

**ОСОБЕННОСТИ МОРФОЛОГИИ
НЕПРИЛИВНЫХ ВАРИАЦИЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ****Ю.В. Антонов, И.Ю. Антонова***Воронежский государственный университет*

Поступила в редакцию 15 сентября 2014 г.

Аннотация: рассмотрена морфология неприливых вариаций силы тяжести. Выделяются временные отрезки наблюдений, когда увеличивается амплитуда колебаний неприливых вариаций. Указанные промежутки названы пульсациями. Пульсации связаны с корональными выбросами масс на Солнце.

Ключевые слова: лунно-солнечные вариации силы тяжести, неприливые вариации силы тяжести, корональные выбросы масс, пульсации.

MORPHOLOGY FEATURES NON-TIDAL VARIATIONS OF GRAVITY

Abstract: considered morphology non-tidal oscillations variations of gravity. Stand out of dispensations of observations, when increasing the non-tidal oscillations amplitude variations. These periods are called pulsations. Surge associated with coronal emission mass of the Sun.

Key words: lunar-solar variations of gravity, non-tidal oscillations variations of gravity, the coronal emission mass, ripple.

Введение

Под неприливыми (остаточными) вариациями силы тяжести будем понимать все изменения гравитационного поля, исключая расчетные лунно-солнечные вариации силы тяжести, вне зависимости от источника их происхождения. Такие остаточные вариации получаем с помощью гравиметра при мониторинговых измерениях силы тяжести, когда из показаний гравиметра вычитается лунно-солнечная вариация. Как показывает анализ: неприливые вариации по морфологии отличаются друг от друга. На данное обстоятельство ранее никто не обращал внимание. Потому в данной статье обсудим вопросы морфологии неприливых вариаций, попытаемся объяснить их физическую суть, а также возможное использование в геофизике.

**Методика наблюдений и обработки
вариаций силы тяжести**

В предлагаемой статье будут приведены данные обработки измерений на Бишкекском геодинимическом полигоне (Научная станция РАН в Киргизии), которые практически не зависят от техногенных помех. Станция расположена в 30 км от города в горах, где нет дорог, нет никаких промышленных предприятий. Гравиметр CG-5 Autograv расположен в штольне с постоянной температурой. Техническая погрешность измерений гравиметром составляет около микрогала. Большинство измерений проведено с интервалом измерений — 30 сек. Непрерывная запись длится неделю, затем меняется флеш-память. В результате смены появляется перерыв в наблюдениях в 20 – 30

мин, что создает определенные неудобства при обработке. Проведены также наблюдения с двухминутным интервалом измерений, что позволяет анализировать промежутки непрерывных наблюдений длительно — до 35 дней.

Вследствие суточного вращения Земли и движения Земли, Луны и Солнца по своим орбитам, приливообразующая сила непрерывно меняется во времени. Эти периодические приливы разделяются на 4 типа [8]. Надо отметить, принятое название в научной литературе «периодических приливных сил» не вполне корректно. Приливообразующая сила в каждой точке на поверхности Земли, непрерывно меняясь во времени, никогда точно не повторяется. Долгопериодные приливы дают наибольшие колебания уровневой поверхности на полюсах, вдвое меньшие на экваторе и нулевые на широтах $\pm 35,3^\circ$. К ним относятся приливы с периодами в 18,6 года, 1 год, 0,5 года, 1 месяц и 2 недели (Mf). Суточные приливы дают наибольшие поднятия и опускания земных приливов на широтах $\pm 45^\circ$ и нулевые на полюсах и экваторе. Главные из них — лунная волна O1 с периодом 25,8 ч и лунно-солнечная волна K1 с периодом в 23,9 ч. Полусуточные приливы, дающие максимальные поднятия и опускания для статических приливов на экваторе и нулевые на полюсах. Главные полусуточные волны — это лунная волна M2 с периодом в 12,4 ч и приблизительно в 2 раза меньшая солнечная волна S2 с периодом в 12 ч. Короткопериодные волны имеют периоды около 1/3 суток и короче.

Сами лунно-солнечные вариации в данной статье рассматриваться не будут, они исключаются авто-

матически. Современные гравиметры оснащены программным продуктом, который позволяет рассчитывать притяжение Луны и Солнца и исключать притяжение из общего наблюдаемого поля. Как указано в [1 – 6], определение лунно-солнечных вариаций по формуле Лонгмана [7], используемой, например, в гравиметре CG-5 Autograv, производится с очень высокой точностью. Кстати, большинство программ, используемых в расчетах приливных явлений, обладают примерно одинаковой точностью. Поэтому полученные вариации силы тяжести в мониторинговых наблюдениях не содержат в себе какой-то неучтенной значимой части лунно-солнечных вариаций.

