

Высокочастотные колебания неприливных сейсмо-гравитационных пульсаций

Ю. В. Антонов[✉]

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

Аннотация

Введение: Датчиком для гравиметров и сейсмографов является маятник Голицына, что позволяет более полноценно интерпретировать данные сейсмо-гравиметрических измерений. При выделении пульсаций основные неудобства возникают при учете лунно-солнечных вариаций силы тяжести (в основном для сейсмических наблюдений). Но в большей части этот вопрос относительно легко решается с помощью метода осреднения. По мере повышения точности измерений и сокращения интервалов дискретности наблюдений появляется возможность изучения спектральных характеристик высокочастотной части наблюдений.

Методика: Для сравнения были выбраны дни, где четко проявляются пульсации, и дни, когда нет пульсаций или они минимальны. Поскольку пульсации носят глобальный характер, то были взяты сейсмо-гравиметрические наблюдения в разных пунктах земного шара (Шварцвальд, Германия и Арти, Россия).

Обсуждение результатов: Для указанных станций был проведен спектральный анализ и получены следующие результаты. Для оценки анализа использованы амплитудные спектры. Основной несущей частотой является частота с периодом в пределах 5 – 9 с. Отмечена четкая зависимость между частотой и амплитудой пульсаций.

Ключевые слова: пульсации силы тяжести и сейсмического поля; лунно-солнечные вариации силы тяжести; корональные выбросы масс; метеорные потоки; спектры сейсмических и гравиметрических пульсаций.

Для цитирования: 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>

Введение

О возможной связи пульсаций неприливных вариаций силы тяжести и сейсмических колебаний с метеорными потоками было исследовано в [1–8]. При столкновении с Землей метеорных потоков изменение силы тяжести представлено колебаниями, по амплитуде иногда соизмеримыми с амплитудой лунно-солнечных вариаций, но только с той разницей, что период колебаний у пульсаций на

несколько порядков меньше, чем у лунно-солнечных колебаний. Для гравиметров (типа CG-5 AUTOGRAV), у которых имеется соответствующее программное обеспечение, пульсации проявляются не только увеличением амплитуды колебаний, но и повышенной среднеквадратичной погрешностью измерений [1, 3].

Пульсации неприливных вариаций силы тяжести возникают не только за счет колебаний земной



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

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

атмосферы после ударов по ней метеорных потоков. Но также колебания могут возникать после корональных выбросов масс, атмосферных фронтов, внутренних гравитационных волн и т. д. [1–8], но они не велики по амплитуде. Поэтому всегда должны помнить, что вне зависимости от источников возбуждения пульсации сейсмо-гравитационного поля 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

Для примера рассмотрим так называемые сейсмо-гравитационные пульсации. Ранее [1–8] 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 [9–11] принято считать основной единицей силы тяжести 1 мкм/сек², которая в десять раз меньше привычного нам миллиГала. Примером этому является программа Тиммена для вычисления притяжения Луны и Солнца [11], в которой значения силы тяжести даны в размерности 1 мкм/см². Указанные особенности надо учитывать при обработке материалов.

Метеорные потоки 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.

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 [11]. Коэффициент соотношения между ними достаточно стабилен. Но лучше всего использовать метод осреднения:

$$\delta g(t) = g_{\text{изм}}(t) - \sum_{-n}^n g_{\text{изм}}(t), \quad (1)$$

где $\delta g(t)$ – остаточная вариация силы тяжести после осреднения; $\sum_{-n}^n \Delta g_{\text{изм}}(t)$ – 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 пульсации при наличии периода колебаний в 5 – 10 секунд полностью исчезают. Использование метода осреднения 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 [5]. Изменение сейсмического поля во времени можно представить в виде

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

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

С влиянием температуры на сейсмические колебания и гравиметрические измерения дело обстоит несколько иначе [4–8, 12]. 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 [12, 13]. Дневная температура изменяется в широком диапазоне (первые десятки метров по высоте), но это практически не влияет на измеренные значения. Дело в том, что температура измеряется на поверхности Земли и отражает состояние только приземного слоя воздуха.

Остановимся более подробно на зависимости сейсмических колебаний от лунно-солнечных вариаций, а точнее от их градиента. Обратимся к рис. 1. На рис. 1, а, с представлены исходные сейсмические данные и лунно-солнечные вариации силы тяжести. Вариации силы тяжести получены с помощью программы [11]. Как видим, совпадения форм сейсмических колебаний и вариаций силы тяжести не наблюдается (рис. 1, а, с). А вот градиент вариаций силы тяжести (рис.1, б) по морфологии полностью совпадает с сейсмическими данными (рис.1, а). Поскольку амплитуды сейсмических колебаний на много больше, чем амплитуды градиента вариаций силы тяжести, то влияние последних не так сильно сказывается на морфологии исходных данных. Но, тем не менее, поправки вводить надо. Практическим путем можно подобрать для любого сейсмографа переходной коэффициент для

перевода значений вариаций силы тяжести с переменным коэффициентом K .

