

**СИНХРОННОСТЬ И СЕЗОННОСТЬ ПУЛЬСАЦИЙ  
СИЛЫ ТЯЖЕСТИ И СЕЙСМИЧЕСКИХ БУРЬ****Ю. В. Антонов***Воронежский государственный университет*

Поступила в редакцию 15 декабря 2016 г.

**Аннотация:** *приведены результаты синхронных вариаций вертикальной составляющей сейсмического и гравитационного полей в гг. Владивосток, Воронеж (Россия) и неприливых вариаций силы тяжести в г. Бишкек (Кыргызстан). В гравитационном и сейсмическом полях наблюдаются пульсации. Пульсации неприливых вариаций силы тяжести и сейсмического поля существуют синхронно в указанных пунктах. Частотные характеристики также синхронны и тождественны. Возможно, пульсации обусловлены метеорными потоками. Наибольшая плотность метеорных потоков приурочена к зимним месяцам, чем и определяется сезонность пульсаций. Пульсации имеют периоды колебаний в пределах 0 – 20 мин.*

**Ключевые слова:** *лунно-солнечные вариации силы тяжести; неприливые вариации силы тяжести; корональные выбросы масс; метеорные потоки; пульсации; вертикальная составляющая сейсмического поля; сейсмический шум; спектр пульсаций*

**SYNCHRONY AND SEASONALITY OF THE  
PULSATIONS OF GRAVITY AND SEISMIC STORMS**

**Abstract:** *he results of synchronous variations of the vertical component seismic and gravitational fields in Vladivostok, Voronezh (Russia) and non-tidal variations of gravity in Bishkek (Kyrgyzstan). In gravitational and seismic fields of the observed pulsations. Ripple non-tidal variations of gravity and seismic fields exist simultaneously in these paragraphs. The frequency characteristics of the synchronous and identical. Perhaps the ripple is due to meteor streams. The highest density of meteor streams is confined to the winter months, which determines the seasonality of the pulsations. Pulsations have periods of the oscillations within 0 – 20 min.*

**Keywords:** *lunar-solar variations in gravity; non-tidal variations of gravity; coronal mass; meteor showers; ripple; vertical component of the seismic field the seismic noise; the spectrum of ripples*

**Введение**

В прошлом и настоящем велись и ведутся мониторинговые измерения гравитационного поля, которое меняется во времени. Прежде всего, обращают внимание на лунно-солнечные вариации силы тяжести, которые образуют волнообразный пакет колебаний. Кроме измеряемых лунно-солнечных вариаций силы тяжести существуют другие гравитационные колебания различной амплитуды и периодов, которые (колебания) образуются в недрах Земли, ближнем и дальнем космосе. Одним из таких проявлений могут служить пульсации гравитационного поля, выявленные автором [1 - 3] при анализе неприливых аномалий силы тяжести. Попытаемся объяснить природу выявленных пульсаций силы тяжести.

**Исходные данные****для анализа неприливых вариаций**

Исходным материалом для данной статьи послу-

жили мониторинговые наблюдения силы тяжести на Геодинамическом полигоне РАН в г. Бишкек (Кыргызстан) с помощью гравиметра SG – 5 AUTOGRAV (рис. 1). Прибор установлен в штольне с постоянной температурой около 8° примерно в 30 км от города, так что помехи техногенного характера практически отсутствуют. Привлечены измерения силы тяжести во Владивостоке, где используется приливной гравиметр gPhone (Micro – g – LaCoste). Гравиметрический пункт расположен в зоне перехода от азиатского континента к Тихому океану, на территории Морской экспериментальной станции Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН (мыс Шульца, залив Петра Великого, Японское море) [10]. Используются также сейсмические наблюдения в Воронеже (пункт Сторожевое ГС РАН в Центрально-Черноземном районе). Указанный пункт расположен в центре Русской платформы, где практически отсутствуют помехи, присущие тектонически активным регионам (гг. Биш-

кек и Владивосток). Для сравнения выбраны сейсмические данные из-за того, что мониторинговых гравиметрических данных на Русской платформе у автора нет [3]. Автор благодарит за предоставленные сейсмические и гравиметрические материалы Л.И. Надежку (ВГУ), М.Г. Валитова (ТИО ДВО РАН), А.К. Рыбина (ГП РАН).



