

УДК 550.831

## НЕПРИЛИВНЫЕ ВАРИАЦИИ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ КАК ВОЗМОЖНЫЙ КРИТЕРИЙ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Антонов Ю. В., Антонова И. Ю.

### NON-TIDAL VARIATIONS OF GRAVITY AS A POSSIBLE CRITERIA OF SHORT-TERM PREDICTION OF EARTHQUAKES

Antonov Ju. V., Antonova I. Ju.

Voronezh State University, Voronezh, 394006, Russia  
e-mail: yuriyantono@yandex.ru

*Abstract.* In the article the monitoring measurements of gravity in Bishkek (Kyrgyzstan) was analyzed. The observed tidal variations of gravity differ from the theoretical gravitational attraction of moon and sun. The difference between the measured and theoretical values of gravity is non-tidal variations of gravity. There is a close relationship between non-tidal variations of gravity and magneto-telluric variations of the field. Therefore, it is hypothesized that non-tidal variations of gravity depend on solar activity. Obviously, the source of non-tidal variations are the coronal mass ejection (CME) by the sun. Major earthquakes result from coronal mass ejection. This statement is confirmed by practical examples. This could serve as a criterion of short-term earthquake prediction.

*Keywords:* not-tide variations of gravity, coronal mass emissions, earthquakes, earthquake prediction

### Введение

Под неприливыми (остаточными) вариациями силы тяжести будем понимать все изменения гравитационного поля вне зависимости от источника их происхождения, включая лунно-солнечные вариации силы тяжести. Такие остаточные вариации получаем с помощью гравиметра при мониторинговых измерениях, когда из показаний гравиметра вычитается лунно-солнечная вариация. Современные гравиметры оснащены программным продуктом, который позволяет рассчитывать притяжение Луны и Солнца и исключать притяжение из общего наблюдаемого поля. Как указано в статье [1], вычисление лунно-солнечных вариаций по формуле Лонгмана [2], используемой, например, в гравиметре CG-5 Autograv производится с очень высокой точностью. Большинство программ, используемых в расчетах приливных явлений, обладают той же точностью. Поэтому полученные вариации силы тяжести в мониторинговых наблюдениях не содержат в себе какой-то неучтенной части лунно-солнечных

вариаций. В статье приведены данные наблюдений на Бишкекском геодинимическом полигоне (Научная станция РАН в Киргизии), расположенном в 30 км от города в горах, в штольне с постоянной температурой. Интервал измерений — 30 с.

### 1. Исходные данные

Зададимся вопросом — какова природа неприливых вариаций? Прежде всего, они содержат влияние техногенных факторов. Поэтому гравиметры устанавливают подальше от городов, трасс, карьеров и шахт и т. д. Например, в городах Москва, Саратов гравиметр позволяет измерять изменение силы тяжести только с погрешностью  $\pm 0,1$  мГал, что по амплитуде превышает остаточные вариации и следовательно, делает городские наблюдения практически непригодными для интерпретации, например, с точки зрения прогноза землетрясений. Нельзя также быть полностью уверенным, что на результаты измерений не влияют карьерные и шахтные взрывы. Единственное, что отличает эти взрывы от природных явлений, это их

Антонов Юрий Васильевич, д-р техн. наук, профессор кафедры геофизики Воронежского государственного университета; e-mail: yuriyantono@yandex.ru.

Антонова Ирина Юрьевна, преподаватель кафедры геофизики Воронежского государственного университета; e-mail: mavka\_r@mail.ru.

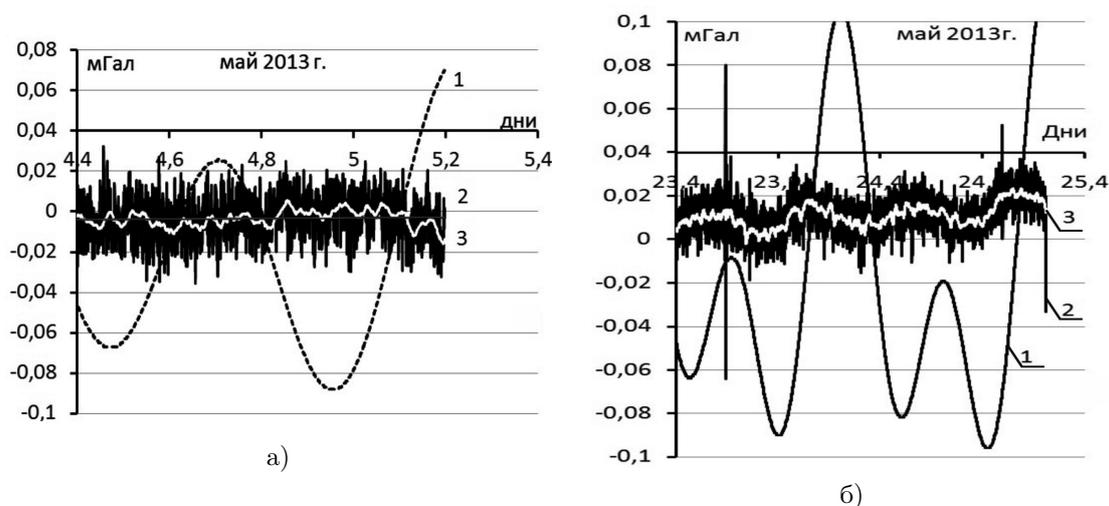


Рис. 1. Остаточная вариация силы тяжести в период 4–5 мая 2013 г.; 1 — лунно-солнечные вариации силы тяжести; 2 — остаточная вариация силы тяжести; 3 — осредненные значения остаточной вариации (интервал осреднения 30 мин.)