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

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

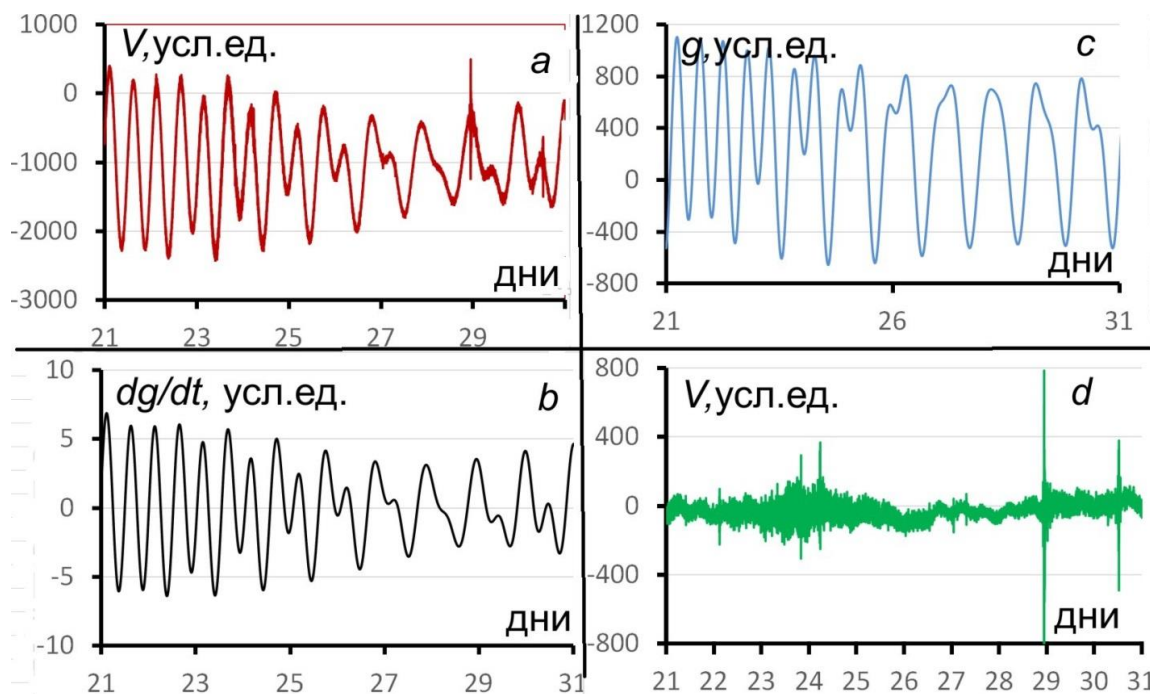


Рис. 1. Сравнение лунно-солнечных вариаций силы тяжести с сейсмическими данными на обсерватории FFC (Канада, март 2019 г.): *a* – сейсмическая запись; *b* – лунно-солнечные вариации силы тяжести; *c* – градиент лунно-солнечных вариаций силы тяжести; *d* – пульсация сейсмического поля.

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

Обсуждение результатов

Начнём рассмотрение спектров 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 используется прибор LaCoste & Romberg. На станции ВФО дополнительно ведутся измерения на двухсферном сверхпроводящем гравиметре (GWR Dual Sphere Superconducting Gravimeter). Поскольку 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 обеих станций у приборов 1 секунда.

Сделаем замечание относительно проведения спектрального анализа. В качестве оценки принята амплитуда спектра, так как все остальные преобразования в какой-то мере подчеркивают лучше отдельные детали, но в целом амплитудный спектр содержит в себе все необходимые данные. Было использовано несколько программ для проведения спектрального анализа. Результаты все идентичны, если брать для анализа интервал одинаковой длины, так как везде используются формулы для быстрого преобразования

Фурье. В итоге вычисления проведены по программе TSOFT [10], поскольку в ней можно использовать более длинный временной интервал наблюдений.

Рассмотрим поведение графиков силы тяжести на обеих станциях в первой декаде апреля 2021 г. (рис. 2, *a*, *c*). Пульсации гравитационного поля очень чётко выделяются как в ВФО, так и в Арти. Дополнительно на рис. 2, *a* приведен график вертикального градиента силы тяжести, который 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 не будем останавливаться. Ниже приведены графики температуры и атмосферного давления (рис. 2, *b*, *c*). Для Шварцвальда пульсация силы тяжести чётко совпадает с понижением давления и непогодой. Наоборот, в Арти падение давления отмечается перед пульсацией гравитационного поля. Следовательно, пульсация связана с ударом метеорного потока [2–6]. Что же касается изменений температуры, как отмечалось выше, то температура не является объективным показателем. Она отражает состояние только нижних слоев атмосферы, а они практически не позволяют оценивать изменения силы тяжести.

