаются такой версии [12]. В конкретном случае

погода была без сильных порывов ветра, который мог бы создать пульсации [3, 13]. В Арти (рис. 2с, d) уже непогода покрывает половину пульсации. Совсем другая картина наблюдается в г. Бишкеке (станция ААК). В силу особенностей устройства гравиметра CG-5 AUTOGRAV для фиксации пульсаций использовали среднеквадратическую погрешность наблюдений (рис. 3а). Для большей уверенности дополнительно взяли сейсмическую запись (рис. 3с). На всех трех станциях отмечено полное совпадение пульсаций.

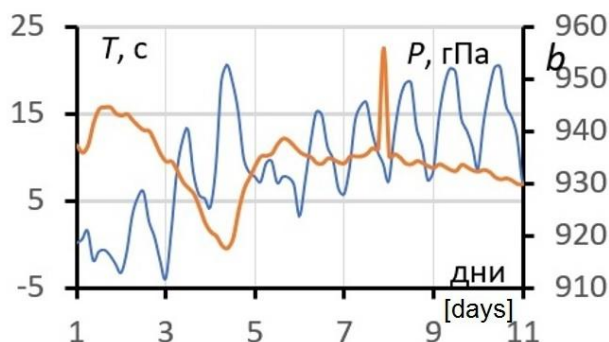
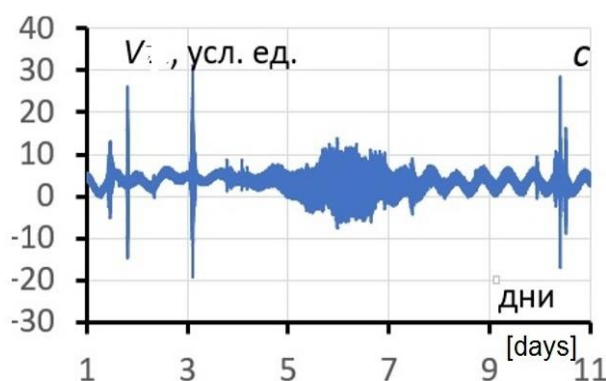
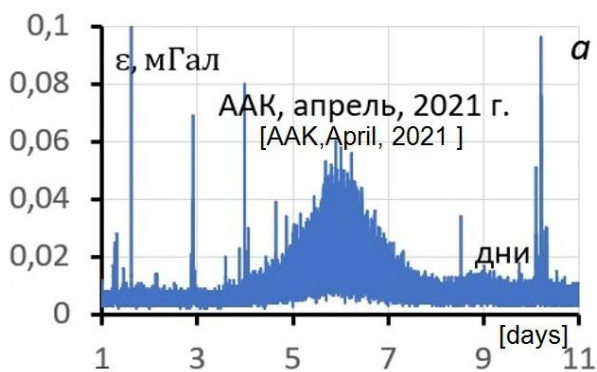


Рис. 3 Дневные пульсации силы тяжести сейсмического поля 11–21 июня 2021 г.: *a* – ААК (г. Бишкек, Киргизия), среднеквадратическая погрешность измерений и данные после учета лунно-солнечных вариаций (кривая 2), *b* – изменение температуры воздуха (кривая 1) и атмосферного давления (кривая 2), *c* – сейсмические измерения.
[Fig. 3 Daytime gravity pulsations of the seismic field on April 11–21 2021: (*a*) – ААК (Bishkek, Kyrgyzstan), RMS error and data after taking lunar-solar variations into account (curve 2), (*b*) – changes in air temperature (curve 1) and atmospheric pressure (curve 2), (*c*) – seismic measurements.]

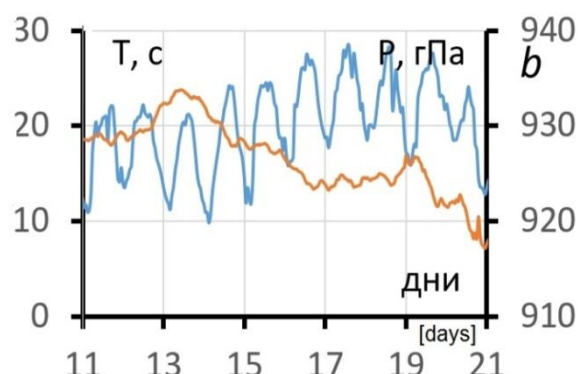
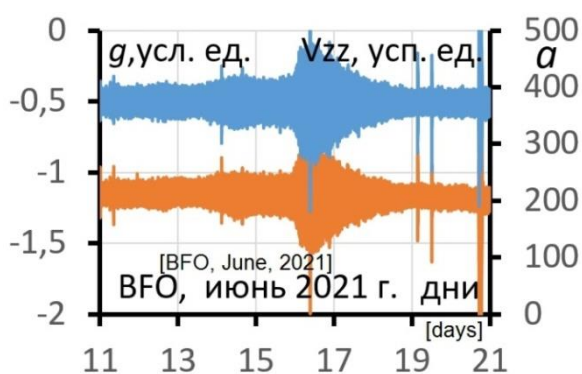


Рис. 4. Дневные пульсации силы тяжести и вертикального градиента 11–21 июня 2021 г. на станции BFO. Обозначения те же, что на рис. 1.