Рис. 1. Расположение пунктов мониторинговых наблюдений сейсмического и гравитационного полей.

### Методика обработки и интерпретации неприливых вариаций силы тяжести

Наблюдаемые значения силы тяжести представляют собой лунно-солнечные вариации, осложненные региональным фоном (чаще линейным). Региональный фон обусловлен смещением нуля-пункта прибора, а также влиянием внешних факторов [2]. Чтобы получить неприливную вариацию силы тяжести необходимо удалить лунно-солнечные вариации и фон. После соответствующей обработки [2, 3] наблюдаемых вариаций силы тяжести получена так называемая

неприливая вариация силы тяжести (рис. 2а). Данная вариация (рис. 2а) представляет собой кривую высокочастотных колебаний, которые в свою очередь модулируются более длиннопериодными колебаниями. Был проведен спектральный анализ неприливной вариации (рис. 2а), результаты которого представлены на рис. 3а. На периодограмме спектра (рис. 3а) очень четко выделяется максимум с периодом 12 ч 29 мин. (749 мин.), на несколько порядков превышая остальные максимумы. В сторону увеличения периодов

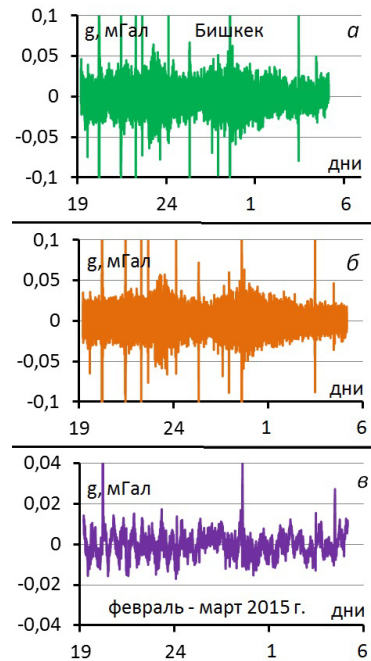


Рис. 2. Вычисление пульсаций силы тяжести: а – пульсация силы тяжести после исключения лунно-солнечных вариаций и нуля-пункта гравиметра; б – пульсация, полученная методом осреднения; в – осредненная неприливая вариация силы тяжести.

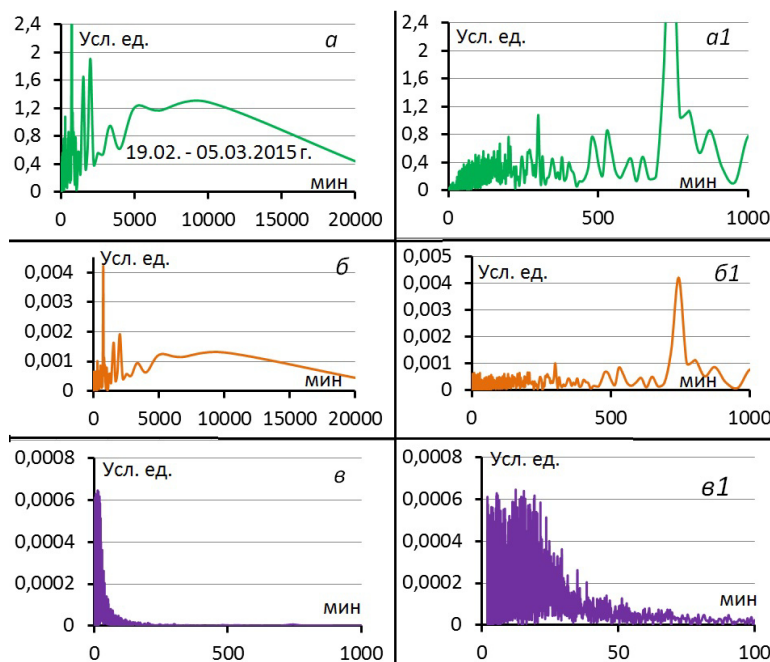


Рис. 3. Периодограммы пульсаций силы тяжести при наличии пульсации (февраль - март 2015 г., Бишкек): а – периодограмма пульсации силы тяжести после исключения лунно-солнечных вариаций и нуля-пункта гравиметра; б - периодограмма осредненной неприливной вариации силы тяжести; в – периодограмма пульсации силы тяжести, полученной методом осреднения.

