

УДК523.1

ЛУННО-СОЛНЕЧНЫЕ СВЯЗИ: ОТОБРАЖЕНИЕ В ЛУННЫХ СЕЙСМОГРАММАХ

О.Б. Хаврошкин,
В.В. Цыплаков

Институт физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН

Исследования по экзосейсмичности Луны на основе каталога Накамуры привели к пониманию значимости вклада солнечной активности в сейсмические поля лунной литосферы, были обнаружены периодичности, относящиеся к длинноволновой части собственных пульсаций Солнца. Далее были изучены отображения солнечной вспышечной активности в соответствующих по времени сейсмических полях Луны уже с учетом и опто-акустических эффектов (γ - и Re-импульсные компоненты вспышки). Обе компоненты – волновая (γ , Re и фото излучение) и корпускулярная при достаточно мощной вспышке (или одной из её компонент) могут сопровождаться сейсмоакустическим откликом литосферы Луны. Существование такого взаимодействия позволит перейти к изучению структуры вспышки по ее сейсмоакустическому отклику. Появление сейсмических событий на периодах собственных осцилляций Солнца предшествует солнечным вспышкам.

Ключевые слова: лунные сейсмограммы, солнечные вспышки, статистический анализ, прогноз вспышек, осцилляции Солнца, оптоакустические сигналы.

В отличие от хорошо развитой и структурированной солнечно-земной физики понимание солнечно-лунных связей находится в зачаточном состоянии. Сейсмическое проявление активности Солнца на Луне было замечено давно в виде периодичностей сейсмических процессов, совпадающих с периодами собственных осцилляций Солнца. Дальнейшее развитие этих исследований позволило применить результаты обработки записей лунной сейсмичности для определения модели Солнца по Дельгадо. Параллельное сопоставление развития солнечной вспышки и предвспышечной сейсмичности Луны выявило, что при росте активности Солнца появляются сейсмические события на периодах собственных осцилляций Солнца, что можно использовать как прогностиче-

LUNAR-SOLAR CONNECTION: DISPLAY IN LUNAR SEISMOGRAMS

O.B. KHAVROSHKIN, V.V. TSYPLAKOV

Studies on the exo -based seismic Moon Catalog Nakamura led to the understanding importance of the contribution of solar activity in the seismic field lunar lithosphere. There were found periodicity related to free solar oscillations. Next there were studied of solar flare activity display in the appropriate time Moon seismic fields already with given and opto - acoustic effects (γ - and X-ray pulse of the flash components). Discover was both components - the wave (γ , Re and photo emission) and corpuscular sufficiently from powerful flash (or one of its component) may be accompanied by seismic acoustic response of the lunar lithosphere. The existence of such interactions will advance to the study of the structure on its flash seismic - acoustic response. Other peculiarity: appearance of seismic events in the ownership period of the oscillations of the Sun preceded by solar flashes.

KEYWORDS: lunar seismogram, solar bursts, statistic analyze, prediction bursts, solar oscillations, optic- acoustic signals.

ский признак мощных вспышек. Затухание сейсмических волн солнечного происхождения порождает собственные тепловые потоки, которые из-за природы сейсмичности приурочены к приповерхностным структурам коры и ядру Луны. С учетом другой астрофизической и космологической информации, полученной из анализа каталога Накамуры методами нелинейной сейсмологии, логично рассмотрение Луны, и в первую очередь ее сейсмичности, как системы – волновое поле и гигантский астрофизический и космический детектор.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие исследований по экзосейсмичности Луны на основе каталога Накамуры (КН) привело

к пониманию значимости вклада солнечной активности в сейсмические поля лунной литосферы, были обнаружены периодичности, относящиеся к длинноволновой части собственных пульсаций Солнца. Поэтому необходимо продолжить изучение отображения солнечной вспышечной активности в соответствующих по времени сейсмических полях Луны уже с учетом и опто-акустических эффектов (γ - и Re-импульсные компоненты вспышки). То есть, обе компоненты – волновая (γ , Re и фото излучение) и корпускулярная при достаточно мощной вспышке (или одной из её компонент) могут сопровождаться сейсмоакустическим откликом литосферы Луны. Обнаружение такого взаимодействия позволит перейти к изучению структуры вспышки по ее сейсмоакустическому отклику и будет иметь общезначимое значение. С другой стороны, особенности структуры волнового поля во временной окрестности момента воздействия вспышки, вероятно, влияют на длительности сейсмограмм (длительность рассматривается как период волнового воздействующего процесса), их следует учитывать при анализе их гистограмм. Так, волновое поле литосферы до воздействия и после может иметь важные отличия, при этом, вероятно, подобные особенности могут отображать динамику волновых процессов, происходящих на Солнце.

Суммарная первичная энергия воздействия солнечной вспышки на Луну имеет несколько составляющих и может быть сопоставима с кинетической энергией крупного метеорита. Поскольку метеоритная сейсмичность составляет заметную часть от суммарной лунной, то поиск солнечной компоненты лунной сейсмичности представляет научный интерес. Ранее уже отмечались факты связи Солнца и солнечной активности с лунной сейсмичностью [12–14]. Дальнейшие исследования необходимо расширить в сторону более широкого использования КН и особенностей параметров Солнца и солнечного ветра [9, 10]. Поэтому при поиске сейсмограмм-следствий воздействия на лунную поверхность межпланетных ударных волн (МУВ) вспышечного происхождения определяются длительности сейсмограмм.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

По данным лунной экзосейсмичности и простейшим оценкам акустического (сейсмического) волнового отклика полупространства (лунной поверхности) на γ - и Re-импульсные и регулярные излучения ориентировочно представлена энергетика общего внешнего воздействия на Луну [6] (табл. 1). При этом 1 выбирались ближайшие (<100 пс) двойные звезды с массами, превышающими 10 масс Солнца и теряющими огромные потоки массы в виде звёздного ветра и выбросов.