[Fig. 4. Daytime gravity and vertical gradient pulsations on June 11–21, 2021 at the BFO station. The same designations as in Fig. 1.]

На рис. 4. представлены пульсации, связанные с самыми непредсказуемыми дневными метеорными потоками – Июньскими Ариетидами. На станции BFO (рис. 4) пульсации носят более или менее спокойный характер. А вот на станции Арти (рис. 5а) пульсация очень сильно осложнена высокими пиками поля неясного происхождения. Дополнительно на станции были привлечены сейсмические данные (рис. 5б), которые подтвердили наличие пульсации. Вообще наблюдения в июне – июле месяце отличаются изобилием помех. Далее представим дневные пульсации силы тяжести на станции BFO (рис. 6а, б) и сейсмические пульсации на станции Арти (рис. 6с, д) в сентябре. Полное совпадение пульсаций между собой и с пульсациями в апреле месяце.

Таким образом, можно сказать, что слово «сезонность», бытующее среди большинства сейсмологов [14] по отношению сейсмических бурь в осенне-

зимний период, является некорректным. Ранее наблюдения проводились оптическим путем, а самые длительные ночи приходились на осень и зиму. Использование радиолокации при изучении метеорных потоков также породило новое условное деление на дневные и ночные потоки. Прохождение метеорных потоков не зависит ни от времени суток, ни от времени года.

Выводы

Таким образом, метеорные потоки определяют морфологию пульсаций гравиметрического и сейсмического полей. Амплитуда пульсаций зависит от распределения плотности в потоке. Наличие звёздных ливней мало влияет на амплитуду пульсации, так как крупные частицы составляют ничтожную часть массы от мелкой пыли в потоке. По мнению автора дневные, также как и ночные потоки ведут себя одинаково. Наверное, есть целесообразность

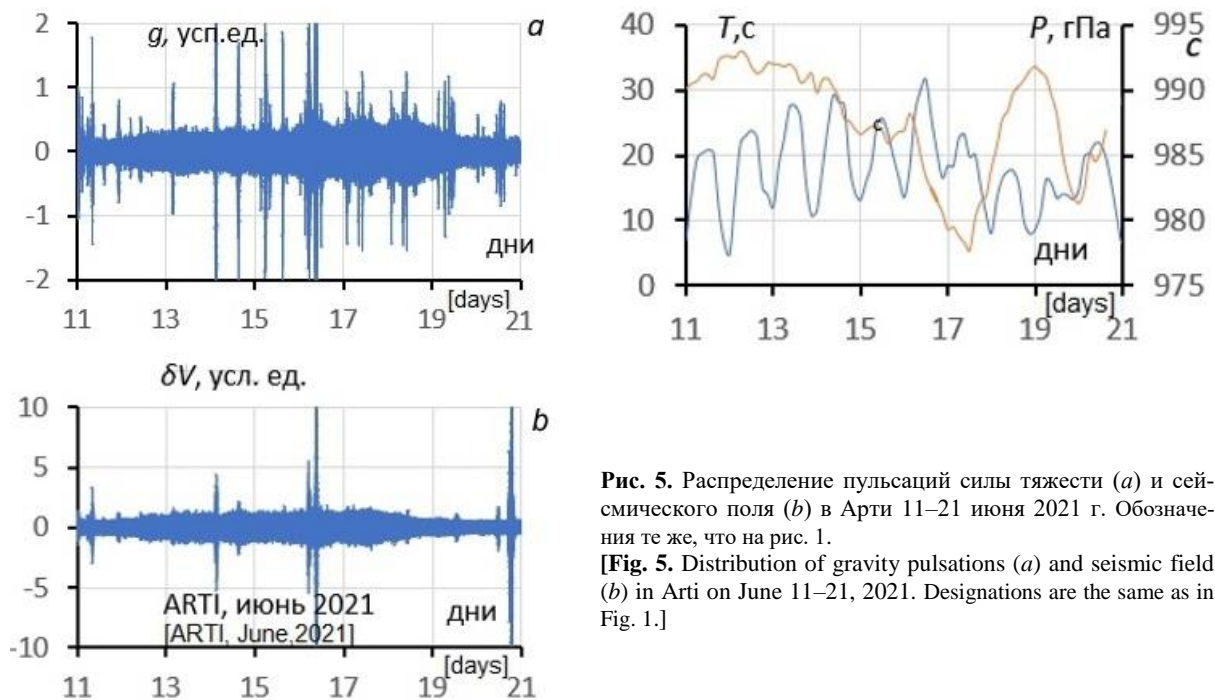


Рис. 5. Распределение пульсаций силы тяжести (а) и сейсмического поля (b) в Арти 11–21 июня 2021 г. Обозначения те же, что на рис. 1.