выделяются более слабые максимумы 1082, 1391 и 1947 мин. В сторону уменьшения периодов амплитуды колебаний резко падают и начинают слабо возрастать лишь в интервале 2 – 20 мин. (рис. 3б).

Природа модулирующих колебаний достаточно ясна. Период 12 ч 29 мин. близок к полусуточной волне лунно-солнечных колебаний M2. Но ведь при вычислении неприливной вариации силы тяжести (рис. 2а) с помощью расчетов были удалены лунно-солнечные вариации. Следовательно, используемые в программном комплексе гравиметров формулы или не обеспечивают полного учета лунно-солнечных вариаций силы тяжести, или причина кроется в чем-то другом. Попытаемся выделить пульсацию с помощью метода осреднения [2]. В результате этой операции получены пульсация (рис. 2б) и осредненные значения неприливной вариации (рис. 2в).

На рис. 3 приведены периодограммы пульсаций (рис. 3а, б), полученные классическим способом и методом осреднения. Необходимо отметить, что для пульсации (рис. 3а) выделяются четко длинноволновые периоды 1675, 3551 и 6702 мин., кратные между собой. Те же самые периоды характерны для аномалии рис. 3в), полученной методом осреднения. Короткопериодная часть периодограмм до 1000 мин. (рис. 3, а1 б1) по форме практически полностью повторяют друг друга. Период лунно – солнечной волны (745 мин.) отмечается четко и в том и другом случаях. Что же касается периодограммы для пульсации (рис. 2в), полученной методом осреднения, то она представлена периодами колебаний в пределах 4 – 20 мин. (рис. 3в), распадаясь на два типа колебаний с периодами в интервале 4 – 10 и 12 – 20 мин (рис. 3в1). На указанных периодах более подробно остановимся ниже.

Отметим также что, при использовании метода осреднения появляется возможность вычисления пульсаций без промежуточных операций по учету лунно-солнечных вариаций и нуля-пункта. Поскольку пульсации силы тяжести имеют те же периоды, что и остаточные неприливно-вариации [1, 2], то способ осреднения можем использовать для вычисления пульсаций напрямую по наблюдаемым значениям. В данном конкретном случае использовали осреднение с размером скользящего окна 10 мин. Наиболее оптимальный вариант осреднения с интервалом 5 – 10 мин., что легко выявить на расчетных лунно-солнечных вариациях. Добавим, что вычисление остаточных неприливных вариаций можно сделать с помощью сплайн-сглаживания, на что указывалось в [1-3] Предпринималась попытка разделения с помощью преобразования Гильберта – Хуанга [11, 14], но результаты оказались худшими по сравнению с методами осреднения и сплайн-сглаживания.

Методика выделения пульсаций важна еще тем, что она может быть использована при выделении «сейсмических бурь» [8,12]. Земля создает постоянные сейсмические колебания, которые регистрируются непрерывно сейсмографом и называются сейсмическим шумом. Амплитуда этих колебаний очень ма-

ла, но в отдельные моменты амплитуда их вдруг увеличивается на несколько порядков. Такие увеличения амплитуд шумов называют «сейсмическими бурями». Сейсмические бури могут длиться несколько дней и хорошо идентифицируются [8, 12].