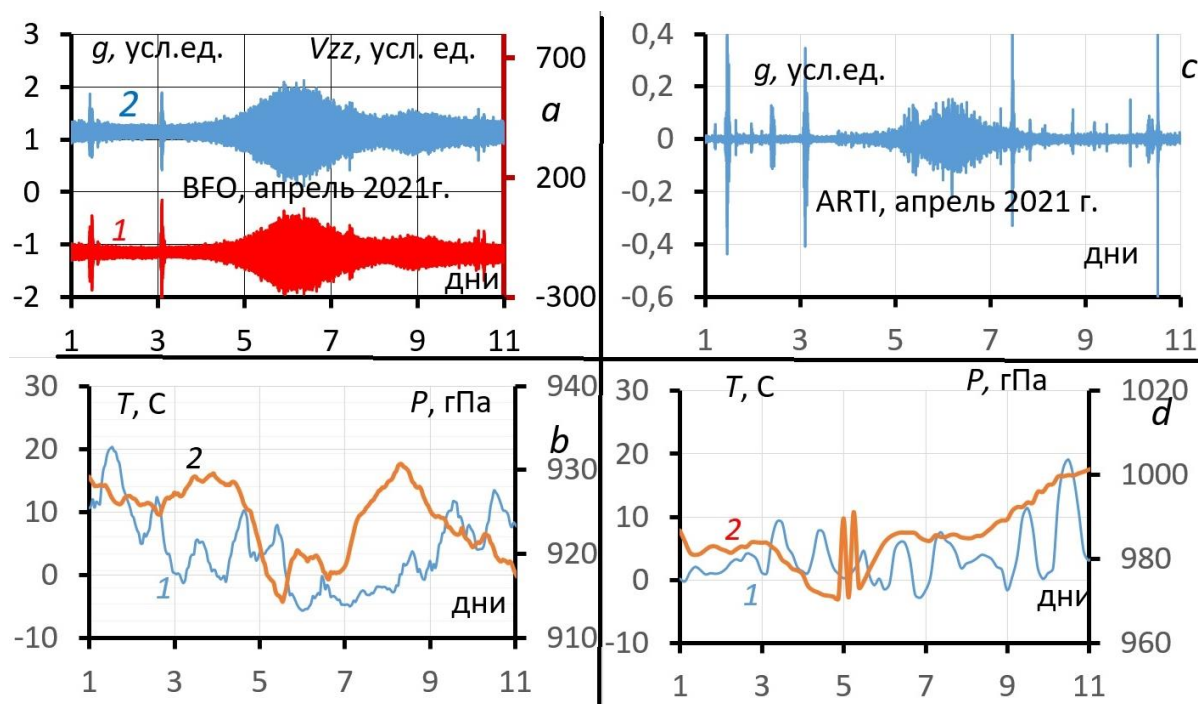


Рис. 2 Пульсации силы тяжести в апреле 2021 г: *a* – графики изменения силы тяжести (кривая 1) и её вертикального градиента (кривая 2) на станции BFO (Шварцвальд, Германия); *b* – графики изменения температуры (кривая 1) и атмосферного давления (кривая 2); *c* – график изменения силы тяжести на станции ARTI (Екатеринбург, Россия); *d* – те обозначения, что на рис. 2 - *b*.
[Fig. 2. Gravity pulsations in April 2021: (*a*) – graphs of gravity changes (curve 1) and its vertical gradient (curve 2) at the BFO station (Black Forest, Germany); (*b*) – graphs of temperature changes (curve 1) and atmospheric pressure (curve 2); (*c*) – graph of force changes in gravity at the ARTI station (Yekaterinburg, Russia); (*d*) – the designs shown in Fig. 2-b.]

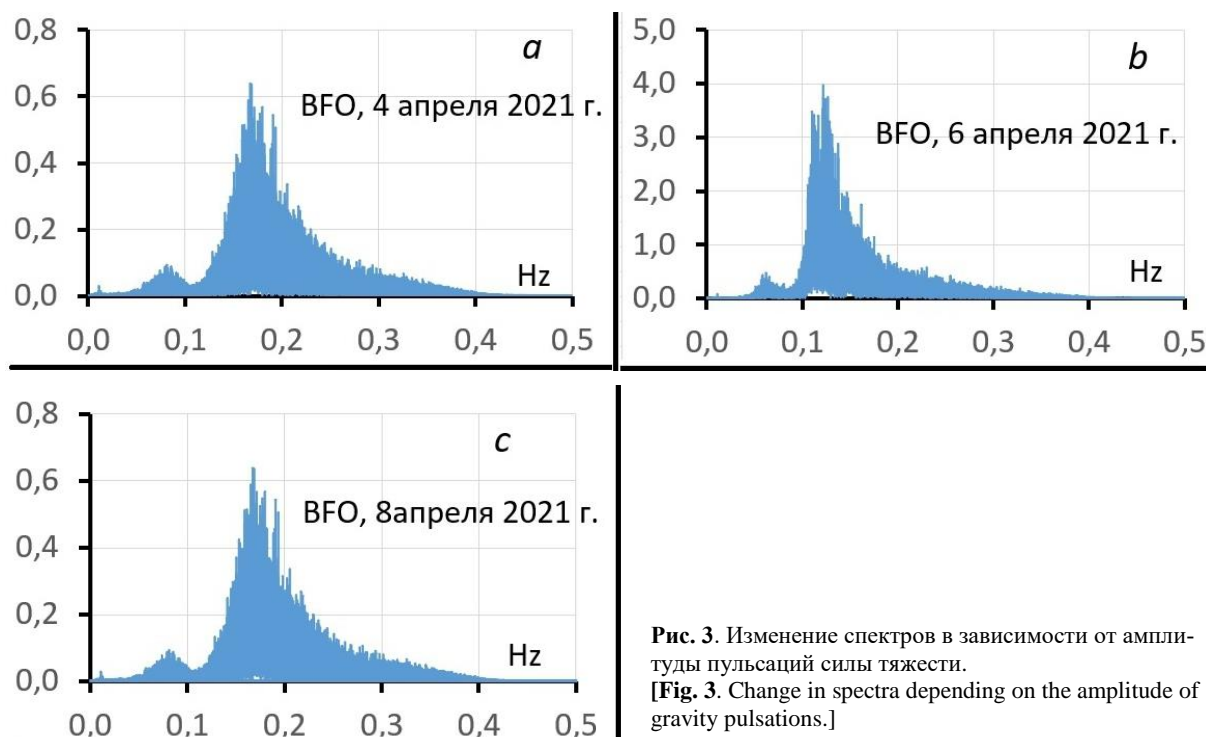


Рис. 3. Изменение спектров в зависимости от амплитуды пульсаций силы тяжести.
[Fig. 3. Change in spectra depending on the amplitude of gravity pulsations.]

На обеих станциях с интервалом в сутки вычислены спектры, которые оказались практически одинаковыми. На рис. 3 приведены спектры пульсации для BFO. Из данного рисунка можно отметить сле-

дующие факты. Амплитуды спектров пропорциональны амплитудам пульсаций. В самом начале перед пульсацией период колебаний составляет около 6 секунд, в центре пульсации период увеличивается

уже до 9 секунд, то есть здесь мы имеем дело со смещением максимума частоты. Видимо это смещение можно объяснить силой удара метеорного потока по атмосфере Земли. Чем сильнее удар, тем больше амплитуда колебаний и соответственно мы имеем дело с увеличением периода колебаний почти в 2 раза [8].

Обращает на себя внимание для всех частей рис. 3 наличие небольшого максимума на частоте примерно 0,08 Гц. Наличие этого максимума можно объяснить следующим образом. Обратимся к рис. 4, где в верхней части (рис. 4, *a, c*) приведены графики измерений силы тяжести, а в нижней части (рис. 4, *b, d*) спектры, которые соответствуют датам за 3 и 6 апреля. 3 апреля наличествует максимум пульсаций силы тяжести

(рис. 4, *a*), связанный с местным землетрясением. Этому максимуму чётко соответствует максимум частоты с периодом около 20 секунд. Колебания с частотой 0,2 Гц полностью сохранились, но амплитуда стала более чем в два раза меньше по сравнению при частоте 0,05 Гц. Если переходим к интервалу наблюдений за 6 апреля (рис. 4, *d*), то четко видим колебания с периодом в 8 секунд. Амплитуда при частоте 0,05 Гц резко уменьшается по сравнению с главной амплитудой частоты при 0,12 Гц. Попутно заметим, что максимум частоты вместо 5 секунд равен примерно 8 секунд. Ранее (см. рис. 2) уже отмечалось, что с ростом амплитуды колебаний период колебаний увеличивается, так как на 6 апреля приходится максимум пульсации силы тяжести.