[Fig. 5. Distribution of gravity pulsations (a) and seismic field (b) in Arti on June 11–21, 2021. Designations are the same as in Fig. 1.]

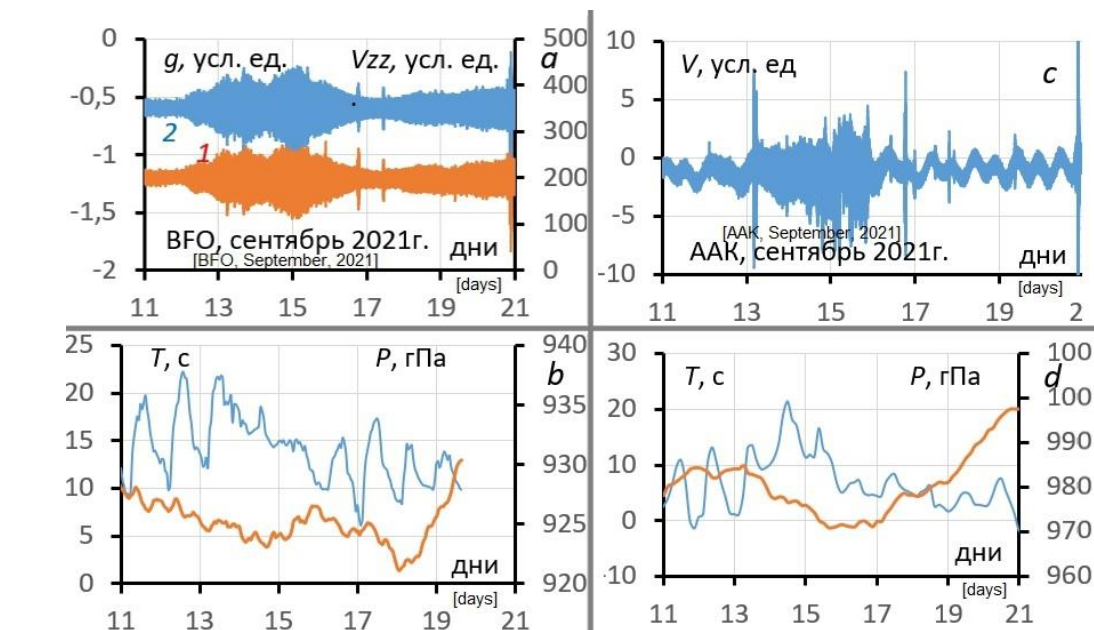


Рис. 6. Сравнение пульсаций силы тяжести на станции BFO (а) и сейсмического поля (b) на станции ААК в Бишкеке в сентябре 2021 г. Обозначения те же, что на рис. 1.

[Fig. 6. Comparison of gravity pulsations at the BFO station (a) and seismic field (b) at the AAK station in Bishkek in September 2021. The designations are the same as in Fig. 1.]

научные станции дополнить радиолокационной аппаратурой. Данные геофизических измерений с этих станции могут оказать существенную помощь при метеоисследованиях.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов Ю. В. Пульсации непривных вариаций силы тяжести // *Изв. ВУЗов. Геология и разведка*. 2014. № 5. С. 54–57.
2. Антонов Ю. В., Сизаск И. А. Синхронные пульсации в непривных вариациях гравитационного и сейсмического полей // *Геология и разведка. Изв. ВУЗ*. 2015. №5. С. 46–52.
3. Антонов Ю. В. Влияние атмосферного фронта на показания гравиметров и сейсмометров // *Геология и разведка. Изв. ВУЗ*. 2017. №4. С. 66–71.