Хотя для измерения сейсмического и гравитационного полей в качестве датчика служит вертикальный сейсмограф Б.Б. Голицина, путь для исправления измерений сейсмографа за счет влияния Луны и Солнца более сложен. Частично этот вопрос изложен в [4]. Суть разницы между измерениями гравиметром и сейсмографом заключается в следующем. Для измерения силы тяжести фиксируем длину растяжения пружины вертикального сейсмографа, так как величина деформации пружины (при небольших деформациях) прямо пропорциональна изменению силы тяжести. Для измерения сейсмического поля мы регистрируем скорость растяжения пружины. В этом случае нельзя напрямую использовать расчеты притяжения Луны и Солнца. Допустим, что сейсмических событий нет. В этом случае пружина сейсмографа будет растягиваться или сжиматься под действием Луны и Солнца, а сейсмический прибор будет регистрировать скорость перемещения пружины. Если для гравиметра максимум притяжения Луны и Солнца соответствует при наличии этих объектов в зените, то для сейсмического поля это минимальное значение, а максимальное значение будет при минимальном значении приливной силы тяжести, когда есть наибольший градиент изменения вариации силы тяжести. Таким образом, за счет изменения приливной силы тяжести возникает дополнительное «сейсмическое» поле, которое сдвинуто по фазе относительно приливной волны на  $90^{\circ}$  и складывается с реальным полем. Условно говоря, для гравиметра поправка за притяжение Луны и Солнца имеет косинусоидальный вид, а для сейсмографа – синусоидальный. Чтобы исключить влияние Луны и Солнца, необходимо продифференцировать вариацию силы тяжести и полученную кривую сравнить с сейсмическим полем на участках, где нет пульсаций и других сейсмических событий. Найдя калибровочный коэффициент между дифференцированной кривой вариаций силы тяжести и сейсмическим полем, внесем соответствующие поправки в исходное сейсмическое поле [4]. Можно поступить и наоборот. Для этого необходимо проинтегрировать кривую сейсмического поля и вычесть из результата интегрирования расчетные значения лунно-солнечных вариаций силы тяжести. Остаточная аномалия после вычитания будет некоторой трансформантой сейсмического поля. Но для сравнения с гравитационным полем лучше использовать сейсмическое поле, поэтому мы остановились на первом варианте.

### Обсуждение результатов

На рис. 4 представлены графики мониторинговых наблюдений гравитационного и сейсмического полей (рис. 4а, 4в), а также вычисленные пульсации этих полей с помощью метода осреднения (рис. 4б, 4г).

Под пульсацией сейсмического поля подразумевается сейсмическая буря. На рис. 4 однозначно просматривается, что сейсмические и гравитационные пульсации совпадают по времени. Но самое замечательное в том, что здесь пульсация силы тяжести (рис. 4а) даны для Бишкека, а сейсмические (рис. 4в) – для Воронежа. Таким образом, пульсации разных полей не толь-

ко совпадают по времени между собой, но и носят планетарный характер. Дополнительным подтверждением этому служит сравнение сейсмических и гравитационных пульсаций во Владивостоке, Бишкеке и Воронеже (рис. 5, 6). Кроме того, пульсации из года в год повторяются. На рис. 7 представлены графики пульсаций гравитационного и сейсмического полей за

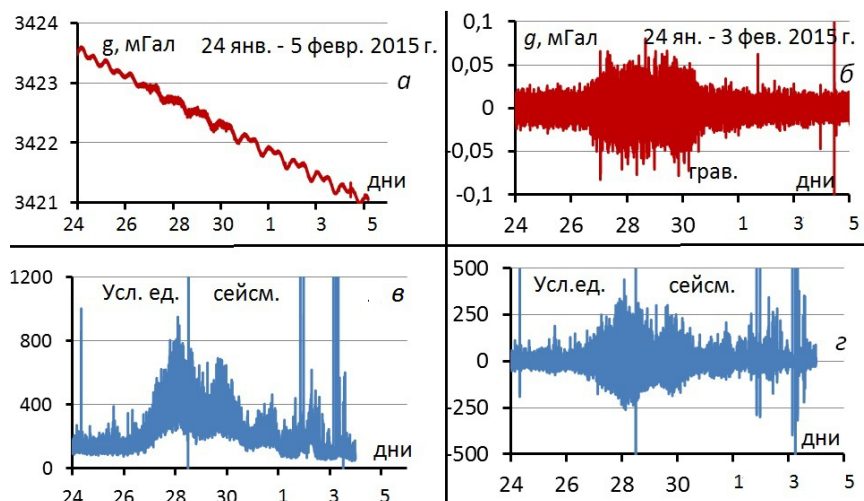


Рис. 4 Пульсации непривных вариаций силы тяжести и сейсмического поля: а – наблюдаемые вариации силы тяжести; б – пульсации силы тяжести; в – наблюдаемые вариации сейсмического поля (сейсмическая буря); з – пульсация сейсмического поля.