Представленные данные еще будут уточняться и дополняться, однако, даже на первом поисковом этапе

в исследование лунной экзосейсмичности тем самым вносится необходимый элемент организации и классификации. Пространственно-временные и сезонные особенности газопылевых потоков, порождающих сейсмоакустические процессы на Луне, частично изучены. Также по вариациям сейсмичности обнаружены некоторые периодичности, обусловленные воздействием на лунную поверхность солнечного ветра, модулированного собственными колебаниями (пульсациями) Солнца [12–14] (табл. 2).

Данные (табл. 2) не столь точны, но для регистрации оптическими методами это не доступно, и даже такая точность поможет выбрать предпочтительную модель внутреннего строения Солнца. Полученное разрешение трудно улучшить, так как длительности сейсмограмм определяются не только пульсациями солнечного ветра (потока протонов), но и вкладом γ , Re-излучений, также связанных с пульсациями. Поскольку γ , Re-излучения важные составляющие солнечной вспышки, традиционного объекта изучения, то необходим метод поиска сейсмического отклика дневной поверхности Луны на воздействие МУВ.

ВСПЫШКИ, МУВ И СЕЙСМИЧНОСТЬ

Часть структуры вспышки – временной интервал между приходом γ , Re-излучений и последующим потоком энергичных частиц – это параметр, позволяющий найти сейсмический отклик Луны от воздействия вспышки. То есть следует ожидать проявление фотоакустического (точнее сейсмического) эффекта или сейсмического отклика коры Луны на рентгеновскую и γ -составляющую в зависимости от их мощности, используя аналогии с лазерной физикой [2, 6]. Вспышка вначале вызывает фото-сейсмический сигнал, а затем сейсмические события, обусловленные сопровождающим потоком энергичных частиц в случае их достаточной энергии. При этом, если момент взаимодействия излучений с дневной поверхностью определяется довольно точно, то форма, амплитуда и момент возникновения сейсмического отклика приповерхностных структур коры Луны содержат неопределенности, часть из которых еще изучена недостаточно. Так, механизм передачи энергии излучений вспышки в геологическую среду достаточно прост – рассеивание и передача энергии γ и Re квантов кристаллической решетке, последующая диссипация в тепло. Оба процесса фактически возбуждают в геологической структуре лунной коры тепловые возмущения, образующие сейсмическую волну, характерное время формирования которой еще требует специальной оценки. Дополнительные сложности также возникают из-за того, что среда находится в переменном во времени напряженном состоянии (воздействие солнечно-земных приливов, например). Поэтому в момент максимальных приливных деформаций излучение вспышки послужит триггерным воздействием, а сейсмический отклик бу-

ТАБЛИЦА 1.

Внешние воздействия на лунную поверхность

Источник	P_{\min} , Па	P_{\max} , Па	$P_{\text{ср}}$, Па	Поток энергии, Вт/м ²	$\Sigma P_{\max} \times S_H$
					Луна
Давление солнечного света			4.8×10^{-7}	1.4×10^3	5×10^6
Солнечный ветер	1×10^{-9}	1×10^{-7}	2.5×10^{-9}	1.25×10^{-3}	1×10^6
Газо-пылевые потоки Солнечной системы	1×10^{-8}	1×10^{-6}	2×10^{-8}	2.5×10^{-5}	1×10^7
Газо-пылевые потоки других звезд	5×10^{-9}	1×10^{-7}	1×10^{-8}	2.5×10^{-3}	5×10^6
Коротковолновое излучение Солнца, вспышки, МУВ	$>1 \times 10^{-7}$	$>1 \times 10^{-5}$	2.5×10^{-8}	1.25×10^{-2}	1×10^7
Пульсар, γ -, Re-импульсы	$<1 \times 10^{-10}$	$<1 \times 10^{-9}$	2.5×10^{-11}	1.25×10^{-3}	1×10^3
Тесные двойные, Re	1×10^{-8}	1×10^{-6}	1×10^{-7}	2.5×10^{-2}	5×10^7

Примечание. P – давление; P_{ср} – среднее значение давления; E – поток энергии, $\Sigma P_{\max} \times S_A$ – суммарная максимальная сила, действующая на полушарие Луны.

ТАБЛИЦА 2.

Основные спектральные пики временных вариаций сейсмичности Луны солнечного происхождения

N	Амплитуда A, отн. ед.	Период, час (набл.)	Период, мин (теор.)	Разрешение Δ , мин
1	0.54	3.85	230	3.0
2	0.42	3.42	204	3.0
3	0.46	3.03	182	3.0
4	0.46	2.87	172	3.0
5	0.40	2.37	142	2.0
6	0.40	2.26	136	2.0
7	0.35	2.10	126	2.0
8	0.40	1.95	117	1.0
9	0.30	1.80	108	1.0
10	0.40	1.35	81	1.0
11	0.25	1.35	77	1.0
12	0.20	1.28	66	1.0
13	0.20	1.10	57	1.0
14	0.15		45	0.5

дет усилен из-за эффектов нелинейной сейсмологии [4, 5, 7, 11, 15–18]. Еще более неопределенная ситуация с последующим потоком частиц. Поэтому за основной критерий примем мощность вспышки. Рассмотрим несколько примеров. По приблизительной оценке кинетическая энергия МУВ, действовавших на Луну в августе 1972 г., следующие. Импульс полной энергии этих событий составляет: после 1-й МУВ – около 1×10^{10} Дж.; после 2-ой МУВ около 5×10^{10} Дж.; после 3-й МУВ около 1×10^{12} Дж. Эта энергия заметно превосходит энергии упавших метеоритов на Луну в 133 и 199 дни 1972 г.: ($\sim 5 \times 10^{10}$ - 5×10^{11} Дж.). Максимальная чувствительность сейсмической сети (с/с) «Аполлон» находилась в герцовом диапазоне, а развитие МУВ

протекает в диапазоне минут и часов, что исключает вероятность прямой регистрации МУВ в виде лунных сейсмограмм [19, 20]. Подобный вывод справедлив в рамках линейной сейсмологии, применение которой к лунной сейсмичности оказалось малоэффективным. Ранее исследования лунной сейсмичности статистическими методами обнаружили эффект импульсной модуляции сейсмического фона (шума) солнечно-земными приливами, а из анализа лунных сейсмограмм – существование сейсмоакустической эмиссии [10, 12, 13, 15]. Сейсмоакустическая эмиссия и модуляция для внеземной сейсмологии процессы малознакомые, но хорошо представлены в [11].

