

СТРУКТУРА НЕПРИЛИВНЫХ ВАРИАЦИЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Ю. В. Антонов

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 15 января 2015 г.

Аннотация: в статье рассмотрен анализ мониторинговых измерений силы тяжести в г. Бишкеке (Киргизстан). Наблюдаемые приливные изменения силы тяжести отличаются от теоретических значений притяжения Луны и Солнца. Разность между измеряемыми и теоретическими значениями силы тяжести является неприливыми вариациями силы тяжести. Сделано предположение, что неприливые вариации силы тяжести зависят от солнечной активности. Обнаружены нутации Земли. Источником неприливых вариаций могут служить корональные выбросы масс солнцем. Высказаны предположения о влиянии земных и космических процессов на образование неприливых вариаций силы тяжести. Указанное обстоятельство может служить критерием краткосрочного прогноза землетрясений.

Ключевые слова: неприливые вариации силы тяжести, корональные выбросы масс, нутации Земли, землетрясения, прогноз землетрясений.

THE STRUCTURE NON-TIDAL VARIATIONS OF GRAVITY

Abstract: in the article the monitoring measurements of gravity in Bishkek (Kyrgyzstan) was analyzed. The observed tidal variations of gravity differ from the theoretical values of the attraction of the Moon and Sun. The difference between the measured and theoretical values of gravity is non-tidal variations of gravity. Obviously, the source non-tidal variations are the coronal mass ejection (CME) by the sun. The assumption was made that no tidal variations of gravity depend on solar activity. Found nutation of the Earth. Source non-tidal variations can serve as the coronal mass emissions by the sun. The propositions about the influence of the terrestrial and cosmic processes in education non-tidal variations of gravity. This could serve as a criterion of short-term earthquake prediction.

Key words: not-tide oscillations variations of gravity, coronal mass emissions, nutation of the Earth, earthquakes, earthquake prediction.

Введение

Ранее автором статьи [1–6] уже определялось, что под неприливыми вариациями силы тяжести понимается остаточная часть вариаций после вычитания из наблюдений гравиметра приливных лунно-солнечных вариаций, рассчитанных с помощью формул. Кстати, в гравиметрах SG - 5 AUTOGRAV для учета лунно-солнечных вариаций в программном пакете заложена формула Лонгмана [7], которая сохраняет при разложении в ряд члены второго порядка и обеспечивает хорошую точность. Понятно, что неприливые вариации содержат в себе космическую и земную составляющие. Помимо эндогенных геодинамических процессов, происходящих в недрах Земли, на изменения гравитационного поля могут влиять также солнечный ветер, корональные выбросы масс Солнцем, космическое излучение и другие факторы.

Методика наблюдений и обработки вариаций силы тяжести

В предыдущих работах [1–3] анализировались стационарные записи гравиметров (шаг 30 сек) примерной длительности в 8 дней, что обуславливалось ограниченной памятью записывающего устройства. Это обстоятельство позволяло изучать вариации силы

тяжести с периодом от нескольких минут до полутора суток. Выявление более долгопериодных вариаций невозможно из-за ограниченности рядов измерений во времени. Попытки объединения недельных интервалов наблюдений по ряду причин не привели к положительному результату. К сожалению, небольшие перерывы (10–20 мин) из-за смены флеш-накопителей в работе гравиметра приводят к значительным изменениям в гравиметрической системе, которые трудно совместить между собой даже между ближайшими интервалами. Поэтому были проведены наблюдения с шагом 2 мин. Конечно, какая-то информация в верхней части частот теряется, но зато появляются возможности по изучению низкочастотной части спектра.

На рис. 1 приведены наблюдения неприливых вариаций силы тяжести с декабря 2013 по март 2014 гг. За указанный период были проведены три серии наблюдений по длительности чуть более месяца каждая. Кривые неприливых вариаций представлены после соответствующей обработки: исключены лунно-солнечные вариации силы тяжести [15], учтен линейный фон за счет сползания нуля-пункта гравиметра [1] и сделаны поправки за запаздывание приливной волны на суше [5]. Обращает на себя внимание (рис. 1),