кратковременность. Можно установить время взрыва по данным рудоуправлений и тем самым исключить его из рассмотрения. Техногенные аномалии должны быть исключены, так как они не несут полезной информации.

Следующей причиной является сейсмический шум земных недр. Гравиметр является вертикальным сейсмографом Голицина, поэтому он реагирует на сейсмические колебания земной поверхности. На рис. 1а представлена запись гравиметра в относительно «спокойное» время, когда не наблюдалось землетрясений. На рис. 1а (кривая 2) амплитуда остаточных вариаций колеблется в пределах  $\pm 0,02$  мГал. Техническая погрешность гравиметра CG-5 Autograv составляет около одного микрогала. Следовательно, сейсмический шум по амплитуде на порядок превышает точность измерений. В данном случае от сейсмического шума можно избавиться с помощью осреднения. Осреднение в получасовом скользящем окне (рис. 1, кривая 3) показывает, что практически сейсмический шум исчезает, и среднее значение остаточной вариации меняется в пределах  $\pm 5$  микрогал. Судя по амплитудно-частотным характеристикам, они обусловлены собственными колебаниями Земли [3].

## 2. Интерпретация исходных данных

Собственные колебания Земли дают небольшой вклад в остаточные вариации. Но при наличии сильных землетрясений они

резко усиливаются по амплитуде и могут продолжаться несколько суток [3]. На рис. 1б (кривые 2 и 3) представлены результаты таких наблюдений. Осредненные значения (кривая 3) достигают по амплитуде в 20–30 мкГал против 5 мкГал (рис. 1а). В период 21–22 мая 2013 г. в Тихоокеанской зоне прошла целая серия землетрясений с магнитудами 5–6 баллов по шкале Рихтера, завершившаяся 24 мая 2013 г. сильнейшим Охотоморским землетрясением с магнитудой 8,3 балла, отголоски которого прокатились по всей Евразии и ощущались даже в Москве. Эпицентр землетрясения находился на глубине примерно 600 км. Обычно возникшие от глубоководных землетрясений собственные колебания Земли продолжают несколько суток и могут увеличивать или уменьшать амплитуду лунно-солнечных вариаций силы тяжести. Подобные вариации могут быть использованы при изучении внутреннего строения Земли [3–5].

Очень интересными представляются изменения неприливных вариаций, приведенные на рис. 2. В первом случае (рис. 2а) неприливно-вариация длится почти четверо суток, амплитуда ее изменения во времени около 0,05 мГал. Во втором случае (рис. 2б) вариация изменяется с той же амплитудой и имеет ту же морфологию, но время ее изменения укладывается в другой временной промежуток — около четырех часов. Во время измерения вариаций в регионе и по всему земному шару ни средних, ни сильных зем-

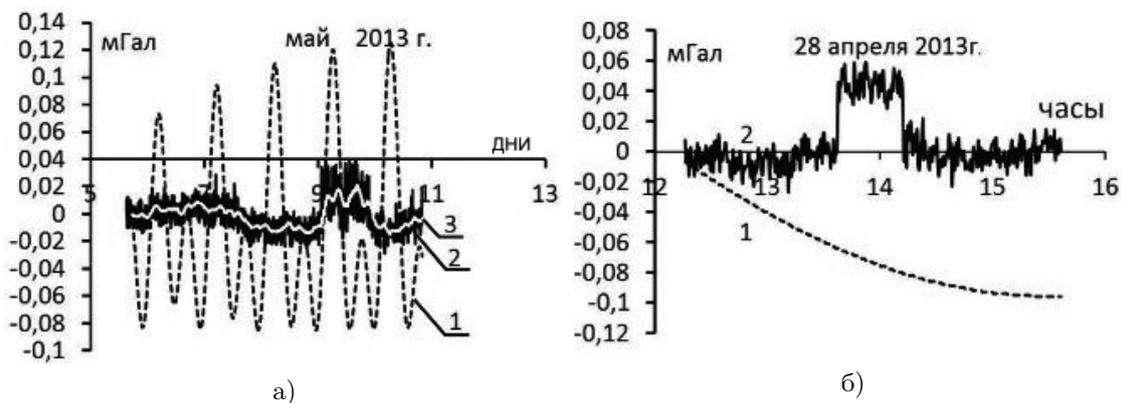


Рис. 2. Остаточная вариация силы тяжести в период а) 5–11 мая и б) 28 апреля 2013 г.; 1 — лунно-солнечные вариации силы тяжести; 2 — остаточная вариация силы тяжести; 3 — осредненные значения остаточной вариации (интервал осреднения 30 мин.)