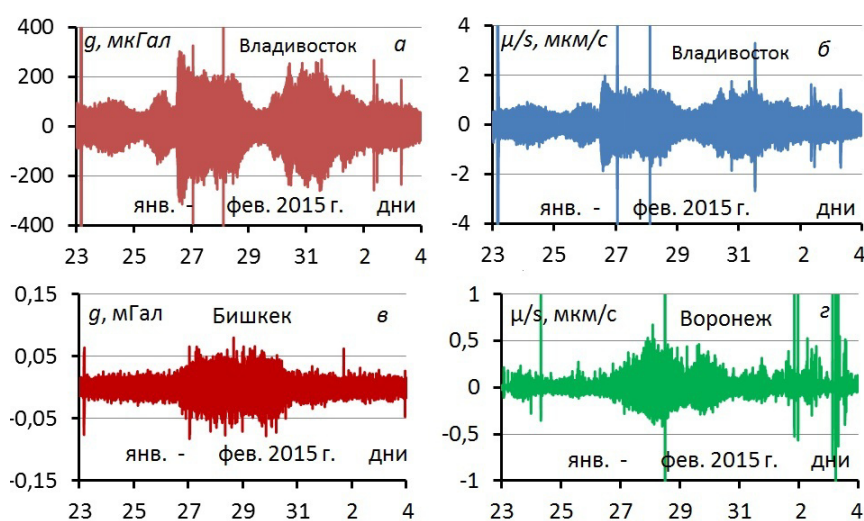


Рис. 5. Сравнение пульсаций сейсмического и гравитационного полей во Владивостоке, Бишкеке и Воронеже в январе 2015 г.: а – пульсации силы тяжести во Владивостоке; б – данные акселерометра во Владивостоке; в – пульсации силы тяжести в Бишкеке; з – пульсации сейсмического поля в Воронеже.

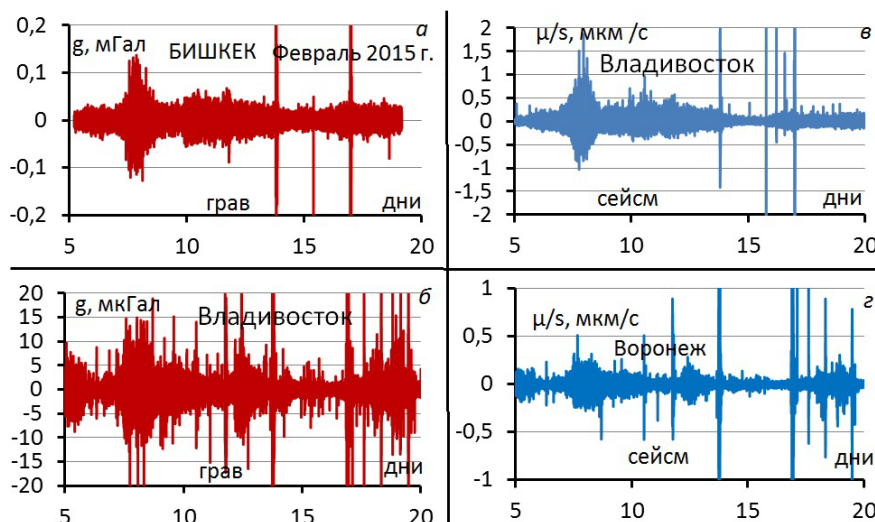


Рис. 6. Сравнение пульсаций сейсмического и гравитационного полей во Владивостоке, Бишкеке и Воронеже в феврале 2015 г.: а – пульсации силы тяжести во Владивостоке; б – данные акселерометра во Владивостоке; в – пульсации силы тяжести в Бишкеке; з – пульсации сейсмического поля в Воронеже.

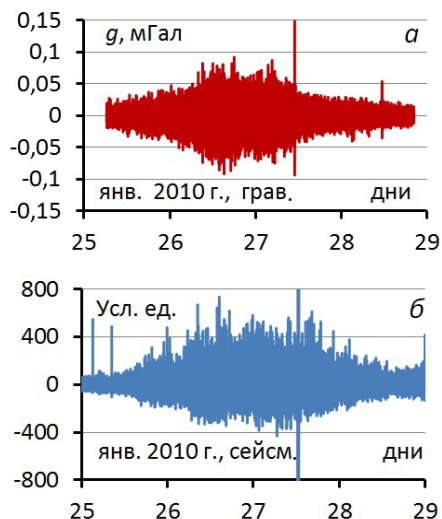


Рис. 7. Сравнение пульсаций сейсмического и гравитационного полей в Бишкеке и Воронеже в январе 2010 и 2015 гг.: а – остаточные пульсации силы тяжести; б – пульсации сейсмического поля.