Оставшаяся часть вариаций после исключения лунно-солнечной части содержит в себе эффекты влияния от внешних и внутренних источников геодинамической системы Земля – Луна – Солнце, а также влияние техногенных факторов. Поэтому гравиметры устанавливают подальше от городов, транспортных магистралей, карьеров и шахт и т.д. Например, в городах Москва, Саратов гравиметр позволяет измерять изменение силы тяжести с погрешностью $\pm 0,1$ мГал и грубее, что по амплитуде сравнимо с лунно-солнечными вариациями и превышает остаточные вариации, а это делает городские наблюдения практически непригодными для интерпретации. Влияют карьерные и шахтные взрывы. Но наблюдения, зафиксированные от взрывов, в отличие от случайных техногенных измерений, имеют определенные закономерности. От природных явлений (сейсмических событий и т.д.) взрывы отличаются тем, что по времени они кратковременны, можно установить их время взрыва по данным рудоуправлений, и тем самым исключить из рассмотрения. Окончательные измерения гравиметра выдаются на печать уже свободными от лунно-солнечных вариаций.

Дальнейшая обработка наблюдений на первом этапе заключается введением поправок за запаздывание приливной волны и смещение нуля-пункта [1]. Земные приливы – это упругие деформации всего земного шара под действием силы тяготения Луны и Солнца. Так как скорости распространения гравитационного поля и деформации земной коры разные, то между расчетными и наблюдаемыми вариациями наблюдается некоторое смещение, которое автор называет запаздыванием [5]. Поэтому для наблюдений необходимо установить время запаздывания и ввести соответствующую поправку. Гравиметр имеет смещение нуля-пункта. Несмотря на двойное термостатирование прибора и постоянную температуру в штольне, механические и упругие свойства измерительной системы изменяются во времени. Очевидно, вместе с исключением нуля-пункта исключается какая-то часть длиннопериодных вариаций. Методика учета нуля-пункта изложена в [1].

Результаты интерпретации

Теперь определимся, какую информацию содержит неприливая вариация силы тяжести, очищенная от лунно-солнечных вариаций, от длиннопериодных

вариаций (период от двух недель и более) и поправок за запаздывание и нуль-пункт? Попытаемся разобраться в том, какие возможные периоды можно выделить из неприливых вариаций.

Но прежде обратим внимание на одно обстоятельство. Некоторые виды остаточных неприливых вариаций силы тяжести представлены на рис.1. Видим, что кривые вариаций силы тяжести весьма осложнены высокочастотными колебаниями $\pm(0,02 - 0,05)$ мГал, что в десятки раз превышает техническую погрешность гравиметра ($\pm 0,001$) мГал. Для сейсмографа