летрясений не было. Объяснить вариации перемещением масс в земной коре без последующих крупных динамических изменений на Земле очень трудно. Поэтому авторы попытались найти причину возникновения неприливных вариаций в существовании внешних источников воздействия на Землю.

Ранее авторы уже отмечали возможное влияние внешних источников на неприливные вариации силы тяжести [6]. При совместном анализе неприливных вариаций силы тяжести и магнито-теллурического поля (составляющая  $H_z$ ) была установлена полная идентичность вариаций этих полей. Сравнение полей проводилось для того же интервала наблюдений, который рассмотрен на рис. 2а. Осуществлялось прямое сопоставление вариаций силы тяжести и составляющей  $H_z$ , без всяких трансформаций, так как они не сдвинуты по фазе. Поскольку магнито-теллурики обусловлены поведением ионосферы под действием Солнца, то естественным является предположение, что какая-то часть неприливных вариаций силы тяжести связана с процессами, происходящими в космическом пространстве.

На изменение гравитационного поля на Земле действуют Луна и Солнце. Луна довольно инертное по космическим понятиям тело и не может вызвать дополнительных изменений гравитационного поля Земли. Солнце же помимо притяжения дополнительно воздействует на Землю солнечным ветром, выбросом корональных масс и т.д. Действительно, при рассмотрении активности Солнца за указанный период измерений (рис. 2) перед землетрясениями на Солнце прошли

мощные вспышки и выбросы корональных масс в межпланетное пространство.

В 90-х гг. прошлого века стало ясно, что важным источником геоэффективных возмущений являются не только солнечные вспышки, но также и гигантские выбросы вещества из короны Солнца, так называемые корональные выбросы массы (КВМ) [7, 8]. Схематично КВМ выглядит как оторвавшаяся от Солнца замкнутая петля магнитного поля, несущая в себе сгусток коронального вещества. На рис. 3а представлена схема вылета коронального выброса массы, окруженного замкнутыми силовыми линиями магнитного поля Солнца. Толстой линией показана ударная волна перед фронтом выброса.

Выброс включает в себя плазму, состоящую в основном из электронов и протонов наряду с небольшим количеством более тяжелых элементов — гелия, кислорода, железа и других. Характерной особенностью выброса является тот факт, что общая топология выброса имеет форму гигантской петли, оба или одно основание которой закреплены за солнечную атмосферу (рис. 3б), а магнитное поле в выбросе, как правило, выше, чем в спокойном солнечном ветре, и представляет собой скрученные в жгут магнитные силовые линии. Частота излучения по мере удаления от солнца падает.

Согласно современным теориям, выбросы корональных масс возникают при дестабилизации искривленных электрических контуров в магнитном поле Солнца, запасующих в более устойчивых состояниях большое количество энергии. Масса выброшенной в межпланетную среду плазмы может

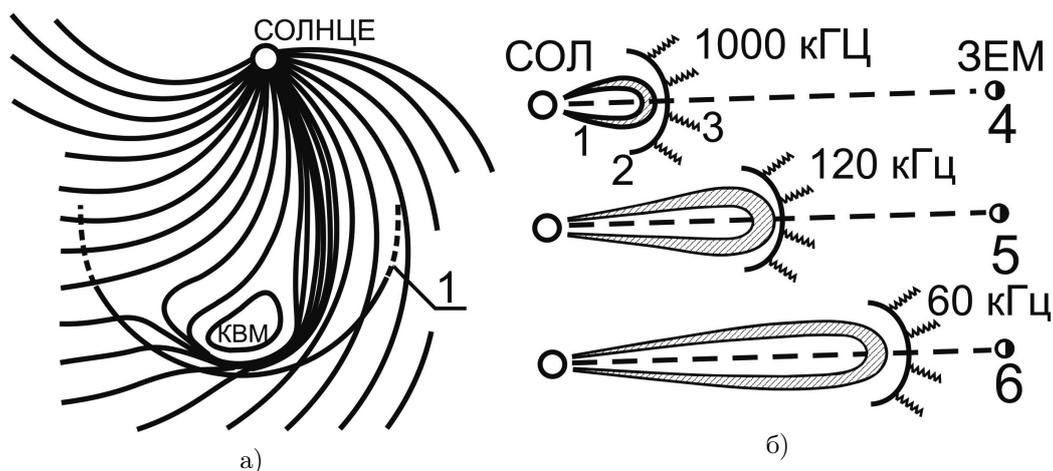


Рис. 3. Схема перемещения коронального выброса масс в межпланетном пространстве; а) расположение КВМ в магнитном поле Солнца: 1 — фронт ударной волны; б) перемещение КВМ от Солнца к Земле: 1 — петля КВМ; 2 — фронт ударной волны; 3 — частота излучения КВМ; 4 — начальная стадия КВМ; 5 — средняя стадия КВМ; 6 — конечная стадия КВМ