ЛУННЫЕ МУВ СЕЙСМОГРАММЫ, ИХ МОДИФИКАЦИЯ И АНАЛИЗ

Ярко выраженная модуляция лунной сейсмичности солнечно-земными приливами и ее особенности определяют нелинейность сеймики Луны как одну из главных геофизических особенностей процесса, позволяющей рассматривать Луну как мегадетектор внешних воздействий (от приливных сил до пульсации солнечного ветра и модуляции газопылевых потоков). Соответственно, при указанной энергии МУВ и их воздействии на дневную поверхность Луны следует ожидать существование лунных сейсмограмм – сейсмоэмиссионного отклика МУВ. Выделение такого отклика в отличие от регистрации модуляционных процессов и сейсмоакустической эмиссии будет иметь по очевидным причинам: статистический характер зависимости от фазы прилива интенсивности сейсмоэмиссионного отклика (тензочувствительность); неопределенности длительности времени индукции от момента воздействия частиц и излучений на геологические структуры коры до возникновения или начала заметного повышения уровня сейсмоакустической эмиссии – формирования лунной сейсмограммы. Подобные процессы наблюдали и ранее, но не придавали им должного значения [10]. То есть, сейсмический от-

клик Луны на МУВ может проявиться как почти непосредственно после начала воздействия, так и через несколько минут или даже часов как, например, при приливных воздействиях.

Поэтому предварительное исследование возможной связи сейсмических событий на Луне с вариациями потоков солнечного ветра проведено без учета воздействия фото-сейсмических эффектов и эффектов от энергичных частиц. При анализе использовались довольно хорошо документированные данные о приходе к Земле экстремально сильных межпланетных ударных волн, генерированных известными большими солнечными вспышками, произошедшими в первой декаде августа 1972 г. [18, 19]. Этот отрезок времени выбран для изучения прежде всего потому, что для него имеются данные лунных сейсмических станций, а возмущения солнечного ветра в этих событиях – мощные. Дальнейший анализ этих данных проводился с представлением их в виде сейсмического коэффициента K – количества общего времени или суммарной длительности сейсмических событий (СС) за одни сутки и последующим построением временного ряда сейсмического коэффициента $K(t)$ (рис. 1). (В 1972 г. это примерно с 900 по 1200 день от начала регистрации СС).

Со 2 по 7 августа 1972 г. на Солнце произошли крупные вспышки [1, 19, 20]: 2 августа вспышка в 3.16 UT; и в 19.58 UT; 4.08 вспышка в 06.21 UT; и 7.08 – в 15.16 UT. В результате в межпланетное пространство вышли четыре сильные МУВ, которые через несколько дней достигли Земли и Луны: МУВ1 – 4.08 в 1.19 UT; МУВ2 – 4.08 в 2.20 UT; МУВ3 – 4.08 в 20.54 UT; МУВ4 – 8.08 в 23.52 UT. Одновременно сейсмическая сеть станций «Аполлон» зафиксировала ряд сейсмических событий, что отмечено в КН за период с 1969 г. по 1977 г. Данные анализировались на основе статистического подхода без привлечения каких-либо физических механизмов. Для сопоставления событий на Солнце (вспышек), возмущений солнечного ветра, связанных с приходом к Луне МУВ, и сейсмических событий (сейсмограмм) использовалась часть КН. За исследуемый период на основе

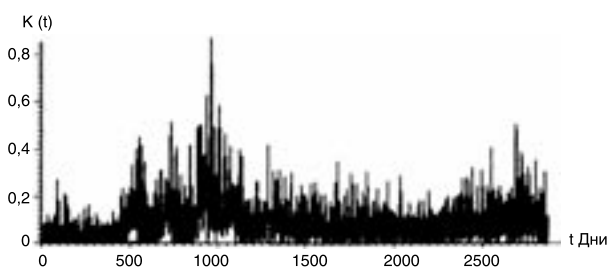


РИС. 1.

Временной ряд сейсмического коэффициента $K(t)$ за все время регистрации сейсмических событий (СС) на Луне

КН была построена редуцированная сейсмическая функция Луны (рис. 2). На графическом представлении этой функции по оси абсцисс отложено текущее время (дни) с разрешением 10 мин., а по оси ординат – амплитуда в относительных единицах сейсмического сигнала. Редуцирование заключалось в уменьшении амплитуды известных, отождествляемых с другими событиями сигналов до 0,5–0,4 от первоначальной и анализе оставшихся сигналов (сейсмограмм), не имеющих конкретных источников. Далее убирались (уменьшались) из рассмотрения заведомо известные по КН события (импактные сейсмограммы от метеоритов – С, L, S).

Рассмотрены события, произошедшие со 2 по 10 августа 1972 г. На редуцированной сейсмической функции событий на Луне буквами отмечены моменты вспышек на Солнце (Ф) и моменты прихода МУВ к Земле (М) (и Луне) – рис. 3, 4.

На фрагменте рис. 3 (длительность – сутки, 1440 мин) сейсмической функции Луны точно указаны моменты солнечных вспышек за 2 августа 1972 г. В это время Луна располагалась примерно на том же удалении от Солнца, что и Земля. По оси абсцисс отложено текущее время в количестве 10-минутных интервалов за сутки (всего 144), а по оси ординат – амплитуда событий из КН. Физический механизм возбуждения сейсмических событий на Луне непосредственно сол-

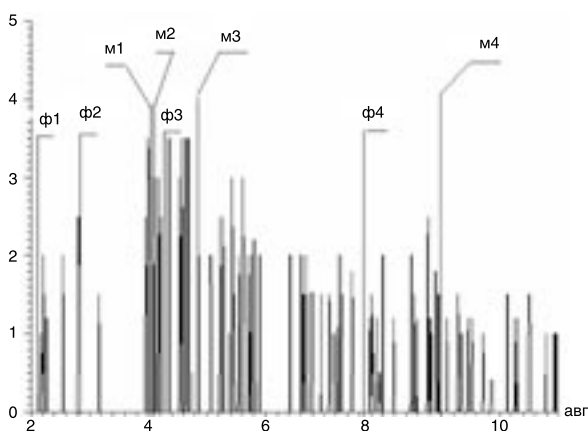


РИС. 2.