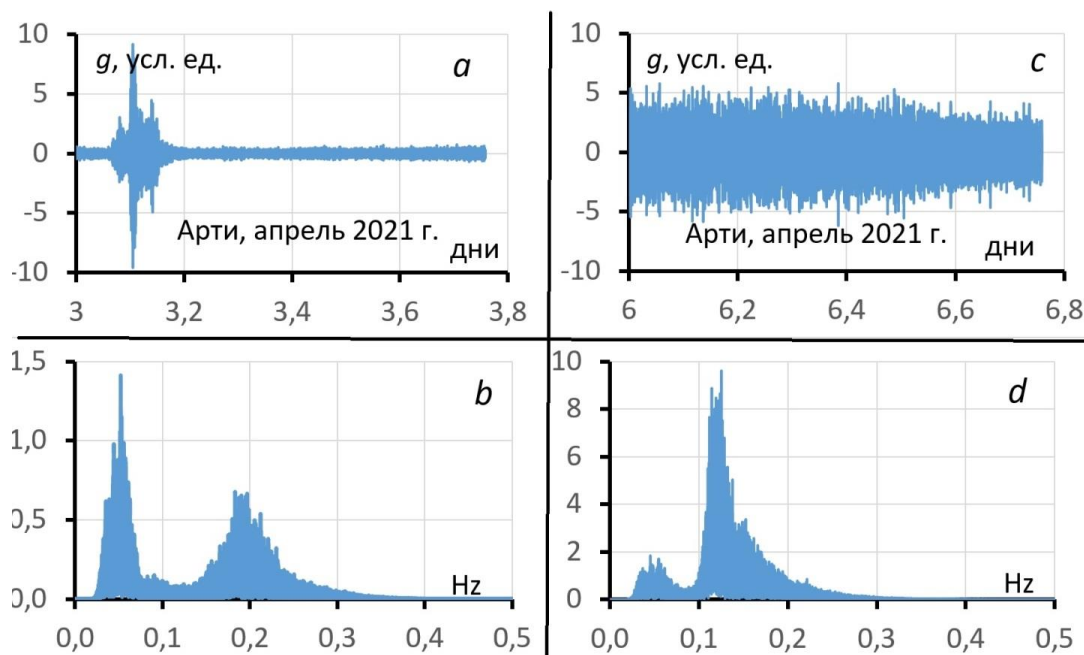


Рис. 4. Влияние землетрясений на амплитуду спектр.
[Fig. 4. The effect of earthquakes on the amplitude of the spectra.]

А теперь рассмотрим поведение сейсмического поля (рис. 5) для этих же станций. Исходные данные сейсмического поля представлены на рис. 5, *a, c*. Ниже представлены эти же пульсации (рис. 5, *b, d*), обработанные с учётом лунно-солнечных вариаций силы тяжести. Отметим, что после учета влияния лунно-солнечных вариаций графики сейсмических пульсаций становится более гладкими. Графики частот для Шварцвальда и Арти, представленные на рис. 6., практически одинаковы с графиками частот для пульсаций силы тяжести (рис. 6).

Обратимся к пульсациям, которые намного меньшей амплитуды или практически отсутствуют (рис. 7). Записи измерений взяты с тех же станций в июле 2021 года. Практически на записях отсутствуют пульсации. Атмосферное давление на одной и другой станциях меняется слабо. Наблюдается очень большое количество локальных землетрясений, связанных со среднеазиатском регионом. Для дат 15 и 19 июля

были вычислены частоты для ВФО и Арти (рис. 8). Для обеих станций главная частота равна 0,2 Гц. Что же касается станции Арти, то в силу наличия землетрясений появляются частоты менее 0,1 Гц. На рисунках 9 и 10 приведены частоты для сейсмической записи (рис. 9, 10). Практически они по форме совпадают с частотами для гравитационного поля. Хотелось бы ещё отметить частоту 0,3 Гц, которая иногда появляется при вычислениях.

Основной несущей частотой является частота с периодом 5 секунд, которая в отличие от других частот находится в прямой зависимости от изменения амплитуд сейсмо-гравитационных пульсаций. Это обстоятельство лишний раз свидетельствует о связи колебаний атмосферы с пульсациями сейсмо-гравитационного поля [7]. Несомненно, заслуживают более тщательного изучения частоты, связанные локальными землетрясениями.