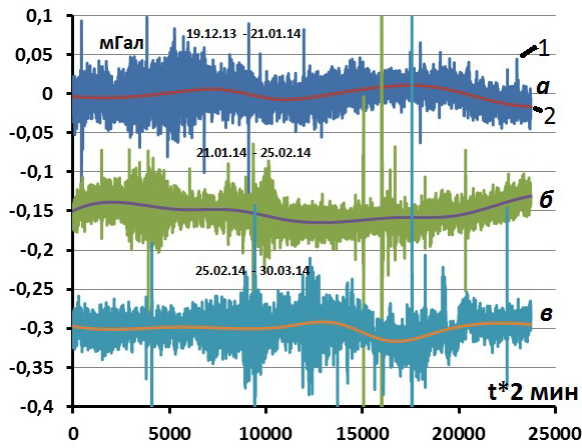


Рис. 1. Характер изменения непрививных вариаций силы тяжести за период с 19 декабря 2013 г по 30 марта 2014 г. а, б, в – остаточные вариации силы тяжести на месячных интервалах; 1 – остаточная непрививная аномалия силы тяжести после учета линейного нуля-пункта и введения поправки за запаздывание непрививной волны; 2 – сглаженные значения непрививной вариации, полученные с помощью сплайна.

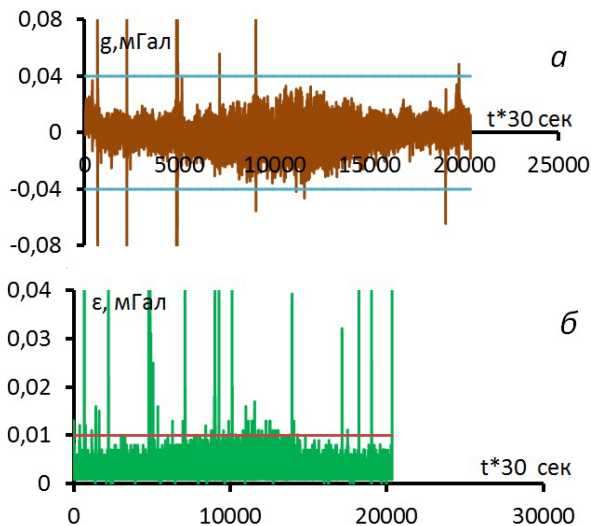


Рис. 2. Пульсация непрививных вариаций силы тяжести за период с 11 мая по 18 мая 2012 г. а – остаточная непрививная вариация; б – стандартное отклонение на интервале 30 сек, определенное прибором.

что графики непрививных вариаций носят пилообразный характер. Пилообразность графиков не является результатом погрешности наблюдений. Такая пилообразность наблюдений обусловлена преимущественно собственными колебаниями Земли [1 – 5, 8 – 10], где основным колебанием является часовой период. В нашем случае предметом исследования являются периоды гораздо большей длительности, поэтому на данном вопросе не будем более подробно останавливаться.

Среднеквадратическая погрешность измерений силы тяжести у гравиметра составляет около $\pm 0,001$ мГал, а амплитуда колебаний непрививных вариаций колеблется в пределах от $\pm 0,02$ до $\pm 0,05$ мГал, что в 20–50 раз превышает погрешность измерения. О несоответствии между техническими характеристиками гравиметров и реально измеренными значениями силы тяжести обращалось внимание еще давно. Наиболее четко этот вопрос изложен в статье М. А. Каршенбаума [11], который проводил работы на Украинском

щите, где сейсмогенная обстановка стабильна. Те же результаты были получены на Воронежском массиве при измерении вертикального градиента силы тяжести [4]. Надо отметить, что имеется существенная разница между наблюдениями силы тяжести при наземных измерениях и при записи временных изменений силы тяжести. При наземных наблюдениях среднеквадратическая погрешность наблюдений приближается к технически возможной точности гравиметра с увеличением кратности наблюдений. При записи вариаций силой тяжести мы не можем произвести повторных кратных наблюдений.

Гравиметр SG - 5 AUTOGRAV одновременно с записью изменений силы тяжести определяет среднеквадратичное отклонение изменения силы тяжести. На рис. 2 представлены изменения силы тяжести и среднеквадратичного отклонения за период 11.05 – 18.05.2012 г. Интервал наблюдения – 30 сек. Среднее значение вариации силы тяжести определяется, как среднее значение за 30 сек. Следовательно, среднеквадратичное отклонение содержит в себе не только случайную составляющую, но составляющую от изменения силы тяжести. Таким образом, величина, именуемая стандартным отклонением, в полной мере не является таковой. Тем не менее, кривая на рис. 2-а достаточно интересна. Вначале записи интервал изменения кривой составляет $\pm 0,02$ мГал, затем увеличивается примерно до $\pm 0,04$ мГал и вновь возвращается к той же величине $\pm 0,02$ мГал. Это так называемая пульсация силы тяжести [2]. Примерно также ведет себя среднеквадратичное отклонение (рис. 2-б), увеличиваясь к середине интервала и имея значение около $\pm 0,01$ мГал. За указанный период никаких землетрясений не было, а ведь по времени эта пульсация заняла трое суток.