достигать десятков и сотен миллиардов тонн, что сравнимо с массой астероида вроде Эроса. Высвобождаемая энергия эквивалентна суммарной энергии сотен земных тайфунов, а скорость движения в начальный отрезок времени иногда доходит до пяти тысяч и более километров в секунду (средняя скорость 350 км/сек). При этом перед выбросом, летящим со сверхзвуковой скоростью, образуется ударная волна, отделенная от самого выброса слоем сжатой и нагретой плазмы. Частота наблюдения СМЕ изменяется в пределах от одного выброса за два дня до 2–3 в день в зависимости от близости к максимуму 11-летнего цикла солнечной активности.

Влияние Солнца на Землю очень сильно зависит от направления линий межпланетного магнитного поля. Это поле имеет вид спирали и как бы играет роль «рельсов» для потоков вещества и облаков плазмы, распространяющихся от Солнца (рис. 3). Линии поля, исходящие из восточного полушария Солнца отклонены от Земли на максимально возможное расстояние. На самом деле ситуация с траекторией движения КВМ не так проста. Дело в том, что крупные облака плазмы, обладающие большой кинетической энергией, могут «продавливать» линии поля и двигаться по своим собственным траекториям, заданным облаками изначально силой солнечного взрыва. Эти траектории могут быть довольно сложными, так как всегда представляют собой результат борьбы вещества, стремящегося двигаться по прямой ли-

нии, и магнитного поля, стремящегося увести их в сторону. Размеры выброшенных облаков при достижении ими орбиты Земли часто достигают десятков миллионов километров, так что даже при сильном смещении край облака может зацепить нашу планету. Встреча облака выброса с Землей во времени зависит от сложности траектории и скорости движения в межпланетном пространстве и может составлять от одного до четырех дней.

В целом касательные воздействия на магнитосферу Земли всегда заметно слабее, чем прямые лобовые удары, в том числе и по той причине, что облака солнечной плазмы, вызывающие магнитные бури, обычно имеют плотные ядра, тогда как их периферийные области очень разрежены. Однако существует и другой аспект. При серии вспышек часто первый выброс плазмы, проложив себе дорогу сквозь межпланетные магнитные поля и отдав на это всю свою ударную силу, создает как бы проход для свободного прохождения вещества, выбрасываемого во время следующих взрывов. В этой связи существует вероятность прихода в ближайшие сутки второго более сильного удара от заключительной солнечной вспышки. Однако выбросы могут возникать и без солнечных вспышек [9].

Могут ли подобные корональные выбросы масс создать при приближении к Земле заметные аномалии силы тяжести? Конечно, любые массы создают притяжение, только какова их величина? Пусть выброс со-

ставляет сто миллионов тонн (крупный выброс). Распределение масс грубо аппроксимируем шаром. Приведенная ниже оценка будет заведомо завышенной. Сравним вариацию силы тяжести массы коронального выброса с вариацией от Луны. Пусть массы коронального выброса расположены на высоте 1 000 км (это высота полярных сияний). Отношение ( $\kappa$ ) вариаций силы тяжести Луны и массы коронального выброса, когда Земля, Луна и масса выброса находятся на одной линии, оценивается формулой

$$\kappa = \frac{g_{\text{в}}}{g_{\text{л}}} = \frac{M_{\text{в}} S_{\text{в}}^3}{M_{\text{л}} S_{\text{л}}^3}$$

где  $g_{\text{в}}$ ,  $g_{\text{л}}$  — вариации силы тяжести соответственно от КВМ и Луны;  $M_{\text{в}}$  и  $M_{\text{л}}$  — массы КВМ и Луны;  $S_{\text{в}}$  и  $S_{\text{л}}$  — расстояния от Земли до КВМ и Луны. Элементарные расчеты показывают, что отношение  $\kappa < 10^{-3}$ , следовательно, корональные выбросы не могут служить источником неприливных вариаций, несмотря на столь внушительную массу.

Скорее всего, источником неприливных вариаций может служить ударная волна КВМ по магнитосфере. Гравиметр является сейсмографом Голицина, фиксирующим ударную волну. Само давление солнечного ветра при «спокойной» космической погоде по сравнению с атмосферным давлением численно ничтожно и не превышает 100 нПа. При выбросах масс оно может увеличиться на несколько порядков. Здесь, видимо, играет роль градиент изменения давления, т.е. все зависит от скорости КВМ, которая может достигать 5 000 км/с и выше при среднем ее значении 350 км/с.