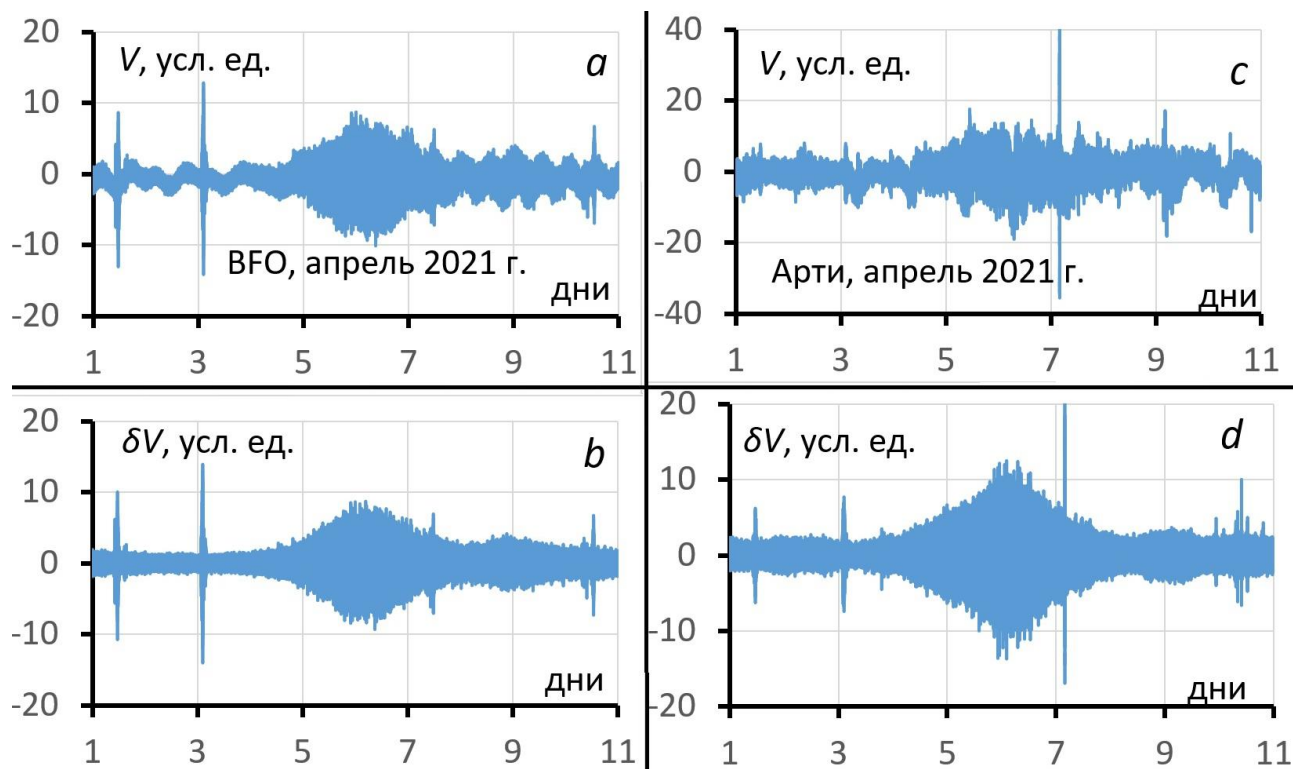


Рис. 5. Распределение измерений сейсмических данных на станциях BFO (a) и ARTI (c) в апреле 2021 г. (b, d) – пульсации сейсмического поля после учета лунно-солнечных вариаций силы тяжести соответственно для BFO (a) и ARTI (c).
 [Fig. 5. Distribution of seismic data measurements at stations BFO (a) and ARTI (c) in April 2021 (b, d) – pulsations of the seismic field after taking into account lunar-solar gravity variations, respectively, for BFO (a) and ARTI (c).]

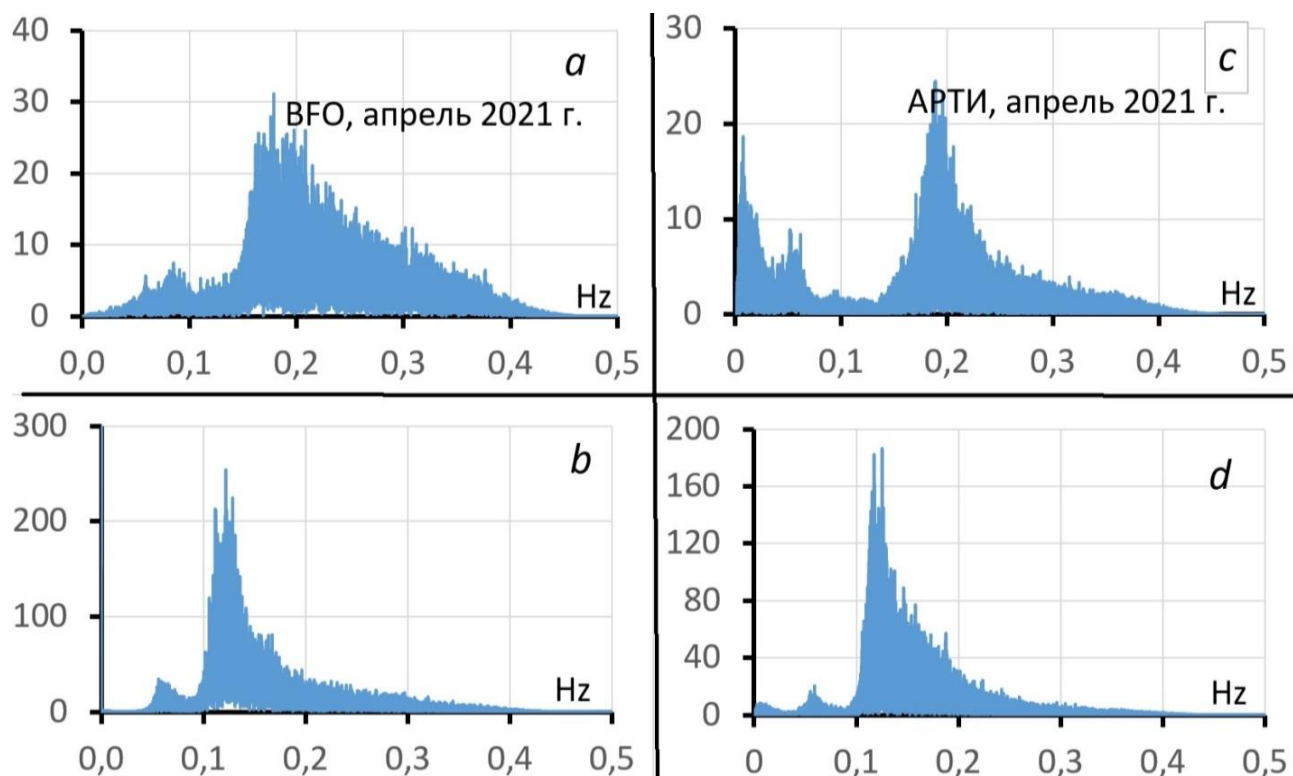


Рис. 6. Спектры сейсмического поля 4 и 6 апреля 2021 г. для станций BFO (a, b) и ARTI (c, d).
 [Fig. 6. Seismic field spectra on April 4 and 6, 2021 for stations BFO (a, b) and ARTI (c, d).]