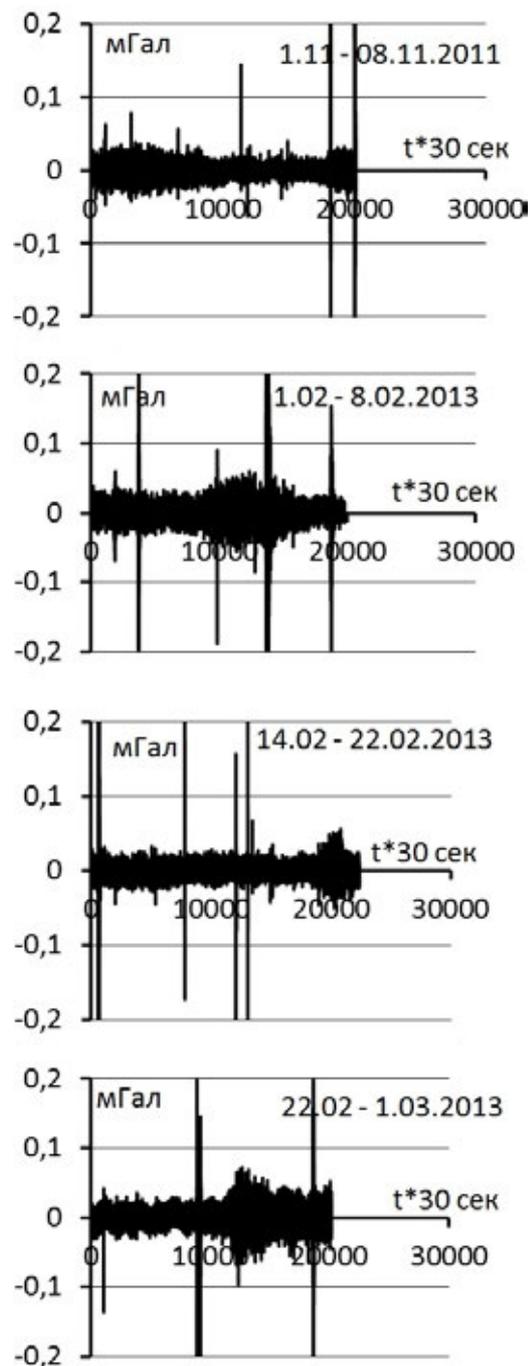


Рис. 1. Морфология неприливых вариаций силы тяжести (для получения реального времени по оси ОХ необходимо номер наблюдения t умножить на 30 сек)

подобные изменения измерений называют «сейсмическим шумом». По аналогии с сейсмологией назовем его «гравиметрическим шумом» (далее просто шум). Гравиметр – это вертикальный сейсмограф Голицина, который реагирует на все сейсмические события, несмотря на все фильтры в приборе. Как известно, в одних случаях шум – это помеха, а в других – источник информации. В первом случае стараются от него избавиться с помощью всякого рода фильтраций, а во втором – изучают структуру этих колебаний.

Обратим внимание на морфологию шума (рис.1.). На рисунке приведены даты наблюдений. Интервал наблюдений составляет одну неделю, что определяется объемом флеш-памяти в приборе при измерениях, выполненных с интервалом через 30 сек (по оси ОХ отложены номера наблюдений). Как видим, что колебания шума на достаточно больших интервалах времени имеют равномерный характер с амплитудой около $\pm 0,02$ мГал, а затем постепенно или достаточно резко изменяют амплитуду до $\pm(0,04 - 0,06)$ мГал и через некоторое время затухают. По аналогии с вариациями магнитного поля Земли [9] мы их назвали пульсациями. В данном случае аналогия проводится только по морфологии, но не по содержанию. Кроме того, на рис. 1 наблюдаются резкие скачки в несколько десятых мГал, но они создаются мелкими землетрясениями, которые характерны для сейсмически активных зон, а общей морфологии шума не меняют.

Был проведен частотный анализ отдельно для пульсаций и обычных неприливых вариаций силы тяжести. Вначале рассмотрим амплитудно-частотные характеристики для пульсаций. Из массива вариаций, представленных на рис. 1, выделили пульсации, содержащие по 10 тысяч измерений (5000 мин или 3,5 суток). Был взят специально равный интервал, чтобы сравнение периодов между собой было более корректным. В результате частотного анализа были получены периоды, которые к удивлению полностью совпали с периодами выделенными ранее в [2 – 6, 8, 10]. Они отражают собственные колебания Земли [10]. В [10] эти колебания называются сейсмогравитационными. Отсюда следует вывод, что шум модулируется собственными колебаниями Земли.

Но имеются и другие любопытные особенности, связанные с низкими частотами. На рис. 2 приведены амплитудно-частотные спектры для пульсаций, представленных на рис. 1 с периодом более 500 мин. Обращает внимание на себя период 714 мин (полусуточный), который проявляется на всех четырех кривых. Естественно, этот период связан с полусуточной волной S2. Он в среднем равен 12 часам, меняясь в течение года в большую или меньшую сторону (± 5 мин) согласно уравнению времени. Сутки в течение года равны 24 часам только в дни равноденствия. А вот полусуточная волна M2 отражения в спектре не находит. Это объясняется тем, что при вычислении неприливной 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 солнечного ветра или корональными выбросами масс [11]. Не случайно, что приведенные пульсации на рис. 1 возникли после рентгеновских вспышек на Солнце, которые в свою очередь связаны корональными выбросами масс. Таким образом, можно констатировать, что пульсации связаны с активностью Солнца.