Наконец, отметим, что подобное соотношение между технической погрешностью гравиметра и амплитудой изменения непрививной вариации наблюдается под г. Саратовым. Имеющийся материал не велик, поэтому трудно судить о том, насколько в Бишкеке, амплитуда непрививных вариаций больше. Бишкек находится в альпийской складчатой зоне, где достаточно часто случаются сейсмические события, но они имеют различный по времени и форме характер.

Вернемся к рис. 1. Визуально на всех трех графиках (рис. 1, кривые 1), несмотря на изрезанность графиков, отмечается плавное изменение остаточных вариаций. Поэтому возникает естественное желание провести осреднение. На рис. 1 (кривые 2) приведены графики сплайн-сглаживания непрививных вариаций, на которых четко просматривается изменение непрививных вариаций во времени (подробности выбора в пользу сглаживания сплайнами обсудим ниже). При этом изменение сглаженных кривых носит четко выраженный нелинейный характер (рис. 1). Поэтому при обработке наблюдаемых измерений исключался только линейный фон. Гравиметр имеет двойное термостатирование и стоит в штольне с одинаковой круглогодичной температурой около 8° . Наверное, есть все основания считать, что смещение нуля-пункта у гравиметра близко к линейному смещению. Тем не менее, нет полной уверенности в том, что, исключая линейный фон, мы не исключаем какую-то компоненту

длиннопериодных вариаций.

Рассмотрим отдельно более подробно, например, график изменения неприливной вариации силы тяжести на рис. 1-а за период 19.12.2013 – 21.01.2014 г. Указанный график заново приведен на рис. 3-в. На фоне графика неприливной вариации силы тяжести наблюдается плавная кривая сглаженных значений вариации, полученная с помощью сплайна. На рис. 3-б представлена кривая среднего значения вариации, полученного с помощью осреднения в скользящем окне. Кривая простого осреднения в значительной степени отличается от кривой сплайн-сглаживания. Чтобы получить при обычном осреднении такую же гладкую кривую вариации, как и при сплайн-сглаживании необходимо скользящее окно увеличить до 5–8 часов, а это идет к потере большей части информации на концах графика. А в целом любое сглаживание ведет к искажению полезного сигнала. Если скользящее окно осреднения невелико, то искажения полезного сигнала незначительны, но подавление случайных погрешностей в этом случае тоже неполное. При желании большего подавления помех (увеличение размеров окна) сразу же возникают искажения полезного сигнала, на что указывал еще А. К. Маловичко [12], а вслед за ним очень многие исследователи.

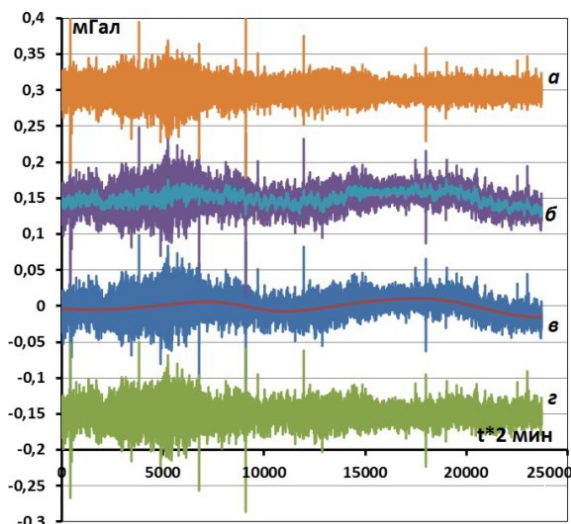


Рис. 3. Изменение неприливных вариаций силы тяжести за период с 19 декабря 2013 г по 21 января 2014 г. *а* – остаточная вариация силы тяжести после вычитания осредненных значений, полученных с получасовым интервалом осреднения; *б* – осредненные значения неприливных вариаций силы тяжести на получасовом интервале на фоне неприливной вариации; *в* – изменение остаточных вариаций, полученных с помощью сплайн-сглаживания на фоне неприливной вариации; *г* – остаточная вариация силы тяжести после вычитания сплайн-сглаженных значений.