Наконец, какая-то часть медленных частиц (преимущественно протонов) прорывается в радиационные пояса вокруг Земли и скапливается в ближнем к поверхности Земли слое. Видимо, медленные частицы создают какую-то часть притяжения. Оценить ее долю в изменении неприливных вариаций силы тяжести последних двух источников из-за отсутствия данных очень трудно. Но, скорее всего, все они вносят свой вклад в изменение вариаций силы тяжести и создают неприливные вариации, наблюдаемые с помощью гравиметров. Кстати, следует отметить, что существуют также вариации космических лучей, связанные с Солнцем. Все происходящие процессы в околосолнечном простран-

стве, возможно, служат спусковым крючком для землетрясений.

### 3. Возможный механизм формирования землетрясений

Механизм возникновения землетрясения под действием приливных сил в первом приближении можно описать следующим образом. Допустим, идет возрастание (уменьшение) приливной силы тяжести. Принесенные к Земле массы после удара коронального выброса создают дополнительное изменение силы тяжести, совпадающее по направлению с притяжением Луны и Солнца, провоцируя тем самым деформационные изменения в земной коре. Максимальное растяжение (сжатие) земной коры будет наблюдаться в момент наибольшего изменения приливной волны силы тяжести. Но поскольку деформация (разрыв, сдвиг и т. д.) земной коры в отличие от распространения гравитационного поля имеет конечную скорость, эта деформация запаздывает на некоторое время относительно изменения приливной волны силы тяжести, то есть землетрясение происходит с запаздыванием относительно максимального градиента вариации силы тяжести. Таким образом, землетрясение происходит или на нисходящей ветви вариаций ближе к минимуму вариации (между максимальным и нулевым значениями градиента вариации), или на восходящей ветви — ближе к максимуму вариации.

Указанное утверждение было проверено на многочисленных примерах (около 200), так как рассчитать вариации силы тяжести в прошедшем времени нетрудно. На рис. 4 представлены некоторые землетрясения на фоне изменения приливных вариаций силы тяжести. На рис. 4б черным кружком отмечено время землетрясения, называемого сегодня Великим Токийским землетрясением, произошедшего 11 марта 2011 г. Из рис. 4б видно, что землетрясение произошло после максимального градиента вариаций, примерно через сутки (31,25 ч) после коронального выброса масс. Скорость движения КВМ в конкретном случае составила более чем 1 300 км/с. Выше уже отмечалось, что КВМ достигают Земли в течение от одних до четырех суток.

На рис. 4 также приведены времена не менее катастрофических японских землетрясений (Канто, 1 сентября 1923 г. и Токио, 7 декабря 2012 г.). Магнитуды указаны на

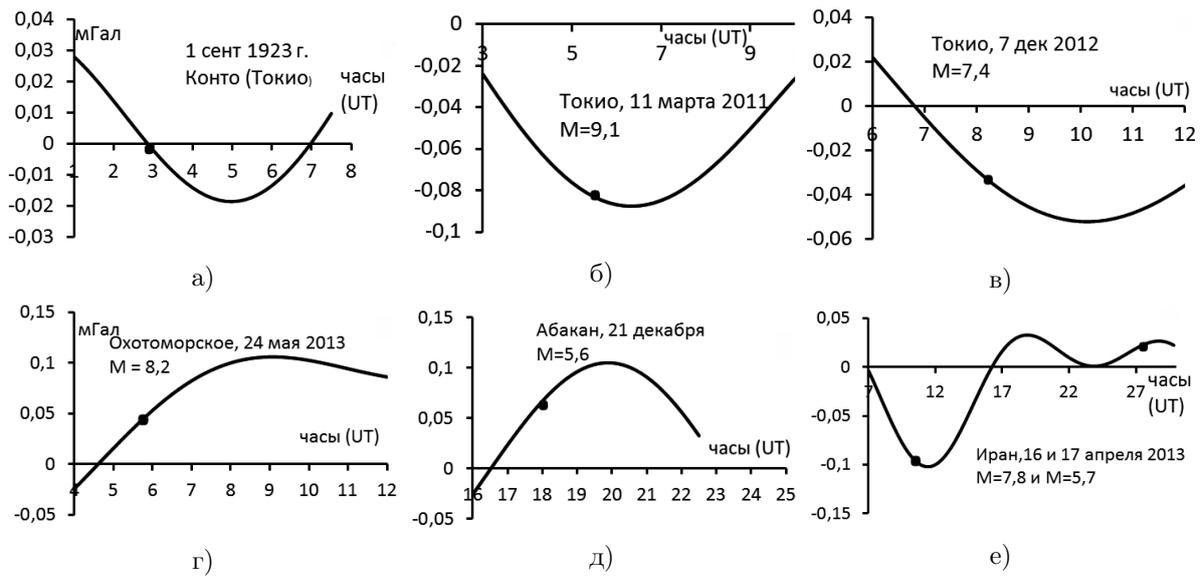


Рис. 4. Примеры расположения времен землетрясений на фоне лунно-солнечных вариаций силы тяжести;  
 — — лунно-солнечная вариация силы тяжести; ● — время землетрясений

рисунке. Запаздывание времени землетрясения относительно точки максимального значения градиента вариации везде одно и то же. Слева на рис. 4г, 4д, 4е приведены времена землетрясений на восходящей ветви вариации силы тяжести. Время землетрясений на восходящей или нисходящей ветви вариации не зависит от региона. На рис. 4е приведены времена сразу двух землетрясений в Иране, произошедших друг за другом в одном месте с интервалом в сутки. Первое землетрясение фиксируется на восходящей ветви, а повторное — на нисходящей лунно-солнечной вариации силы тяжести.