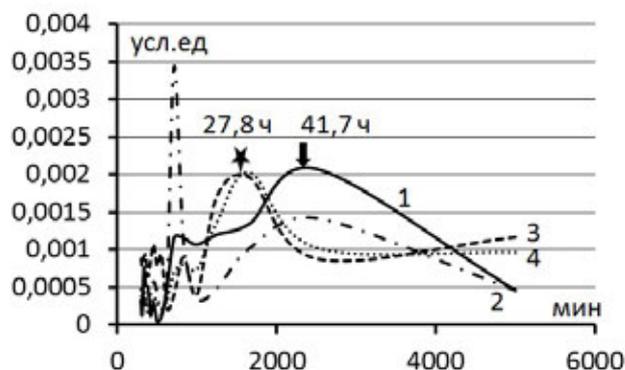


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики пульсаций силы тяжести. Условные обозначения: 1 – график для наблюдений за период 1 – 8 февраля 2013 г.; 2 – график для наблюдений за период 14 – 22 февраля 2013 г.; 3 – график для наблюдений за период 22 февраля – 3 марта 2013 г.; 4 – график для наблюдений за период 1 – 8 декабря 2011 г.

Рассмотрим ещё один пример неприливых вариаций силы тяжести (рис. 3), который отличается тем, что интервал наблюдений увеличен в четыре раза (31 день), а шаг наблюдений составляет две минуты. Как отмечалось выше, память программного устройства ограничена, и при шаге измерений в 30 сек можно сделать запись не более, чем 8 дней. Поэтому для получения записей с более длинным интервалом приходится шаг измерений увеличивать. Попытки увеличить интервал наблюдений за счет сшивки коротких файлов с малым шагом измерений, к сожалению, из-за конструктивных особенностей гравиметра не всегда успешны.

Но вернемся к рис. 3. Примерно первая половина интервала наблюдений имеет пульсирующий характер,

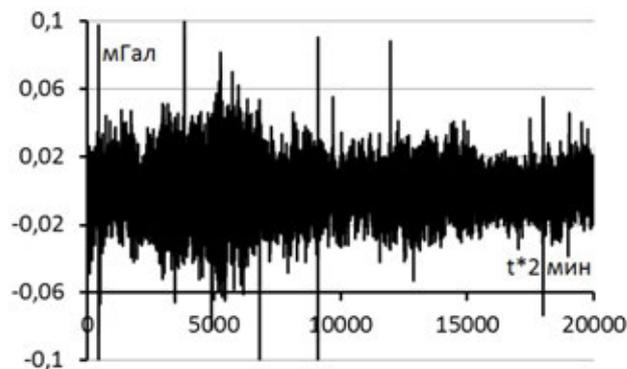


Рис. 3. Морфология неприливых вариаций силы тяжести за период 18 ноября – 19 декабря 2013 г. (для получения реального времени по оси ОХ необходимо номер наблюдения t умножить на 2 мин).

вторая половина – наоборот спокойная. Несомненно, что такой характер изменения остаточной аномалии силы тяжести определяется активностью Солнца. По данным американского спутника SOHO (они доступны в интернете) вторая половина ноября 2013 г. характеризуется исключительно резкими изменениями рентгеновского излучения и соответственно частыми корональными выбросами масс. В первой половине декабря 2013 г. космическая погода была на редкость спокойной.

Были вычислены амплитудно-частотные характеристики отдельно для пульсирующей и спокойной частей неприливной вариации (рис. 2). На пульсирующей части четко выделяется период в 27,8 часа (на рис. 4 кривая 1). Оказалось, что для спокойной части наблюдений, когда солнечная активность минимальна, период в 27,8 часа не наблюдается (на рис. 4 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 период в 42 часа отмечается и в том и другом случаях. К сожалению, природу периода в 42 часа в настоящее время авторы статьи объяснить не могут.

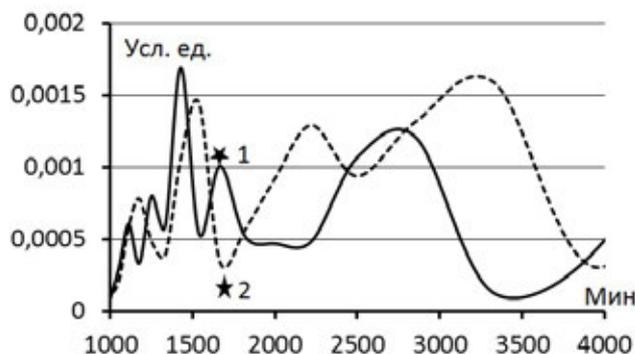


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики пульсаций силы тяжести. Условные обозначения: 1 – график для наблюдений за период 18 ноября – 3 декабря 2013 г.; 2 – график для наблюдений за период 3 – 19 декабря 2013 г.