Из неприливной вариации силы тяжести были исключены значения простого осреднения (рис. 3-а) и сплайн-сглаживания (рис. 3-г). Внешне остаточные неприливные вариации силы тяжести практически не отличаются друг от друга. Но после применения преобразования Фурье различия в вариациях стали очень заметными. Амплитудный спектр исходной кривой (рис. 3-в) содержит в себе весь набор частот, характерных для обычных спектров неприливных вариаций

силы тяжести (рис. 4-а). Для спектра остаточной неприливной вариации силы тяжести (рис. 3-г), полученной с помощью сплайн-сглаживания, амплитуды уменьшились на порядок (рис. 4-б), графики стали более четкими. Например, период в районе 10000 мин очень четко локализован. Очевидно, период на спектральной кривой (рис. 4-а) осложнен периодом 11–12 тыс. мин, который связан со сплайн-сглаживающей кривой, которая была удалена. В результате максимум этот появился в спектре отдельно для сплайн-сглаживающей кривой (рис. 4-г).

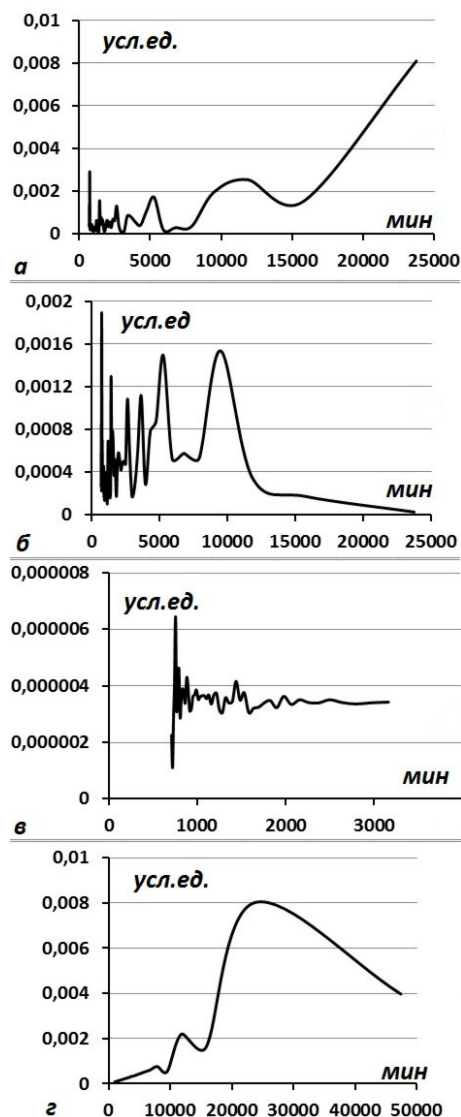


Рис. 4. Амплитудно-частотные спектры неприливной вариации силы тяжести и ее трансформаций. *а* – спектр неприливной вариации силы тяжести за время с 19 декабря 2013 г по 21 января 2014 г. для исходных значений на рис. 1-а (кривая 1); *б* – спектр неприливной вариации после исключения сплайн-сглаженных значений, приведенных на рис. 2-г; *в* – спектр неприливной вариации после исключения осредненных значений, полученных с получасовым интервалом осреднения (рис. 2-а); *г* – спектр неприливной вариации сплайн-сглаженных значений, приведенных на рис. 1-а (кривая 2).

Результаты интерпретации

Относительно спектра неприливных вариаций (график на рис.3-а), полученного с помощью осреднения, отметим следующее. Во-первых, амплитуда спектра (рис. 4-в) на три порядка меньше по сравне-

нию с амплитудой на предыдущих спектрах (рис. 4-а, б). Во-вторых, при сравнении с другими спектрами не наблюдается совпадение пиковых периодов, т. е. практически отражает белый шум. Это объясняется тем, что осредненные значения в скользящем окне с небольшим временным интервалом мало искажают полезный сигнал, а случайная составляющая ослабляется в значительной степени. Поэтому в результате разности между исходными и осредненными данными остается только разность исходных и сглаженных погрешностей. Хотя, если сравнивать графики на рис. 3-а и рис. 3-в внешне, то они вроде бы мало отличаются, но если увеличить масштаб графиков, то разница становится заметной.