январь 2010 г. Они идентичны пульсациям за январь 2015 г. (рис. 4б, 4г). За все промежуточные годы между 2010 – 15 гг. пульсации остаются теми же, немного изменяясь по амплитуде.

Вернемся к спектрам и периодограммам гравитационных пульсаций (рис. 8). Спектры на рис. 8 даны для наблюдений вариаций, представленных на рис. 4. Они имеют относительно «высокочастотные» периоды (не более 25 мин.). Природа их пока не понятна. Возможно, эти колебания можно связать с внутренними гравитационными волнами в атмосфере [9], где указано, что их периоды не превышают 20 минут. Внутренние гравитационные волны обусловлены силой тяжести. Возникают они (волны) в результате изменения плотности воздуха с высотой, когда в условиях устойчивой температурной стратификации атмосферы на элементарный объем воздуха, сдвинувшийся по каким-либо причинам вверх или вниз, действует возвращающая сила. Скорость распространения таких волн изменяется от десятков до сотен

метров в секунду, длина достигает нескольких десятков километров и более. В нижней атмосфере амплитуды гравитационных волн невелики, однако в верхних слоях они растут вместе с уменьшением плотности воздуха. На высотах свыше 60 км может начаться быстрый нелинейный рост амплитуды волны, приводящий к ее обрушению. При этом импульс и энергия волны передаются хаотически движущимся молекулам атмосферы, что изменяет температуру воздуха и скорость ветра. Данный процесс позволяет объяснить существование холодной летней и теплой зимней мезопаузы на высоте около 80 км. К гравитационным волнам относят также атмосферные приливы (суточный и полусуточный), которые возникают во вращающейся атмосфере вследствие неравномерного во времени поглощения солнечной радиации озоном и водяным паром.

С другой стороны колебания сейсмических пульсаций имеют те же самые периоды. В вопросе о причине микросейсм большинство исследователей [8, 12] придерживаются единой точки зрения, считая, что микросейсмы первого и второго ряда возникают преимущественно в результате передачи энергии морских волн в земную кору.

По поводу механизма генерации микросейсм существует несколько гипотез [8, 12]. Были высказаны идеи об образовании микросейсм в результате удара морских волн о крутые берега и о возбуждении микросейсм в результате передачи энергии морских волн на дно океана в центре циклона, в какой бы части океана он ни находился, об образовании микросейсм стоячими волнами на поверхности водных бассейнов. Области генерации микросейсм в соответствии с механизмом их образования приурочены к прибрежным зонам. Самым спорным вопросом в проблеме микросейсм остается их волновая структура. Считалось, что микросейсмические волны являются исключительно поверхностными волнами, но затем было установлено, что во внутриконтинентальных пунктах значительная часть микросейсм относится к объемным продольным волнам.

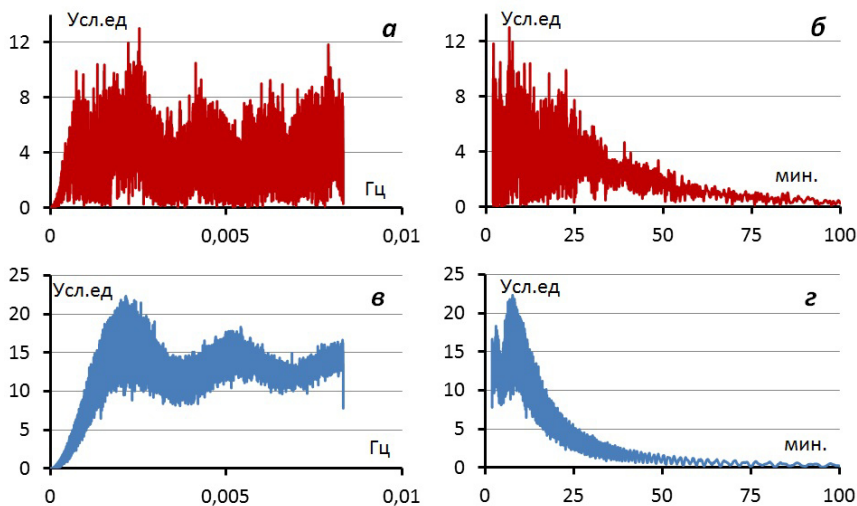


Рис. 8. Сравнение спектров и периодограмм пульсаций сейсмического и гравитационного полей в Бишкеке и Воронеже в январе 2010 г.