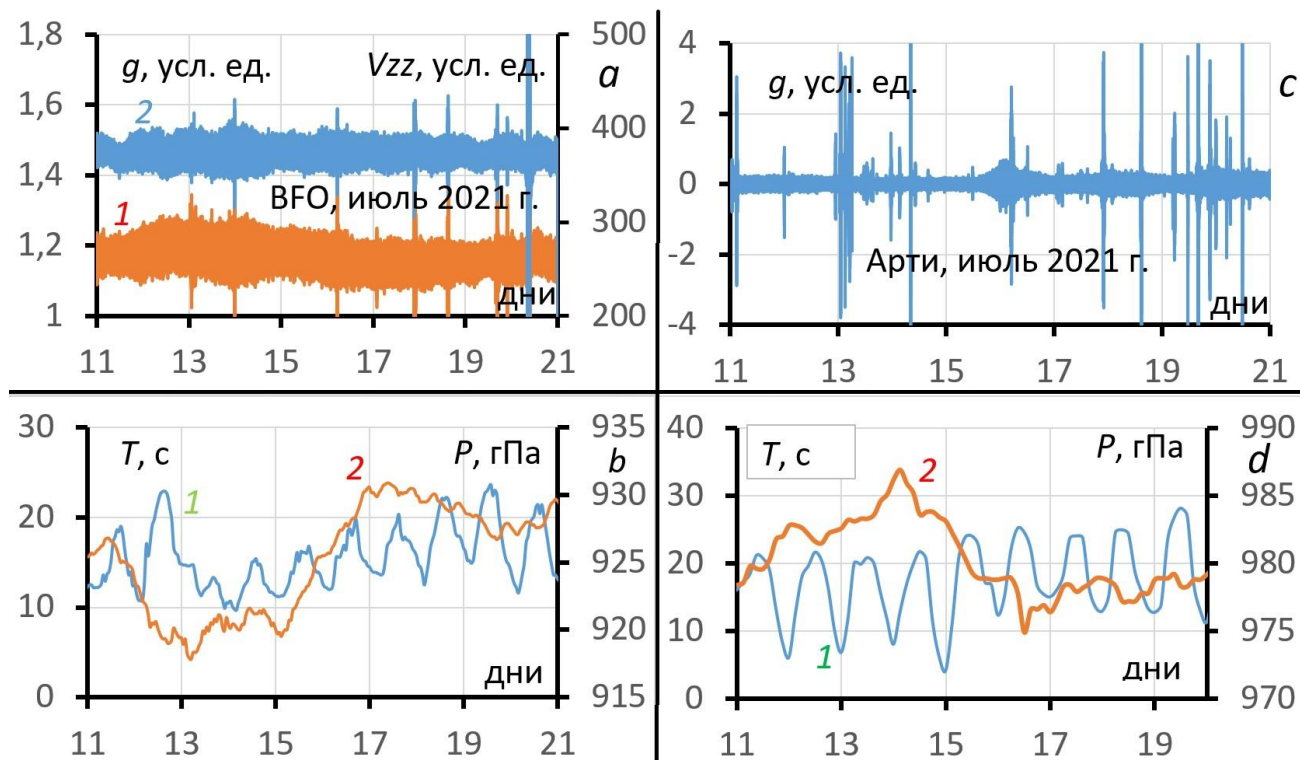


Рис. 7. Пульсации силы тяжести в июле 2021 г. на станциях BFO и ARTI/ Обозначения, см. на рис. 2.
 [Fig. 7. Force pulsations gravity in July 2021 at the BFO and ARTI stations/ For legends see Fig. 2.]

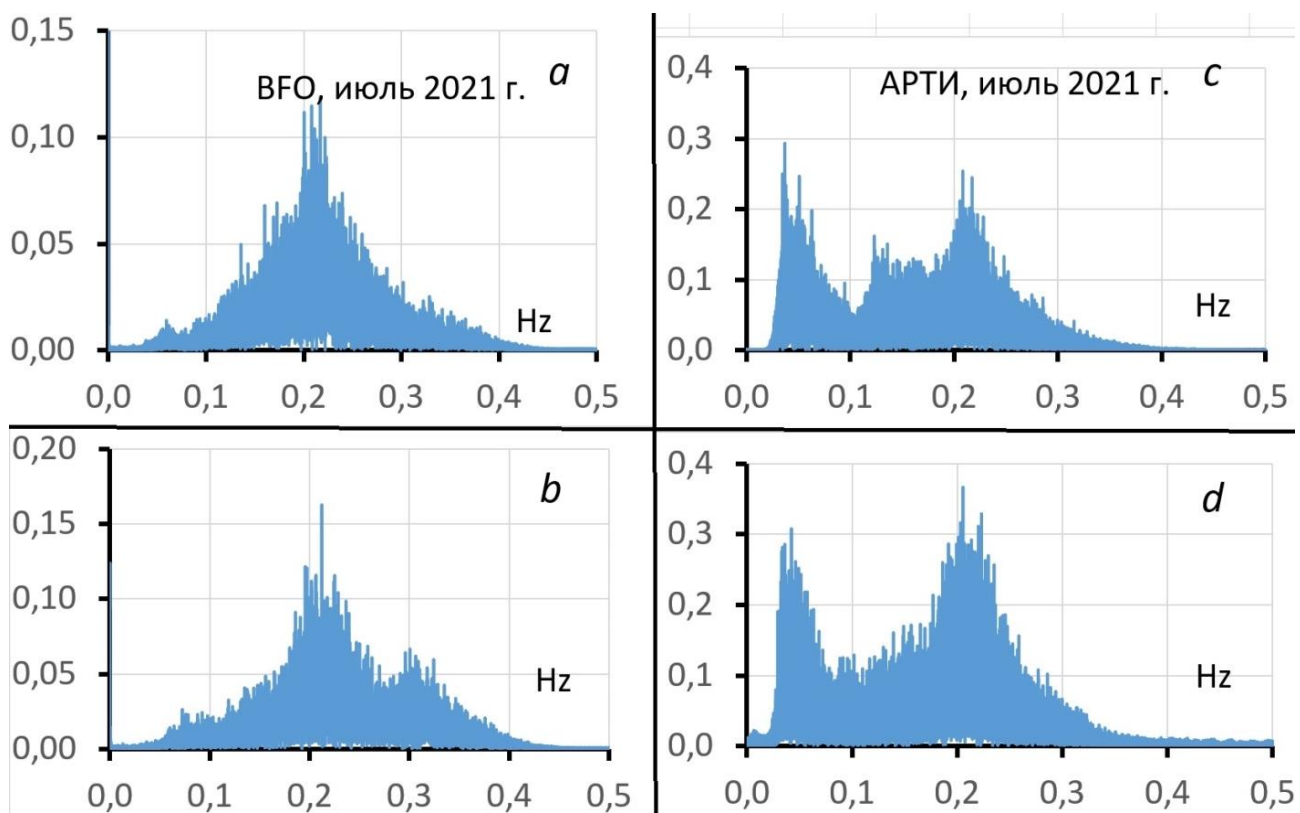


Рис. 8. Спектры силы тяжести 15 и 19 июля 2021 г. на станциях BFO и ARTI
 [Fig. 8. Gravity spectra on July 15 and 19, 2021 at the BFO and ARTI stations.]