Функция сейсмичности за время зарегистрированных солнечных вспышек

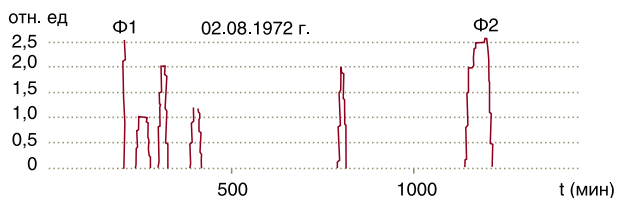


РИС. 3.

Фрагмент сейсмической функции за 2 августа

нечной вспышкой с длительностью до десятков минут и содержащей помимо фотонов видимого диапазона кванты излучения рентгеновского и гамма диапазона подобен так называемым оптоакустическим сигналам [6]. То есть в результате сложного взаимодействия Ре и γ квантов и оптических фотонов с поверхностью Луны формировалось сейсмическое поле, которое и регистрировалось сейсмической сетью «Аполлон». Результирующее поле неоднородно по интенсивности сейсмических волн и сейсмоакустической эмиссии, а максимумы амплитуд приурочены к зонам концентрации напряжений в приповерхностных структурах коры. Поэтому время прихода волн к сейсмоприемникам различно и зависит также от скоростей сейсмических волн в коре (1.0–3.0 км/с). Как следует из рис. 3, момент прихода солнечной вспышки (Ф1) и сейсмического события (С1) по времени достаточно близки. Оценим вероятность случайности двух совпадений (Ф1; Ф2) со вспышками. Если физика механизма превращения «фотоудара» в сейсмическое событие известна, то точность определения момента «фотоудара» на Луне зависит от многих факторов (см. выше). К тому же, основную энергию «фотоудара» дают гамма и рентгеновское излучение, которые не регистрируются спутниками. На рис. 3 наблюдаются всего два совпадения в пределах 50 минутного интервала за сутки. Если предположить вероятность попадания в интервал как $P_1 = 15^{-1}$ (равновероятно по всем интервалам), то вероятность двух совпадений P_{06} равна пересечению вероятностей P_1, P_2 ($P_{06} = P_1 \times P_2 = 1/225$), то есть случайность такого совпадения незначительна. На рис. 4 выделен фрагмент (сутки, 1440 мин.) сейсмической функции Луны с указанием точных моментов не только солнечной вспышки, но и моментов прихода МУВ за 4 августа 1972 г.

В это время Луна по отношению к Земле находилась в последней четверти, которая началась 2 августа в 8 час. 03.2 мин. и закончилась 9 августа в 5 час. 26.6 мин. по УТ. Поэтому, при расположении с/с «Аполлон» вблизи центра диска Луны (на расстояниях от 100 до 500 км), а значит и вблизи терминатора, «фотоудары» воздействовали на освещенную поверхность Луны с края диска 2.08.72. Далее, 4 августа 72 г. станции уже были за терминатором и только МУВ от солнечного

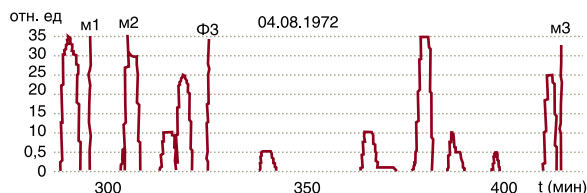


РИС. 4.

Сейсмическая функция записей событий на Луне с указанием моментов прихода ударных волн солнечного ветра за 4 августа 1972 г.

ветра (удар которых в основном пришелся на обратную сторону Луны) могли вызвать лунные сейсмические события. Фотоудары по обратной стороне, если и вызвали сейсмические события, то не могли быть зарегистрированы с/с «Аполлон» из-за их малости, рассеяния и затухания. Поэтому отклик на МУВ 3 (удар по обратной стороне Луны) существует, но проявляется в следующие сутки в виде серии малых событий, как например, после двух ударов МУВ1 и МУВ2, когда первоначально проявляется МУВ2 и через 150 мин. появилось три обычных события. На рис. 5а, б представлены данные динамического давления солнечного ветра с 3 по 13 августа 1972 г. (5а), и редуцированная сейсмическая функция событий на Луне (5б).

Сейсмические события на Луне, связанные с низкочастотными процессами типа солнечно-земных приливов, межпланетных ударных волн солнечного ветра, не регистрируются сейсмостанциями Луны непосредственно и возникают после воздействий через