Периоды морских волн не определяют полностью периодов микросейсм, а являются лишь одним из многих факторов, влияющих на спектр микросейсм. Отношение периодов морских волн к периодам микросейсм фактически варьируют в весьма широких пределах. Форма спектра микросейсм определяется главным образом строением земной коры на пути распространения и в пункте наблюдения микросейсмических волн, спектром морского волнения и глубиной воды в зоне образования микросейсм.

Изучение условий распространения микросейсм первого рода позволило выявить их слабое затухание при распространении в континентальной земной коре. Условия распространения микросейсм второго рода практически еще не изучены.

Таким образом, микросейсмсы первого рода, получившие в диапазоне периодов 4-6 с название штормовых, являются основным низкочастотным шумом континентальной поверхности Земли.

В результате можно констатировать, что неприливные вариации силы тяжести, внутренние гравитационные волны в атмосфере и микросейсмические волны в земной коре связаны между собой. Рассмотрим возможную иерархию взаимоотношений между указанными процессами. По-видимому, первопричиной всему служат метеорные потоки в солнечной системе [5, 7]. Появление пульсаций силы тяжести носит периодический характер, появляясь ежегодно в определенное время. Ранее [5] на многих примерах показано, что пульсациям силы тяжести предшествуют метеорные потоки. Существуют ли другие источники возникновения пульсаций силы тяжести, исключая Луну и Солнце? Планеты солнечной системы создают переменное поле силы тяжести, но даже во всей своей совокупности они не могут создать волну заметной амплитуды, которую могли бы измерить гравиметром. Изменения силы тяжести могут возникнуть за счет нутации земной оси Земли, но эти волны имеют период 18.6 лет. Возможно возникновение пульсаций в результате корональных выбросов [6, 7, 13]. Но механизм образования колебаний в этом случае несколько другой. Не исключено, что существуют колебания, приходящие из ближнего космоса, которые можно измерить современными гравиметрами, но пока ничего не обнаружено, да и попыток по их обнаружению не предпринималось.

При корональных выбросах предполагается, что в плазме, окружающей Солнце, поток заряженных частиц возбуждает магнитогиродинамические волны, которые, достигая ионосферы, превращаются в электрические волны. Далее возникшее электромагнитное поле оказывает влияние уже на Землю. Основным барьером для распространения корональных выбросов служит ионосфера. Для метеорных потоков ионосфера не является фильтром, поскольку почти все частицы в метеорном потоке не заряжены, и они ударяют по атмосфере Земли, вызывая пульсации силы тяжести и сейсмические колебания в атмосфере и Земле. Но главное, что пульсации гравитационного и

сейсмического полей синхронны.

В пульсациях гравитационного и сейсмического полей проявляется четкая сезонность. Пульсации проявляются в основном в осенне-зимний период. Но Земля пересекает метеорные потоки в течение всего года. В весенне-летний период наблюдаются наиболее яркие метеорные дожди. Например, наиболее зрелищный метеорный поток Персеиды (середина августа месяца) практически не вызывает пульсаций (их может заметить очень опытный наблюдатель), а вот потоку Центаврид (февраль месяц), у которого зенитное число на два порядка меньше, чем у Персеид, соответствуют интенсивные и длительные пульсации. Это объясняется следующими факторами. Мощность (плотность) метеорного потока в астрономии, так сложилось исторически, оценивается зенитным часовым числом – количеством наблюдаемых метеоров за час. Наблюдаемые метеоры создаются наиболее крупными частицами, а плотность метеорного потока чаще определяется мелкими частицами. Кроме того, метеорные потоки делятся по ориентации к движению Земли на догоняющие и встречные, так что момент силы удара зависит от скорости потока и угла его встречи с Землей. Кстати, отметим также, что возможны не только сезонные пульсации, но и многолетние.