Наконец, перейдем к спектру сплайн-сглаженных значений (рис. 4-г). На графике выделяется всего лишь два максимума. Их значения равны 10 и 14 суток. Такие периоды близки к периодам, связанным с нутациями Земли. Теоретические значения периодов нутаций Земли вычисляются с высокой точностью: 9,1; 13,7 и 27,3 суток, 6 мес., 1 год и 18,6 лет. Но на практике эти периоды в силу ряда причин [13] вычисляются ненадежно. Так что полученные периоды, да к тому же на ограниченном материале, близки к периодам нутаций. Кроме того, интервал наблюдений не позволяет выделять уже период в 27,3 сут.

Рассмотрим ещё раз график непривливых вариаций силы тяжести (рис. 3-г). Примерно первая половина интервала наблюдений имеет пульсирующий характер, вторая половина – наоборот спокойная. Такое пульсирование отмечается практически на всех графиках непривливых вариаций (рис. 1). Наиболее классический пример приведен на рис. 2. По форме (не по содержанию) такие пульсации напоминают магнитные [14]. Скорее всего, такой характер изменения остаточной аномалии силы тяжести определяется активностью Солнца. По данным американского спутника SOHO (они доступны в Интернете) вторая половина декабря 2013 г. характеризуется исключительно резкими изменениями рентгеновского излучения и соответственно частыми корональными выбросами масс. В первой половине января 2014 г. космическая погода была на редкость спокойной.

Были вычислены амплитудно-частотные характеристики отдельно для пульсирующей и спокойной частей непривливой вариации (рис. 5). Для наглядности график частот разбит на две части: интервал 1000 – 4000 мин. (рис. 5-а) и 400 – 1000 мин. (рис. 5-б). Для пульсирующей части непривливой вариации четко выделяется период в 27,8 часа (рис. 5, кривая 1). Оказалось, что для спокойной части наблюдений, когда солнечная активность минимальна, период в 27,8 часа не наблюдается (рис. 5-а, кривая 2), что еще раз подтверждает связь между пульсациями гравитационного поля и солнечной активностью. Причиной появления вариаций с периодом в 27,8 ч. возможно служит разность скоростей вращения вокруг своих осей Земли и Солнца, а также смещение Земли по орбите относительно Солнца за время суточного вращения. Нельзя не отметить, что четко отмечается период в 44 часа. К сожалению, природу периода в 44 часа в настоящее время автор статьи объяснить не может. К слову, на рис. 5-а выделяются четко суточные периоды.

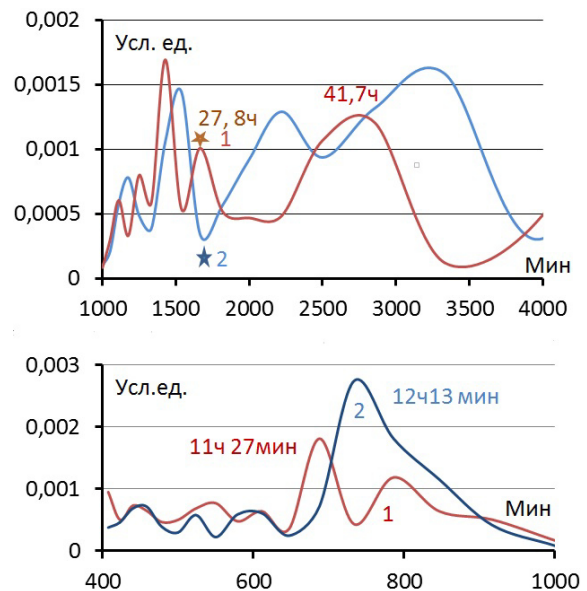


Рис. 5. Амплитудно-частотные спектры для пульсационной и «нормальной» частей непривливой вариации силы тяжести. а – спектры в интервале 1 – 4 тыс. мин.; б – спектры в интервале 400 – 1000 мин.