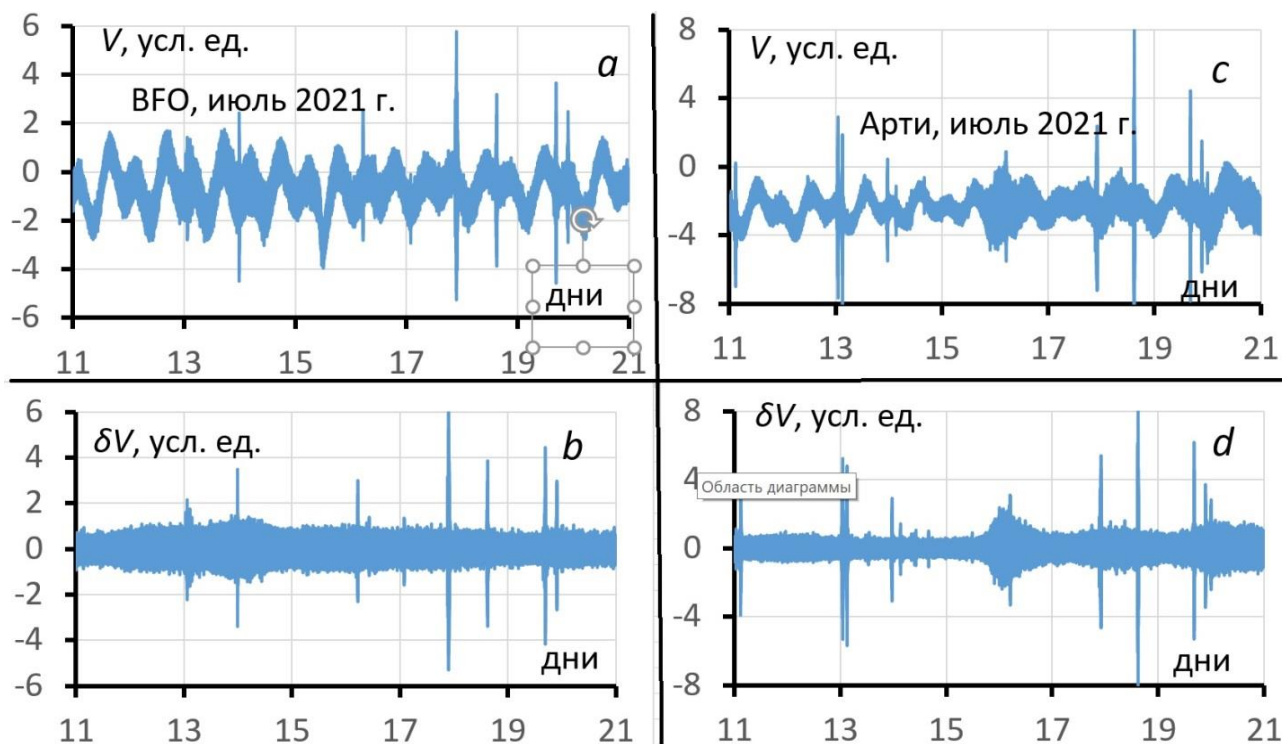


Рис. 9. Распределение измерений сейсмических данных на станциях BFO (a) и ARTI (c) в июле 2021 г. (b, d) – пульсации сейсмического поля после учета лунно-солнечных вариаций силы тяжести соответственно для BFO (a) и ARTI (c).
[Fig. 9. Distribution of seismic data measurements at BFO (a) and ARTI (c) stations in July 2021. (b, d) – pulsations of the seismic field after taking into account lunar-solar gravity variations, respectively, for BFO (a) and ARTI (c).]