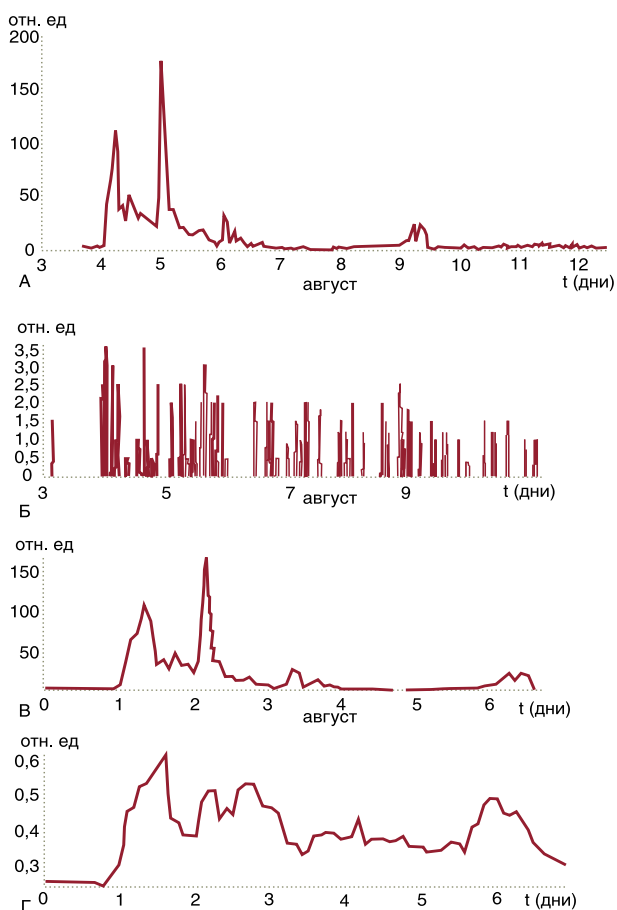


РИС. 5.

а, б, в, г (а, б) – данные по солнечному ветру и сейсмическим событиям на Луне с 3 по 13 августа 1972 г., (в, г) – представлены две синхронные реализации данных вариаций давления солнечного ветра (5в) и реализации огибающей сейсмических событий на Луне (5г). Интервал оцифровки давления ветра и огибающей сейсмической функции – 2 часа

некоторое время порядка часа и более. Поэтому для сравнения данных МУВ и сейсмике Луны, выраженной в виде отдельных событий с амплитудой определенной по каталогу Накамуры, необходимо лунные данные представить в виде огибающей с интервалом осреднения в несколько часов (~3). На рис. 5 в, г представлены две синхронные реализации данных вариаций давления солнечного ветра (5в) и реализации огибающей сейсмических событий на Луне (рис. 5г). Интервал оцифровки давления ветра и огибающей сейсмической функции – 2 часа. Данные взяты за период с 3 по 10 августа 1972 г. (по оси абсцисс отложены текущие дни). Из сравнения рис. 5а и рис. 5в заметны некоторые несущественные изменения, обусловленные частотой оцифровки (2 ч). Далее определялась функция скользящей корреляции в 29% окне между огибающей сейсмической функции и давлением солнечного ветра (рис. 6). 29% окно определялось статистической представительностью (более 20 независимых точек в окне).

Коэффициент корреляции (интервал корреляции ~50 часов) на первых двух сутках (3, 4 августа) равен 0,84, далее по мере захода Солнца на видимой стороне Луны падает до 0,6 (5, 6 августа) и через 80 часов – до нуля и ниже. Но через 110 часов, в новолуние 9 августа (см. выше) коэффициент корреляции вновь увеличивается до 0,7. Все эти значения коэффициентов корреляции значимы $P > 0,95$. Это доказывает, что четвертая вспышка 7 августа и ударная волна солнечного ветра по обратной стороне Луны, пришедшая 8 августа, сопровождалась появлением дополнительных (к приливным и метеороидным) сейсмических событий на Луне. Интервал скользящей корреляции 50 часов (при 2-часовой оцифровке) и сам факт высокой корреляции (до 0,84) говорит о том, что именно M1, M2, M3 также вызвали сейсмические события. Факт значимой корреляции при ударе МУВ4 (по обратной стороне Луны) важен не только для выявления дополнительных сейсмических событий ею порожденных, но и представляет общезначимый интерес.

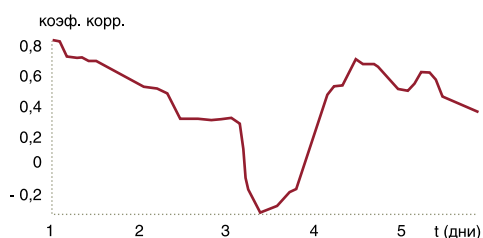


РИС. 6.

Функция скользящей корреляции между огибающей сейсмической функции и давлением солнечного ветра (по оси абсцисс отложено количество отсчетов с 2 ч. интервалом)

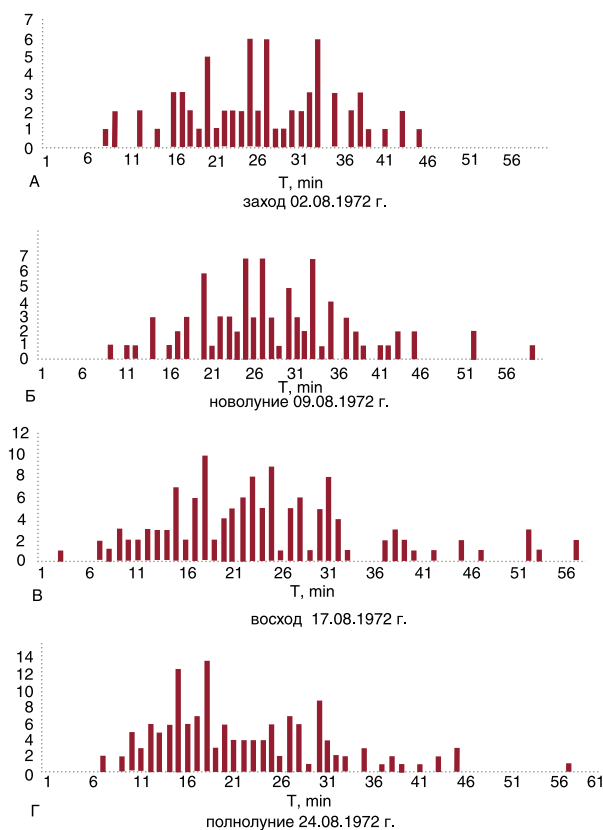


РИС. 7 А, Б, В, Г.