Обращает внимание (рис. 5-б) на себя период 714 мин (полусуточный), который проявляется на всех трех кривых. Естественно, этот период связан с полусуточной солнечной волной S2. Он в среднем равен 12 часам, меняясь в течение года в большую или меньшую сторону (± 5 мин). А вот полусуточная лунная волна M2 отражения в спектре не находит. Это объясняется тем, что при вычислении непривливой вариации влияние лунной вариации было исключено. Но ведь притяжение Солнца тоже было исключено. Дело в том, что Луна по космическим меркам является инертным телом. А вот Солнце помимо притяжения может воздействовать на Землю, например, с помощью корональных выбросов масс [15]. Не случайно, что приведенные пульсации возникли после рентгеновских вспышек на Солнце, которые в свою очередь предшествуют корональным выбросам масс. Таким образом, можно констатировать, что пульсации связаны с активностью Солнца. Наконец обратимся к рис. 1-в. В конце графика отмечается значительное изменение сплайн-сглаженных значений непривливых вариаций. На рис. 6 представлен отдельно график сглаженных значений. Ранее подобные изменения непривливых вариаций были рассмотрены в [9]. После этого последовала серия мощных землетрясений. В нашем случае в начале апреля 2014 г. последовала беспрецедентная по мощности серия землетрясений, связанных преимущественно с Тихоокеанским побережьем Ю. Америки (в основном территория Чили). Подобные изменения вариаций силы тяжести наблюдались и ранее [9], которые там назывались сейсмогравитационными колебаниями.

История вопроса восходит к наблюдениям в Петербурге в 1999 г, интерпретация которых вызвала большие затруднения. Определенная ясность была получена только после привлечения наблюдений других сейсмических станций, а именно: станций сети Geoscope, расположенных в Евразии (Франция, Китай, Индия).

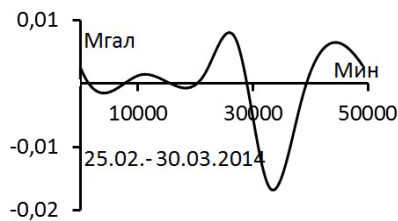


Рис. 6. Сплайн-сглаженные значения неприливной вариации.

Запись вертикального маятника в Петербурге относится ко времени 12–15 августа. Особое внимание к данной записи было привлечено в связи с моментом полного солнечного затмения, которое наблюдалось в Петербурге 11.08.1999 г. Через 6 дней в Турции произошло землетрясение 17.08 с магнитудой 7,8. В это же время отмечены изменения сейсмогравитационных колебаний в Индии, Франции и Китае. Таким образом, можно заключить: факт возникновения 3 суточной деформации подтвержден.

Через месяц подобная деформация наблюдалась вновь перед землетрясением на Тайване 20.09.1999 г. с магнитудой 7,7. Отметим общие черты процесса, записанного конструктивно разными сейсмометрами на удаленных друг от друга станциях. Возмущение началось 17 сентября. Оно проявилось в виде резкого толчка горизонтального направления, что представлено для примера на одной записи из кривых в Петербурге. В течение трех суток интенсивность горизонтальных компонент колебаний была повышена, вплоть до момента землетрясения.

Авторы в [9] отмечают, что глубокий и направленный анализ этого явления требует постановки специальных исследований. С этим утверждением согласен автор данной статьи. Очень трудно объяснить изменение силы тяжести почти в планетарном масштабе и в течение длительного времени. Если принять версию перемещения масс в Земле, то неизбежно это повлекло бы за собой катастрофические явления на Земле. Если принять версию космического воздействия, то, исходя из формы аномальной вариации, процесс образования вариации можно описать следующим образом. Допустим, что на Землю падает плоский слой космических частиц толщиной несколько миллионов километров и перемещается в пространстве (рис. 7). Когда Земля находится в центре падающих масс, то наблюдается максимальная вариация. Гипотетически это выглядит правдоподобно. Такие космические массы появляются при корональных выбросах масс. Даже, если бы выбросы масс превосходили на несколько порядков массы, которые фиксируются спутниками при корональных выбросах, то все равно этого недостаточно. Кроме того, минимальная скорость солнечного ветра составляет, примерно, 300 км/сек, а при корональных выбросах масс скорость ветра может достигать до 5000 км/сек. Если взять мощность плоского слоя 10 млн км, то прохождение этих масс через Землю заняло бы несколько часов, а наблюдаемые неприливные вариации во времени длятся несколько суток.