Всем приведенным землетрясениям на рис. 4 (для землетрясения в Канто из-за давности лет нет данных о корональных выбросах), предшествовали корональные выбросы масс. Выбросом масс, как правило, предшествуют всплески гамма-излучения, регистрируемые с помощью научных спутников типа GOES, HESSY, SOHO, Коронограф — Ф. Данные спутников доступны в открытой печати. Правда, известны случаи [9], когда выбросы масс не сопровождались всплесками гамма-излучения. Как правило, КВМ достигают Земли после гамма-всплесков. В зависимости от траектории движения время запаздывания составляет от суток до четырех. В конце подчеркнем, что рассматривались только землетрясения, произошедшие после выбросов, и сделанные выводы при-

менимы для указанных землетрясений. Ведь землетрясения могут вызываться не только космическими причинами, но и геодинамическими процессами, происходящими в Земле.

Обычно время землетрясений связывают с новолунием. Но статистика показывает, что хотя в большей части своей землетрясения приурочены к новолуниям и полнолуниям, они также происходят в первой и последней четвертях. Тот факт, что большая часть землетрясений приурочена к новолуниям и полнолуниям, объясняется тем, что в период новолуний и полнолуний лунно-солнечные вариации силы тяжести имеют наибольшие амплитуду и градиенты во времени.

Вернемся еще раз к рис. 3б. Возникает вопрос, нельзя ли найти другое объяснение появлению неприливной аномалии. Например, изменение силы тяжести можно связать с прохождением грозового фронта. Обычно при прохождении фронта в атмосферном слое содержится какое-то количество паров воды [10]. Атмосферный фронт имеет избыточную плотность за счет содержания паров воды. Причем, содержание влаги в атмосфере до и во время прохождения грозового фронта сильно различается. Перемещение воздушных масс при грозах, как правило, происходит быстро, что может вызвать изменение силы тяжести. Притяжение воды, содержащейся в атмосфере, можно аппроксимировать притяжением простого слоя. Мощ-

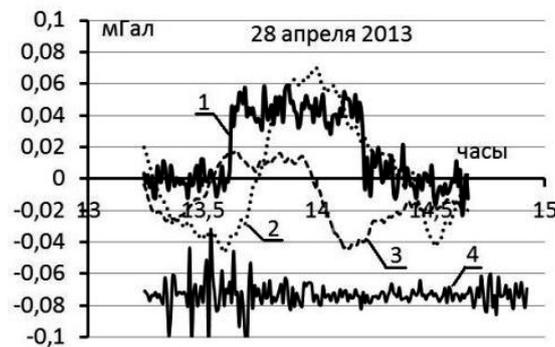


Рис. 5. Сравнение неприливных вариаций силы тяжести с вариациями вертикальных составляющих сейсмического и магнитотеллурического полей 28 апреля 2013 г.; 1 — лунно-солнечная вариация силы тяжести; 2 — трансформанта интегрирования вертикальной составляющей сейсмического поля на станции Ала-Арча (ААК); 3 — трансформанта вертикальной составляющей сейсмического поля на станции Эркинсай (ЕКС); 4 — вертикальная составляющая магнитотеллурического поля  $H_z$

ность этого слоя грубо может быть оценена величиной выпавших осадков. Если взять слой выпавших осадков 10 см, то притяжение составит 0,004 мГал. Но выпавший дождь высотой в 10 см — это уже катастрофический случай. Правда, не вся влага выпадает из атмосферы. Допустим, вся влага в атмосфере эквивалентна плоскому слою в один метр. И только в этом случае получим притяжение 0,04 мГал, что соответствует амплитуде изменения неприливных вариаций. Что же касается ситуации, проиллюстрированной на рис. 3б, то изменение неприливной вариации, пусть с натяжкой, может быть объяснено наличием грозового фронта. Следовательно, нельзя пренебрегать и метеофакторами. Ведь не зря многие землетрясения сопровождаются катастрофическими погодными явлениями. Правда, по архивным метеосводкам во время землетрясений, отраженных на рис. 3, дождей не было. Кроме того, следует отметить, что предполагаемое количество воды может сдержаться только в облаке мощностью 10 км при условии, что температура в облаке должна быть не менее 30° [10].