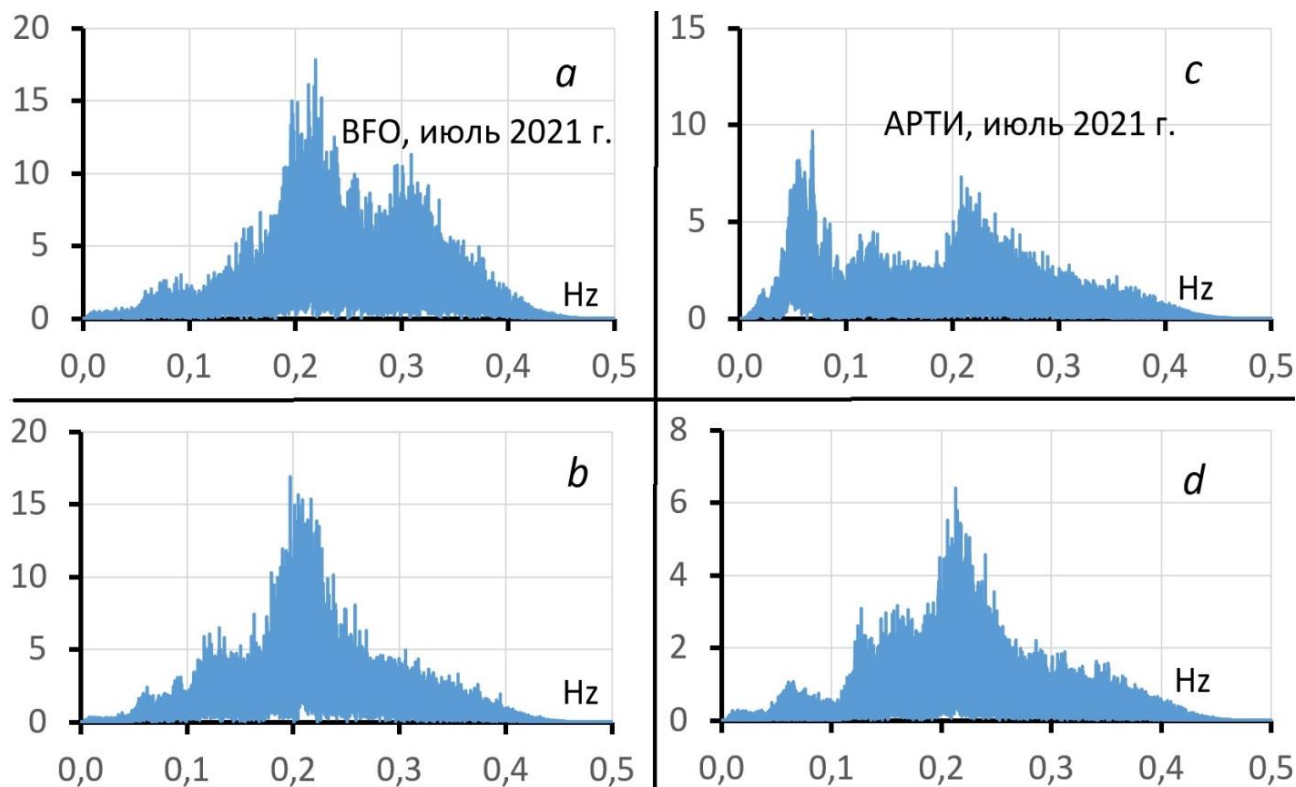


Рис. 10. Спектры сейсмического поля 15 и 19 июля 2021 г. для станций BFO (a, b) и Арти (c, d).
[Fig. 10. Seismic field spectra on July 15 and 19, 2021 for BFO (a, b) and ARTI (c, d) stations.]

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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>
2. Антонов Ю. В. Пульсации неприливных вариаций силы тяжести // *Геология и разведка. Изв. ВУЗов*. 2014. № 5. С. 54–57.
3. 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.
4. 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.
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. Влияние атмосферного фронта на показания гравиметров и сейсмометров // *Геология и разведка. Изв. ВУЗов*. 2017. № 4. С. 66–71.
7. Антонов Ю. В., Антонова И. Ю. Сейсмо - гравитационные пульсации на Евразийском континенте // *Геология и разведка. Изв. ВУЗов*. 2019. № 1. С. 61–66.
8. 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>
9. J. Boy, J. Hinderer, P. Gegout Global atmospheric loading and gravity // *Physics of the Earth Planetary Interiors*. 1998. Vol. 109. P. 161–177.
10. M. Camp, P. Vauterin Tsoft: Graphical and interactive software for the analysis of time series and Earth tides// *Computers & Geosciences*. 2005. Vol. 31 (5) P. 631–640.
11. Timmen L., Wenzel H.-G. Worldwide synthetic gravity tide parameters available on Internet // *Bulletin d'information-Bureau gravimétrique international*. 1994. Vol. 75. P. 32–40.
12. Дикий Л. А. Теория колебаний земной атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 194 с.
13. Бычков С. Г., Долгаль А. С., Симанов А. А. Вычисление аномалий силы тяжести при высокоточных гравиметрических съемках. Пермь, УрО РАН. 2015. 143 с.

GEOPHYSICS

UDC 550.831 + 550.348

ISSN 1609-0691

DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2022/3/66-75>

Received: 22.06.2022

Accepted: 08.09.2022

Published online: 30.09.2022

High-frequency oscillations of non-tidal seismic-gravitational pulsations

©2022 Yu. V. Antonov✉

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

Abstract

Introduction: The sensor for gravimeters and seismographs is the Golitsyn pendulum, which allows more full interpretation of the data of seismo-gravimetric measurements. In the identification of pulsations, the main inconvenience arises when lunar-solar gravity variations (mainly for seismic observations) are taken into account. However, this question is relatively easy to solve using the averaging method. As the accuracy of measurements increases and the intervals of discreteness of observations decrease, it becomes possible to study the spectral characteristics of the high-frequency part of the observations.

Methodology: For comparison, days where pulsations are clearly manifested, and days when there are no pulsations or they are minimal were selected. Since the pulsations are global in nature, seismo-gravimetric observations were taken at different points on the globe (Black Forest, Germany and Arti, Russia).



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

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

Discussion: Spectral analysis was carried out for these stations and the following results were obtained. Amplitude spectra were used for the evaluation of the analysis. The main carrier frequency is a frequency with a period within 5 – 9 s. A clear relationship between the frequency and amplitude of pulsations was noted.

Keywords: pulsations of gravity and seismic field; lunar-solar gravity variations; mass coronal ejections; meteor showers; seismic and gravimetric pulsation spectra.

For citation: Antonov Yu. V. High-frequency oscillations of non-tidal seismic-gravitational pulsations. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2022, no. 3, pp. 66–75. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2022/3/66-75>

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'sacii neprilivnykh sejsmo-gravitacionnykh variacij i vozmozhnye prichiny ih voznikovenija [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.)
2. Antonov Yu. V. Pul'sacii 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.)
3. 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.)
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. 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.)
7. Antonov Yu. V., Antonova I. Yu. Sejsmo-gravitacionnye pulsacii 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.)
8. 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.)
9. J. Boy, J. Hinderer, P. Gegout Global atmospheric loading and gravity. *Physics of the Earth Planetary Interiors*, 1998, vol. 109, pp. 161–177.
10. M. Camp, P. Vauterin Tsoft: Graphical and interactive software for the analysis of time series and Earth tides. *Computers & Geosciences*, 2005, vol. 31 (5), pp. 631–640.
11. 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.
12. Dikiy L.A. *Teoriya kolebaniy zemnoy atmosfery* [Theory of oscillations of Earth's atmosphere]. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1969, 194 p. (In Russ.)
13. Bychkov S. G., Dolgal A. S., Simanov A.A. *Vychislenie anomalii sily tyazhesti pri vysokotonykh gravimetricheskikh semakh* [Calculation of gravity anomalies in high-precision gravimetric surveys] Permian, UrO RAN publ., 2015, 143 p. (In Russ.)

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

Author have read and approved the final manuscript.