4. Антонов Ю. В. Разделение неприливых вариаций силы тяжести на основе спектрального анализа и метода осреднения // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2016. № 2. С. 100–106.
5. Антонов Ю. В., Антонова И. Ю. Сравнение приливных вариаций силы тяжести и вертикальной составляющей сейсмографа // *Геофизика*. 2013. №2. С. 27–30.
6. Антонов Ю. В. Вычисление вертикального градиента силы тяжести по измерениям двухсферного сверхпроводящего гравиметра // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2020. №. 3. С. 55–63
7. Антонов Ю. В., Антонова И. Ю. Синхронность сейсмогравитационных пульсаций. // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2020. №2. С. 76–82.
8. Антонов Ю. В., Антонова И. Ю., Пономаренко И. А. Вопросы обработки стационарных измерений гравиметрами // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2020. №4. С. 59–66
9. Timmen L., Wenzel H.-G. Worldwide synthetic gravity tide parameters available on Internet // *Bulletin d'information-Bureau gravimétrique international*. 1994. V. 75. P.32–40.
10. РИА новости [Электронный ресурс]: URL <https://ria.ru/20210815/meteory-1745818432.html> (дата обращения 01.02.2022)
11. Матвеев Л. Т. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеонздат, 2000. 780 с.
12. Granitskii, L.V. Borisevich A. N. Research of influence of the meteoric stream on the weather condition preliminary consideration. Bellingham. Seventh international symposium on atmospheric and ocean. 2001. P. 563–570.
13. Расписание погоды [Электронный ресурс]. URL: <http://rp5.ru> (дата обращения 01.02.2022)
14. Монахов Ф. И. Низкочастотный сейсмический шум Земли. М., Наука, 1997. 96 с.

GEOPHYSICS

UDC 550.831 + 550.348

ISSN 1609-0691

DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2022.1/9100>

Received: 17.01.2022

Accepted: 28.02.2022

Published online: 29.03.2022

Non-tidal variations of seismic-induced gravitational pulsations and their possible causes

©2022 Yu. V. Antonov✉

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

Abstract

Introduction: Gravity pulsations were first detected when processing gravimetric stationary observations. The analysis of gravitational pulsations showed that they are most of the time associated with meteor showers. However, in some cases there is no correlation between them. For example, the most powerful of the Perseids meteor showers did not cause pulsations. This deviation from the rule was explained by the distribution of density in the meteor shower. When meteor showers hit the Earth's atmosphere, they create fluctuations that are recorded by gravimeters. The sensor used in gravimeters and seismometers is the Golitsyn pendulum. Therefore, meteor showers have the same effect on the behaviour of seismographs. This means that seismic measurements can be used in combination with gravimetric data. When the latter are absent, it is possible to use only seismic records.

Methodology: The methods of averaging and graphical selection were used to process gravimetric and seismic observations, which allowed increasing the amount of data to be processed and eliminating with reliability lunar-solar gravity variations.

Results and discussion: It appeared that there exist gravity pulsations which are in no way connected with



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Yury V. Antonov, e-mail: yuriyantonyov@yandex.ru

night-time showers and do not appear in the sky at night. The showers in April and September 2021 were given as examples. Currently, daytime showers can be easily detected using radio technology.

Conclusions: The presence or absence of gravimetric and seismic pulsations is determined by the composition and density of dust in meteor showers. The use of gravimetric and seismic pulsations in combination with radio data will contribute to their study.

Keywords: lunar-solar gravity variations, non-tidal gravity variations, mass coronal ejections, meteor showers, pulsations, seismic noise.

For citation: Antonov Yu. V. 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 DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2022.1/9100>

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

REFERENCES

1. 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.)
2. 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.)
3. Antonov Yu. V. Vliyanie atmosfernogo fronta na pokazaniya gravimetrov i seismometrov [Influence of the atmospheric front on the readings of gravimeters and seismometers]. *Izv. VUZov. Geologiya i razvedka – Izv. universities. Geology and exploration*, 2017, no. 4, pp. 66–71. (In Russ.)
4. 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.)
5. 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.)
6. Antonov Yu. V. Calculation of the vertical gradient of gravity from measurements of a two-sphere superconducting gravimeter. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2020, no. 3, pp. 55–63. (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., Antonova I. Yu., Ponomarenko I. A. Problems of processing stationary measurements by gravimeters. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2020, no. 4, pp. 59–66. (In Russ.)
9. 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.
10. RIA novosti. Available at: <https://ria.ru/20210815/meteory-1745818432.html> (accessed 01.02.2022) (In Russ.)
11. Matveev L. T. *Fizika atmosfery* [Atmospheric Physics]. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 2000, 780 p. (In Russ.)
12. Granitskii, L.V. Borisevich A. N. Research of influence of the meteoric stream on the weather condition preliminary consideration. Bellingham. *Seventh international symposium on atmospheric and ocean*, 2001, pp. 563–570.
13. Raspisanie pogody [Weather schedule]. Available at: <http://rp5.ru> (accessed 01.02.2022)
14. Monakhov F. I. *Nizkochastotnyi seismicheskii shum Zemli* [Low-frequency seismic noise of the Earth.]. Moscow, Nauka publ., 1997, 96 p. (In Russ.)

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>

Автор прочитал и одобрил 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>

Author have read and approved the final manuscript.