Помимо рассмотренных причин, всплеск на кривой неприливной вариации (рис. 3б) может быть вызван каким-либо локальным событием или конструктивными особенностями прибора, так как по времени он невелик. Чтобы проверить это утверждение, были проанализированы записи вертикальной составляющей сейсмического поля на двух мониторинговых станциях, одна из которых расположена там же, где и гравиметр (Ала-

Арча, ААК), а вторая на расстоянии 70 км от базовой станции (Эркинсай, ЕКС). На рис. 5 приведены результаты этого сравнения.

Так как сейсмические измерения по отношению к изменению поля силы тяжести сдвинуты по фазе на 90°, то сейсмические данные должны быть проинтегрированы [11, 12], чтобы сейсмическое и гравитационное поле были в одной размерности. Или наоборот поле силы тяжести должно быть продифференцировано. Дифференцирование, как видно из кривых силы тяжести, очень сильно подвержено влиянию погрешностей измерения. Интегрирование уменьшает влияние случайных погрешностей, поэтому был выбран первый вариант. Отметим, что и при интегрировании результат осложняется из-за изменения нуля-пункта и его низкочастотной составляющей, однако интегрирование все-таки предпочтительнее. Трансформанта сейсмического поля и составляющая теллуриков  $H_z$  на рис. 5 для наглядности сопоставления умножены на соответствующие коэффициенты, кроме того к ним добавлены постоянные.

На рис. 5 показаны исходная кривая неприливной вариации с рис. 2б и трансформированные сейсмические кривые [9] по станциям Ала-Арча (ААК) и Эркинсай (ЕКС). Как видно из рис. 2б, поведение интегрированных кривых совпадает с поведением вариации силы тяжести. Естественно, сейсмические кривые сглажены и несколько сдвинуты по времени относительно исходной вариации на рис. 3б, но это легко объясняется погрешностью наблюдений и трансформа-

циями сейсмических наблюдений. Таким образом, приведенная неприливая вариация на рис. 3б не связана с конструктивными особенностями гравиметрической системы, а обусловлена теми же причинами, что и в сейсмографах. Наконец, остановимся на поведении на указанном временном отрезке магнитотеллурического поля  $H_Z$  (рис. 5). Составляющая  $H_Z$  минимальна на этом отрезке и практически постоянна, а на концах отрезка — переменна и значительно больше по амплитуде. Возможно, это на первый взгляд не вполне убедительный аргумент, но, тем не менее, поле  $H_Z$  ведет во время всплеска неприливной вариации силы тяжести иначе, чем до и после всплеска. Таким образом, можно считать, что неприливые вариации силы тяжести вызваны внешними источниками.

### Заключение

На практике наблюдения неприливных вариаций силы тяжести можно использовать как индикатор при прогнозе землетрясений. Дело в том, что неприливые вариации по знаку могут совпадать с лунно-солнечными вариациями, вызывая тем самым усиление деформации земной коры. Это обстоятельство может стать спусковым крючком для землетрясения. По крайней мере, после корональных выбросов масс во время новолуний и полнолуний, когда наблюдаются максимальные значения градиентов лунно-солнечных вариаций, необходимо спрогнозировать столкновение магнитных облаков с Землей и выделить на Земле зоны, где в этот момент будут наибольшие лунно-солнечные вариации. Расчет лунно-солнечных вариаций на любой момент в настоящее время можно провести быстро и точно.

Во-вторых, данные стационарных гравиметрических наблюдений следует привлечь для изучения космической погоды, например, применяя магнитометры при изучении пространственной структуры магнитного поля. Необходимо использовать комплекс наземных и орбитальных приборов измерения силы тяжести для изучения межпланетного пространства, физики Солнца и внутренней структуры Земли.

В заключение можно отметить, что неприливые аномалии силы тяжести определяются не только динамикой геологических процессов, происходящих внутри Земли, а также однозначно обусловлены кос-

мическими процессами, которые возникают в системе Земля – Луна – Солнце. Несомненно, что лунно-солнечные вариации, являясь отражением постоянных деформационных процессов в Земле под влиянием Луны и Солнца, играют большую роль в генезисе землетрясений. Поэтому наличие неприливных вариаций уменьшает или увеличивает деформацию земной коры и тем самым провоцирует возникновение геологических процессов в земной коре, включая землетрясения. По мнению авторов изучение вариаций гравитационного и других геофизических полей в системе Земля – Луна – Солнце имеет хорошие перспективы при создании методики прогнозирования сейсмических событий.