Воронежский государственный университет

Антонов Юрий Васильевич – профессор кафедры геофизики
E-mail: yuriyantov@yandex.ru; Тел.: (4732) 208-385

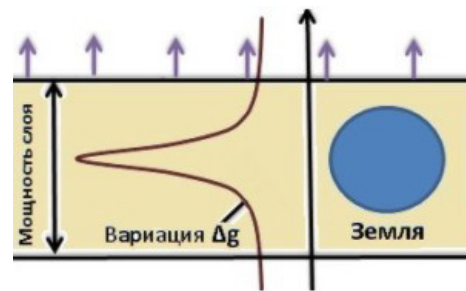


Рис. 7. Схема возможного образования сверхдлинных неприливных вариаций.

Таким образом, нужно искать какие-то другие причины, вызывающие возникновение длиннопериодных вариаций. Возможно, что источниками этих вариаций служат космические изменения силы тяжести. Солнечная система в космическом пространстве перемещается со скоростью 20 – 100 км/сек, то такие изменения силы тяжести возможны. Естественно, что высказанное предположение остается предположением, но факт выделения подобных неприливных вариаций существует, и его надо тщательно изучать.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов, Ю. В. Предварительная обработка наблюдений лунно-солнечных вариаций силы тяжести / Ю. В. Антонов, Е. В. Воронцова // Изв. ВУЗов. Геол. и разведка. – 2012. – № 3. – С. 63–67.
2. Антонов, Ю. В. Пульсации неприливных вариаций силы тяжести / Ю. В. Антонов // Изв. ВУЗов. Геол. и разведка. – 2014. – № 5. – С. 54–57.
3. Антонов, Ю. В. Модуляция вариаций вертикального градиента силы тяжести и электромагнитного поля собственными колебаниями Земли / Ю. В. Антонов, И. Ю. Антонова, А. К. Рыбин, Г. Г. Щелочков // Изв. ВУЗов. Геол. и разведка. – 2010. – № 6. – С. 101–105.
4. Антонов, Ю. В. Неприливные вариации вертикального градиента силы тяжести и их возможная связь с землетрясениями / Ю. В. Антонов, С. В. Слюсарев // Изв. ВУЗов. Геол. и разведка. – 1992. – № 5. – С. 101–105.
5. Антонов, Ю. В. Запаздывание приливной волны на суше / Ю. В. Антонов, И. Ю. Антонова // Геофизика. – 2013. – № 6. – С. 48–51.
6. Антонов, Ю. В. Вариации гравитационного и магнитотеллурического полей / Ю. В. Антонов, И. Ю. Антонова, А. К. Рыбин // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. – 2013. – Вып. 2. – С. 129–133.
7. Longman, I. M. Formulas for Computing the Tidal Accelerations Due to the Moon and the Sun / Longman I. M. // Journal of Geophysical Research, 1959. – V. 64. – № 12. – P. 2351–2355.
8. Мельхиор П. Земные приливы / П. Мельхиор. – М.: Изд-во «Мир», 1968. – 482 с.
9. Петрова, Л. Н. Инерционный способ наблюдения сейсмогравитационных колебаний Земли и крупномасштабные деформации перед сильнейшими землетрясениями 1999 года в Евразии / Л. Н. Петрова, Е. Г. Орлов // Вопросы геофизики (Ученые записки СПбГУ; 437). – Вып. 37. – СПб.: Изд-во С.-Пб ун-та. – 2004. – С. 36–48.
10. Собственные колебания Земли. – М.: Мир. – 1964. – 316 с.
11. Каршенбаум, А. М. Исследование влияния микросейсм на работу гравиметров / А. М. Каршенбаум // Повторные гравиметрические наблюдения. Сб. науч. трудов Межведомственного геофиз. Комитета при Президиуме АН СССР. – М. – 1986. – С. 62–67.
12. Маловичко, А. К. Об исключении регионального гравиметрического фона и интерпретация аномалий / А. К. Маловичко // Разведка и охрана недр. – 1953. – № 2. – С. 42–45.
13. Максимов, И. В. Геофизические силы и воды океанов / И. В. Максимов // Гидрометеоздат. – 1970. – 447 с.
14. Гульельми, А. В. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы / А. В. Гульельми, В. А. Троицкая. – М: Наука. – 1973. – 208 с.
15. Богачёв, С. А. Солнечные вспышки / С. А. Богачёв, А. С. Кириченко // Земля и Вселенная. – 2013. – № 5. – С. 3–15.

Voronezh State University

Antonov Yuriy Vasilevich - professor Geophysical Department
E-mail: yuriyantov@yandex.ru; Тел.: (4732) 208-385