Наконец остановимся еще на одной особенности. В гравиметре на печать наряду с данными об изменении силы тяжести выдаются также значения среднеквадратической погрешности измерений, которая определяется для заданного интервала измерений. Например, при двухминутных интервалах измерения для определения погрешности используется 60 отсчетов. На рис. 5 приведено сравнение кривых среднеквадратической погрешности измерений и неприливной вариации. Пульсации соответствуют повышенное значение погрешности. Данное обстоятельство можно использовать для сбивки коротких интервалов измерений, потому что обычные записи вариаций, как об этом упоминалось выше, сбивать между собой достаточно трудно.

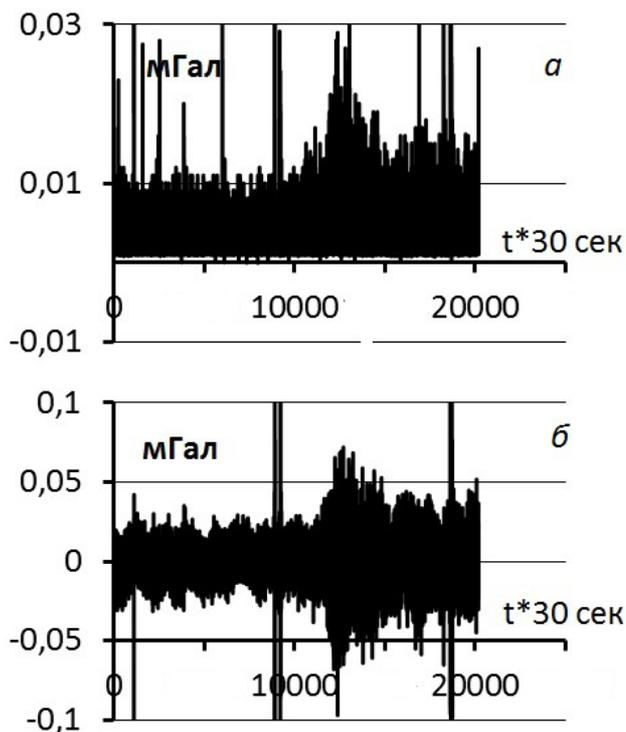


Рис. 5. Сравнение морфологии среднеквадратической погрешности измерений (двухминутный интервал) и неприливной вариации силы тяжести период 22 февраля – 3 марта 2013 г. Условные обозначения: а – среднеквадратическая погрешность измерений; б – неприливная вариация силы тяжести.

Выводы

Таким образом, можно констатировать, что пульсации неприливных вариаций силы тяжести обусловлены солнечной активностью. Не исключено, что пульсации можно использовать для глубинного изучения Земли по аналогии с электромагнитными исследованиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов, Ю.В. Предварительная обработка наблюдений лунно-солнечных вариаций силы тяжести / Ю.В. Антонов, Е.В. Воронцова // Изв. ВУЗов, геол. и разв. – 2012. – № 3. – С. 63–67.
2. Антонов, Ю.В. Сравнение приливных вариаций силы тяжести и вертикальной составляющей сейсмографа / Ю.В. Антонов, И.Ю. Антонова // Геофизика. – 2013. – № 2. – С. 27 – 31.
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 разв. – 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 разв. – 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 / I.M. Longman // 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. Гульельми, А.В. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы / А.В. Гульельми, В.А. Троицкая. – М., Наука. – 1973. – 208 с.

10. Линьков, Е. М. Сейсмические явления / Е. М. Линьков. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та. – 1987. – 248 с.

11. Богачёв, С. А. Солнечные вспышки / С.А. Богачёв, А.С. Кириченко // Земля и Вселенная. – 2013. – № 5. – С. 3–15.

Воронежский государственный университет

Voronezh State University

Антонов Ю. В., профессор кафедры геофизики

E-mail: yuriyantov@yandex.ru

Тел.: (4732) 208-385

Antonov Y. V. – professor of the geophysics chair

E-mail: yuriyantov@yandex.ru

Tel.: (4732) 208-385

Антонова И. Ю., преподаватель кафедры геофизики

E-mail: mavka_r@mail.ru

Тел.: (4732) 208-385

Antonova I. Y. – lecturer of the geophysics chair

E-mail: mavka_r@mail.ru

Tel.: (4732) 208-385