Гистограммы длительностей всех лунных сейсмических событий по четвертям в диапазоне от 1 до 60 мин.: а – заход, б – новолуние во время вспышек, в – восход, г – полнолуние после вспышек

СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ, МУВ И ПУЛЬСАЦИИ СОЛНЦА

При анализе первоначально были построены гистограммы длительностей записей сейсмических событий (сейсмограмм) на Луне имевших место задолго до солнечных вспышек, во время вспышек и после вспышек (рис. 7) за 1972 г. Рассмотрение гистограмм в диапазоне длительностей сейсмограмм, сопоставимых с короткими периодами собственных колебаний Солнца, обнаружило изменения их длительностей по четвертям синодического лунного периода. Поэтому далее строились гистограммы длительностей всех лунных сейсмических событий за 1972 г. по четвертям (длительностью 7,37сут) рис. 7(а, б, в, г): а – заход, б – новолуние, в – восход, г – полнолуние после вспышек 2, 4, 8 августа 1972 г., при том заметное число длительностей совпадало с периодами собственных колебаний Солнца.

Для количественных оценок замеченных особенностей гистограмм и доказательства существования пиков на периодах осцилляций Солнца, на основе трех моделей собственных колебаний Солнца была построена тестовая гистограмма (периоды осцилляций в диапазоне от 13 до 60 мин.). Для сравнения в этом же

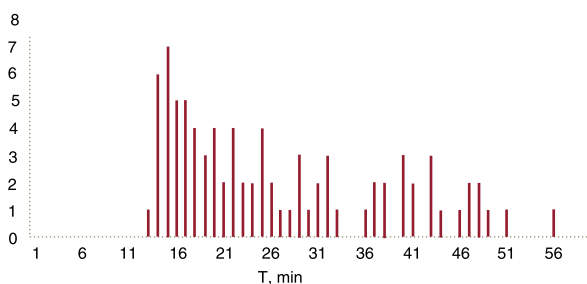


Рис. 8.

Синтетическая тестовая гистограмма

диапазоне построены и гистограммы количества теоретических периодов по разным модам (f, p) и моделям (А, В, С) Солнца [21]. При интервале для периодов в 1 мин. было подсчитано количество теоретических периодов по всем моделям Солнца и затем построена синтетическая тестовая гистограмма (рис. 8).

Для получения количественных оценок не случайности связи между длительностями собственных колебаний (осцилляций) Солнца и длительностями сейсмических событий (сейсмограмм) в диапазоне осцилляций определялись коэффициенты корреляции (табл. 3) между тестовым массивом и массивами: восход до, полнолуние до вспышек, заход, новолуние во время вспышек, восход, полнолуние после вспышек (столбцы 2–7).

В табл. 3 представлены результаты оценки коэффициентов корреляции между тестовой гистограммой (строка 3) и гистограммами: восход до (столбец 2), полнолуние до вспышек (столбец 3), заход (столбец 4), новолуние во время вспышек (столбец 5), восход (столбец 6), полнолуние после вспышек (столбец 7).

Для получения значимости полученных коэффициентов корреляции, т.е. проверки нулевой гипотезы мы воспользовались t -критерием Стьюдента: получаем значение t по формуле:

$$t = r \times \frac{\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$$

ТАБЛИЦА 3.

№	1	2	3	4	5	6	7
1		Восх.72	Полн.72	Зах.72	Нов.72	Вос.72	Полн.72
2		dvs	dpl	z	n	vs	pl
3	Коэф. корр.	$r=0,26$	$r=0,41$	$r=0,28$	$r=0,17$	$r=0,49$	$r=0,59$
4	Квантили	10%	0,5%	5%		0,01%	0,005%
5	Вер. не нуль	0,9	0,995	0,95	-	0,999	0,9995

где: r – коэффициент корреляции, n – количество степеней свободы (в нашем случае = 45, т.к. при подсчете корреляции убираем первые 13 нулей).

При нулевой гипотезе выборочное распределение этой статистики t есть распределение Стьюдента с $n-2$ степенями свободы. Поэтому для каждого вычисленного коэффициента корреляции по таблице процентных точек t -распределения Стьюдента получаем квантили для каждого коэффициента корреляции (четвертая строка таблицы 1). Например, для коэффициента корреляции $r = 0,59$ с квантилем 0,005% он не равен нулю или значимый с вероятностью $P > 0,9995$. То же для других коэффициентов корреляции. При этом количество сейсмических событий на Луне увеличилось от 41 до вспышки до 134 после вспышки.

ОСОБЕННОСТИ ВСПЫШЕЧНОЙ СЕЙСМИКИ И ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ЛУНЫ

Воздействие солнечной вспышки на лунную поверхность можно представить в виде 2 частей: (1) фото-акустической – суммарного воздействия γ, Re , солнечных космических лучей и оптического излучения; (2) давлением интенсивных межпланетных ударных волн, определяемых в основном протонной составляющей и запаздывающих относительно 1-й части на несколько дней. По энергетике вторая часть может превосходить первую. Учитывая простоту определения времени прихода первой части, рассмотрим особенности только ее распространения и взаимодействия. Примем случай зенитного расположения приемника (с\с «Аполлон») относительно источника (Солнца). Интенсивность воздействия по дневной поверхности I описывается как $I = I_0 \cos \alpha$ (I_0 – интенсивность зенитного воздействия, α – широта пункта регистрации воздействия или исследуемой части дневной поверхности с поправкой на наклон лунной оси). Суммарная энергия воздействия E_s на освещенное полушарие – $E_s = \pi I R^2 T$ (R – радиус Луны, T – длительность воздействия 1-й части вспышки). Для сравнения энергии вспышечной активности Солнца $E_{вс.}$ с энергией собственно Луны $E_{т.п.}$ (в основном с тепловым потоком) в рамках годичной длительности получено соотношение $k \sim E_{вс.} / E_{т.п.} \sim 10^{-3-4}$ %. Такие значения k в настоящее время – незначительная поправка для анализа общей картины тепловой истории [8]. Однако годичная энергия вспышек (~90%), как правило, определяется не более, чем 1–3 вспышками, при общей длительности их воздействия 1–3 дня, первой части – несколько часов. В эти периоды $k \sim 1,0$, поэтому проведение тепловых измерений на Луне непосредственно после вспышек может привести к некорректным результатам. Как это показано выше, вспышки порождают сейсмичность. На фоне слабой собственной сейсмичности Луны вспышечная – не уступает ей по основным параметрам (амплитуда, длительность). К. П. Д. преобразования энергии