Сезонность пульсаций сейсмического поля дала повод сейсмологам назвать причиной появления сейсмических пульсаций только за счет проходящих в атмосфере северного полушария природных явлений типа циклонов, ураганов и т.д. [8, 12]. Но сейсмологи лукавят. Нужно было придумать слабое затухание при распространении микросейсм в континентальной земной коре. Кроме того, по статистике две трети ураганов, циклонов и других катастрофических катаклизмов в природе происходит в весенне-летний период, когда пульсаций практически нет. К тому же сейсмическим бурям, проходящим в северном полушарии зимой, соответствуют синхронно бури в южном полушарии, где в это время лето. Данные рассуждения не отвергают существование микросейсмических колебаний от процессов, происходящих в мировом океане, но указанные возмущения не носят периодического характера и появляются в прибрежной зоне с возникновением тайфунов, ураганов и т.д.

### Заключение

Связь между пульсациями гравитационного и сейсмического полей однозначна и носит глобальный характер на земном шаре. Дальнейшее изучение пульсаций позволит установить более четко их физическую природу, чтобы использовать их для глубинного изучения Земли, а также для изучения метеорных потоков. В прикладном плане изучение пульсаций внесет определенные коррективы в методику высокоточных измерений силы тяжести. Подобные гравиметрические (по аналогии с магнитными) «бури», которые произошли в январе – феврале 2015 г. (рис. 5–8) могут на интервале в несколько суток свести на нет результаты высокоточных гравиметрических измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов, Ю. В. Пульсации неприливых вариаций силы тяжести / Ю. В. Антонов // Известия ВУЗов. Геология и разведка. – 2014. – № 5. – С. 54–57.
2. Антонов, Ю. В. Разделение неприливых вариаций силы тяжести на основе спектрального анализа и метода осреднения / Ю. В. Антонов // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. – 2016. – № 2. – С. 100–106.
3. Антонов, Ю. В., Синхронные пульсации в неприливых вариациях гравитационного и сейсмического полей / Ю. В. Антонов, И. А. Сизаск // Известия ВУЗов. Геология и разведка. – 2015. – № 5. – С. 46–52.
4. Антонов, Ю. В., Сравнение приливных вариаций силы тяжести и вертикальной составляющей сейсмографа / Ю. В. Антонов, И. Ю. Антонова // Геофизика, 2013. – № 2. – С. 27–31.
5. Антонов, Ю. В. Возможная природа пульсаций неприливых вариаций силы тяжести / Ю. В. Антонов // Экологический вестник научных центров ЧЭС. – 2015. – № 4. – С. 5–13.
6. Богачёв, С. А., Солнечные вспышки / С. А. Богачёв, А. С. Кириченко // Земля и Вселенная, 2013. – № 5. – С. 3–15.
7. Метеоры. [Электронный ресурс]. <http://oko-planet.su/science/sciencocosmos/104838> (Дата обращения 15.06.2016).
8. Монахов Ф. И. «Низкочастотный сейсмический шум Земли / Ф. И. Монахов. – М.: Наука. – 1997. – 94 с.
9. Дикий, Л. А. Теория колебаний земной атмосферы / Л. А. Дикий. – Л.: Гидрометеоздат. – 1969. – 195 с.
10. Прошкина, З. Н. Изучение приливных вариаций силы тяжести в зоне перехода от континента к Японскому морю / З. Н. Прошкина, М. Г. Валитов, Р. Г. Кулинич, Т. Н. Колпащикова // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2015. – № 3. – Вып. 27. – С. 71–79.
11. Рапопорт, М. Б. Вычислительная техника в полевой геофизике: учебник для вузов / М. Б. Рапопорт - М.: Недра. – 1993. – 350 с.
12. Рыкунов, Л. Н. Микросейсмы / Рыкунов Л. Н. // М.: Наука, 1967. – 86 с.
13. Timothy, H. Stealth Coronal Mass Ejections / H. Timothy [et al.] // Perspective Solar Physics. – 2013. – С. doi: 10.1007/s11207-012-0217-0.
14. Huang, N. E. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis/ Huang N. E. [et al.] // Proc. R. Soc. Lond. A. – 1998. – Т. 454. – С. 903–995.

Воронежский государственный университет

Антонов Юрий Васильевич, профессор кафедры геофизики  
E-mail: yuriyantono@yandex.ru  
Тел.: 8 (4732) 208-385

Voronezh State University

Antonov Yu. V., Professor of Geophysical Department  
E-mail: yuriyantono@yandex.ru  
Tel.: 8 (4732) 208-385