### Литература

1. Антонов Ю. В., Воронцова Е. В. Предварительная обработка наблюдений лунно-солнечных вариаций силы тяжести // Геология и разведка. 2012. № 3. С. 63–67.
2. Longman I. M. Formulas for Computing the tidal accelerations due to the Moon and the Sun // Journal of Geophysical Research. 1959. Vol. 64. No. 12. P. 2351–2355.
3. Собственные колебания Земли / Под ред. В. Н. Жарков М.: Мир, 1964. 316 с.
4. Антонов Ю. В., Слюсарев С. В. Неприливые вариации вертикального градиента силы тяжести и их возможная связь с землетрясениями // Геол. и разведка. 1992. № 5. С. 101–105.
5. Антонов Ю. В. Возможная природа вариаций вертикального градиента силы тяжести // Геология и разведка. 1996. № 1. С. 144–145.
6. Антонов Ю. В., Антонова И. Ю., Рыбин А. К. Вариации гравитационного и магнитотеллурического полей // Вестник ВГУ. Сер. геол. 2013. Вып. 2. С. 129–133.
7. Богачёв С. А., Кириченко А. С. Солнечные вспышки // Земля и Вселенная. 2013. № 5. С. 3–15.
8. Сидоров В. И., Кичигин Г. Н., Язев С. А. О топологии выбросов коронального вещества в мощных вспышечных событиях на Солнце // Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле. 2010. Т. 3, № 2. С. 139–155.
9. Howard T., Harrison R. Stealth coronal mass ejections: A perspective // Solar Physics. 2013. Vol. 285. Iss. 1/2. doi: 10.1007/s11207-012-0217-0.
10. Половинкин А. А. Основы общего землеведения. М.: Учпедгиз, 1998. 496 с.
11. Антонов Ю. В., Антонова И. Ю. Сравнение приливных вариаций силы тяжести и верти-

кальной составляющей сейсмографа // Геофизика, 2013. № 2. С. 27–31.

12. Антонов Ю. В., Антонова И. Ю. Запаздывание приливной волны на суше // Геофизика. 2013. № 6. С. 48–51.
1. Antonov Yu. V., Vorontsova E. V. Predvaritel'naya obrabotka nablyudeniye lunno-solnechnykh variatsiy sily tyazhesti [Pre-processing of observations of the lunar-solar variations of gravity]. *Geologiya i razvedka* [Geology and exploration], 2012, no. 3, pp. 63–67. (In Russian)
2. Longman I. M. Formulas for computing the tidal accelerations due to the Moon and the Sun. *Journal of Geophysical Research*, 1959, vol. 64, no. 12, pp. 2351–2355.
3. Zharkov V. N. (Ed.) *Sobstvennyye kolebaniya Zemli* [Natural oscillations of the Earth]. Moscow, Mir Publ., 1964, 316 p. (In Russian)
4. Antonov Yu. V., Slyusarev S. V. Neprilivnye variatsii vertikal'nogo gradienta sily tyazhesti i ikh vozmozhnaya svyaz' s zemletryaseniymi [Tidal variations of gravity vertical gradient and its possible association with earthquakes]. *Geologiya i razvedka* [Geology and exploration], 1992, no. 5, pp. 101–105. (In Russian)
5. Antonov Yu. V. Vozmozhnaya priroda variatsiy vertikal'nogo gradienta sily tyazhesti [Possible variations in the nature of the vertical gravity gradient]. *Geologiya i razvedka* [Geology and exploration], 1996, no. 1, pp. 144–145. (In Russian)
6. Antonov Yu. V., Antonova I. Yu., Rybin A. K. Variatsii gravitatsionnogo i magnitotelluricheskogo poley [Variations of gravity and magnetotelluric fields]. *Vestnik VGU. Ser. geol.* [Bulletin of VSU. Series 'Geology'], 2013, iss. 2, pp. 129–133. (In Russian)
7. Bogachev S. A., Kirichenko A. S. Solnechnye vspyshki [Solar flares]. *Zemlya i Vselennaya* [Earth and Universe], 2013, no. 5, pp. 3–15. (In Russian)
8. Sidorov V. I., Kichigin G. N., Yazev S. A. O topologii vybrosov koronal'nogo veshchestva v moshchnykh vspyshechnykh sobytiyakh na Solntse [On the topology of coronal mass ejections in powerful flare events on the Sun]. *Izv. Irkutsk gos. un-ta. Ser. Nauki o Zemle* [Proc. of Irkutsk State University. Earth Science Series], 2010, vol. 3, no. 2, pp. 139–155. (In Russian)
9. Howard T., Harrison R. Stealth coronal mass ejections: A perspective. *Solar Physics*, 2013, vol. 285, iss. 1/2. doi: 10.1007/s11207-012-0217-0.
10. Polovinkin A. A. *Osnovy obshchego zemlevedeniya* [Fundamentals of general geography]. Moscow, Uchpedgiz Publ., 1998, 496 p. (In Russian)
11. Antonov Yu. V., Antonova I. Yu. Sravnenie prilivnykh variatsiy sily tyazhesti i vertikal'noy sostavlyayushchey seysmografa [Comparison of tidal variations of gravity and the vertical component seismograph]. *Geofizika* [Geophysics], 2013, no. 2, pp. 27–31. (In Russian)
12. Antonov Yu. V., Antonova I. Yu. Zapazdyvanie prilivnoy volny na sushe [The delay of the tidal wave on land]. *Geofizika* [Geophysics], 2013, no. 6, pp. 48–51. (In Russian)

Статья поступила 2 сентября 2014 г.

© Антонов Ю. В., Антонова И. Ю., 2015