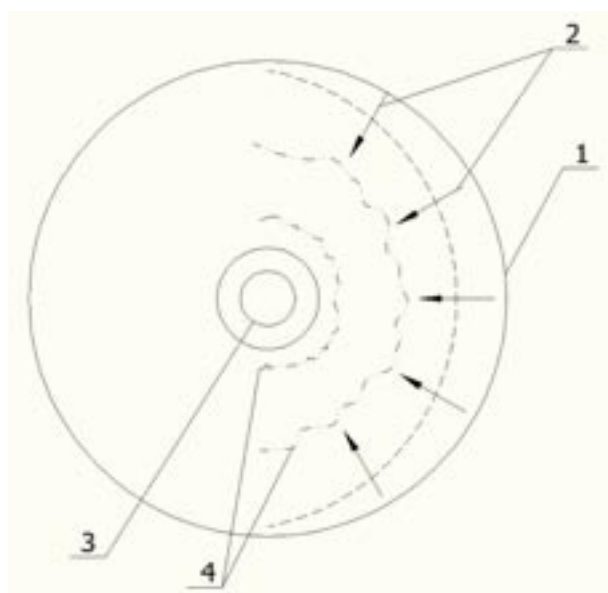


Рис. 9.

Общая картина образования и распространения, вспыхечных P, S – волн во внутренних структурах Луны. 1 – Результирующий слой опто-акустического воздействия вспышки на дневную поверхность; 2 – Вспыхечные P, S-волны; 3 – Лунное ядро; 4 – искаженные неоднородностями фронты вспыхечных P, S-волн

первой части вспышки на основе обширного опыта сейсморазведки не превысит 3–7%, что может составить до 0,1 мегаватт. Поскольку первая часть вспышки распространяется со скоростью света, то при взаимодействии с дневной поверхностью освещенного полушария одновременно образуются P, S-волны полусферической формы, направляющиеся к центральной зоне Луны (рис. 9), а прямые и отраженные P, S-волны образуются в зоне лунного ядра (рис. 10).

Волновые фронты из-за неоднородностей коры подходят к внутренним границам уже искаженными и при отражении распространяются по тем же неоднородностям, принимая в первом приближении первоначальную гладкую форму, что подобно эффекту обращения волнового фронта в нелинейной оптике [3]. Так как при подходе к ядру Луны происходит концентрация волновой энергии, а следовательно рост потерь на диссипацию, то энергия вспыхечных волн в основном передается помимо приповерхностных структур коры центральной зоне. Наиболее эффективно это происходит с S- волнами из-за расплавленной зоны оболочки ядра и пограничной с ядром размягченной части. P-волны испытывают более сложные трансформации, проходя через ядро и в конечном счете, отражаясь от дневной поверхности противоположного полушария и повторяя при обратном движении все искажения фронта, но с обратным знаком (рис. 10). То есть также должны наблюдаться эффекты, аналогичные

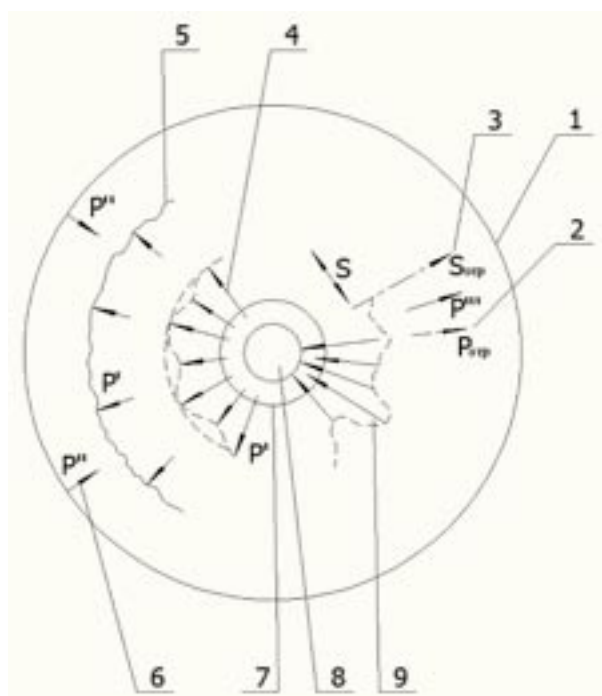


Рис. 10.

Прямые и отраженные P, S-волны в зоне лунного ядра. 1 – дневная поверхность; 2 – отраженные от дневной поверхности полусферы – антипода и прошедшие ядро P-волны; 3 – отраженные от границы жидкого ядра S-волны; 4 – Прошедшие ядро P-волны; 5 – Фронт P^{''}- волн; 6 – отраженные от дневной поверхности P^{''}- волны; 7 – Жидкое ядро; 8 – Внутреннее твердое ядро

обращению волнового фронта и сильное затухание в центральной зоне. Суммарная энергия волнового поля ориентировочно составляет ~0,1 мегаватт. Концентрация волновой энергии в объеме центральной зоны с последующей диссипацией в тепло увеличит температуру ядра примерно пропорционально отношению масс ядра и остальной Луны (~10⁶⁻⁷). Эти же волновые эффекты стимулируют и дифференциацию вещества центральной зоны. Подобная модель взаимодействия солнечных вспышек и небесных тел с незначительными изменениями применима для всех планет и их спутников, лишенных атмосферы; существование атмосферы значительно усложняет картину взаимодействия и требует новых подходов.

Выводы

Солнечная вспышка содержит две компоненты: волновую (γ , Re и фото-излучения) и корпускулярную, которые способны вызвать сейсмоакустический отклик литосферы Луны. Энергичные солнечные вспышки через поток частиц и излучений (γ , Re) и взаимодействие частиц с локальными магнитными полями стимулируют рост числа сейсмических событий на Луне. Корреляции тестовой синтетической солнечной гистограммы с гистограммами длительностей сейсми-

ческих событий на Луне отображает и дополнительное воздействие солнечного ветра, модулированного собственными колебаниями Солнца. Осцилляции Солнца воздействуют на солнечный ветер задолго до вспышки, поэтому, наблюдая и анализируя сейсмический режим на Луне, можно прогнозировать и мощные солнечные вспышки.

ЛИТЕРАТУРА

1. ВАЙСБЕРГ О.Л., БОГДАНОВ А.В., СМИРНОВ В.Н., РОМАНОВ С.А. Космич. исслед. Т. 13. С. 859–865, 1975.
2. ГУСЕВ В.Э., КАРАБУТОВ А.А. Лазерная оптоакустика. М., 1991.
3. ЗЕЛЬДОВИЧ Я.Б., ПИЛИПЕЦКИЙ Н.Ф., ШКУНОВ В.В. Обращение волнового фронта М.: Наука, 1983. С. 247.
4. РЫКУНОВ Л.Н., ХАВРОШКИН О.Б., ЦЫПЛАКОВ В.В. Модуляция высокочастотных микросейсм // Докл. АН СССР. 1978. №2. С. 303–306.
5. РЫКУНОВ Л.Н., ХАВРОШКИН О.Б., ЦЫПЛАКОВ В.В. Явление модуляции высокочастотных сейсмических шумов Земли. Диплом на открытие №282 Госкомизобретений СССР, 1983.
6. САМОХИН А.А. Действие лазерного излучения на поглощающие конденсированные среды // Тр. ИОФАН, 1988. Т. 13.
7. ТАНАКА С., ХАВРОШКИН О.Б., ЦЫПЛАКОВ В.В. Блочность литосферы Луны и сейсмичность // Инженерная физика. 2012. №1. С. 39–54.
8. ЛЮБИМОВА Е.А. Космохимия Луны и планет. М.: Наука. 1975. С. 241–257.
9. ХАВРОШКИН О.Б., ЦЫПЛАКОВ В.В. Газопылевые потоки как самостоятельный космогонический фактор // Геофизические исследования. Вып. 2. М.: ИФЗ РАН, 2005. С. 133–137.
10. ХАВРОШКИН О.Б., ЦЫПЛАКОВ В.В. Лунные сейсмограммы метеороидных импактов: структура, элементы // Вестник отделения наук о Земле РАН. 2009, №1(27).
11. ХАВРОШКИН О., ЦЫПЛАКОВ В. Нелинейная сейсмология: космическая составляющая. Palmarium Academic Publishing, 2013. 516 с.
12. КХАВРОШКИН О.В., ТСУПЛАКОВ V.V. Meteoroid stream impacts on the Moon: Information of duration of the seismograms // Proc. Conference METEOROID 2001. Swedish Institute of Space Physics. Kiruna, Sweden, 6–10 August 2001.
13. КХАВРОШКИН О.В., ТСУПЛАКОВ V.V. Temporal structure of meteoroid streams and Lunar seismicity according to Nakamura's catalogue // Proc. Conference METEOROID 2001. Swedish Institute of Space Physics. Kiruna, Sweden, 6–10 August 2001.
14. КХАВРОШКИН О.В., ТСУПЛАКОВ V.V. Moon exogenous seismicity: meteoroid streams, micrometeorites and IDPs, Solar wind // Herald of the DGGGMS RAS: Electr. Sci.-Inf. J., 4(21) 2003 http://www.scgis.ru/russian/cpl251/h_dggms/1-2003/scpub-3.pdf.
15. FLANDES A. AND H. KRUGER. CIR Modulation of Jupiter dust stream detection // Workshop on Dust in Planetary Systems. 2005.
16. КХАВРОШКИН, О.В., НИКОЛАЕВ А.В., РЫКУНОВ Л.Н., ТСУПЛАКОВ V.V. Methods, results and perspectives of the high-frequency seismic noise and vibrosignals study // XVII General Assembly IUGG. Hamburg, 15–27 August 1983. 6th Reports of Microseisms Commission. 1985. P. 123–149.
17. ДИАКОНОВ В.Р., КАРРЬЕВ В.С., КХАВРОШКИН О.В., НИКОЛАЕВ А.В., РЫКУНОВ Л.Н., СЕРОГЛАСОВ R.R., ТРОЯНОВ А.К., ТСУПЛАКОВ V.V. Manifestation on earth deformation processes by high frequency seismic noise characteristics // Physics of the Earth and Planetary Interior. 1990. Vol. 63. P. 151–162.
18. КХАВРОШКИН О.В., ТСУПЛАКОВ V.V., БЕРЕЗНОВА А.А., ВОЛВАЧ А.Е., ВОЛВАЧ Л.Н. Seismic acoustic lunar fields and lunar electromagnetic (nonthermal) emission // Bulletin of the Crimean Astrophysical Observatory. 2012. Vol. 108. P. 121–132.
19. D'USTON C, ZERTZALOV A.A., VAISBERG O.L ET AL. Energetic properties of interplanetary plasma at the Earth's orbit following the August 4, 1972 flare // Solar Physics. 1977. V. 51. P. 217–229.
20. ZASTENKER G.N., ТЕМНЫЙ V.V., D'USTON C., AND BOSQUED J.M. The form and energy of the shock waves from the solar flares of August 2, 4, and 7 // Res., 1978, Vol. 83. N 3. P. 1035–1041.
21. CHRISTENSEN-DALSGAARD J. Dirty Solar Models // Astron. Astrophys. 1979. Vol. 73. P. 121–128.

Хаврошкин Олег Борисович,
д.ф.-м.н., зав. лабораторией «Нелинейная сейсмология»
Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

☎ тел.: +7 (499) 766-26-53, e-mail: khavole@ifz.ru

Цыплаков Владислав Владимирович,
к.ф.-м.н., с.н.с. Института физики Земли РАН,

☎ 123995, г. Москва, ул. Б. Грузинская, д. 10, ИФЗ РАН
тел.: +7 (495) 254-90-06, +7 (499) 766-26-53
e-mail: tspl@mail.ru