

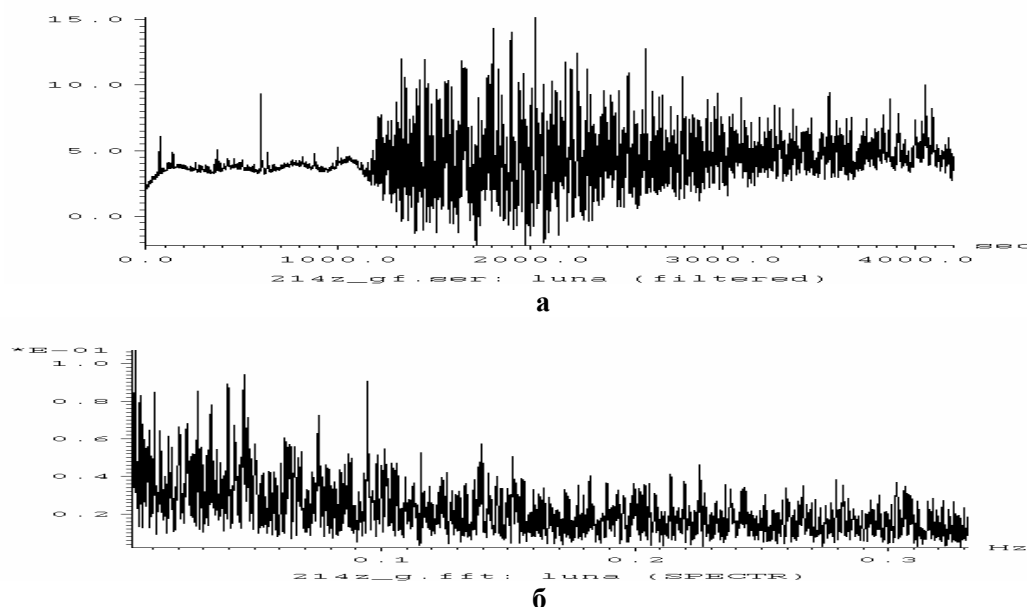
СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЛНОВЫЕ ПОЛЯ ЛУНЫ ПОСЛЕ МЕТЕОРОИДНЫХ ИМПАКТОВ 13 МАЯ и 17 ИЮЛЯ 1972 г

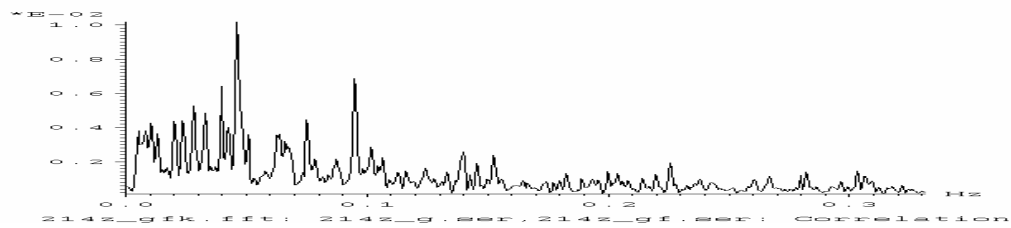
Танака С. (Ин-т Космич. Иссл, Япония),
Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. (ИФЗ РАН)
khavole@ifz.ru; тел.: 8-499 252 21 98

Ключевые слова: *сейсмический шум, длиннопериодные колебания, спектральный анализ, спектр коды, спектр сигнала*

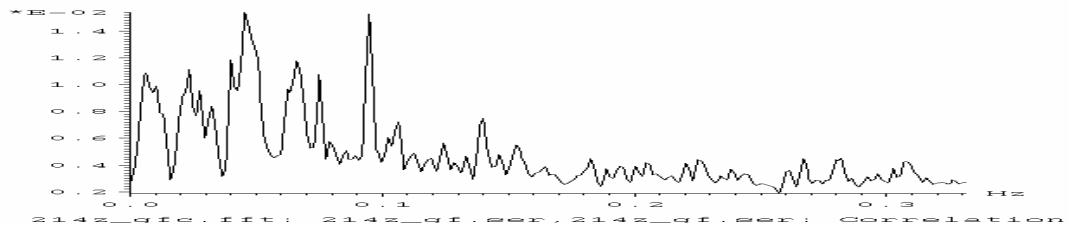
Общие замечания. Рассматриваемые 2 метеоритных удара уникальны для истории инструментальной лунной сейсмологии. Мощность каждого из них ~ 1000 т. ТНТ, первое падение на расстоянии ~ 150 км от ближайшей сейсмостанции, 2-е в р-не кратера Москвы, обратная сторона Луны. В результате падений возникали мощные сейсмические волновые поля необычной продолжительности порядка 4-5 час. (значение достаточно условно, т.к. зависит от чувствительности сейсмостанций). Записи этих полей (сейсмограммы) – необычный материал, информативность которого во многом определяется программным обеспечением и уровнем физического понимания сообщества. Первоначально на основе спектральной обработки записей были составлены таблицы из значимых ($P > 0.95$) спектральных пиков огибающей непосредственно сейсмического отклика среды на падение метеоритов, а также пиков их коды в диапазоне от 60 мин. до 30 сек. по всем трем компонентам. Число пиков для каждого из событий распределилось по компонентам: 1-е событие - X – 120; Y – 100; Z – 68; 2 – е – X – 82; Y – 73; Z – 74. Поскольку 1 – е не было удалённым, то волны поверхностного типа обусловили существенно больше периодичностей по сравнению с P – волнами (Z - компонента); для 2 – го – с источником почти в антиподе – поверхностные волны проявились только как компоненты в первую очередь сфероидальных колебаний Луны. Незначительное превышение числа пиков на X – компоненте, вероятно, связано с возбуждением торсионных колебаний. Отмечен ряд и других особенностей.

О спектре лунных сейсмических шумов. Шумы можно наблюдать как участки сейсмограмм в диапазоне от 1- 3 с. Особенности записей этих шумов связаны с частотными характеристиками сейсмоприемников. Кроме упомянутых участков записей шумов обычного вида существуют импактные сейсмограммы (падение метеороидов, космических аппаратов) с участками квазигармонических сигналов. Все эти записи в процессе обработки преобразовывались в сигналы с огибающей и подвергались спектральному анализу. Пример (фрагмент) отфильтрованной огибающей вертикальной Z компоненты сигнала от падения лунного модуля LM71_214_2059 и ряд спектров этого сигнала представлены на рис.1.





В



Г

Рис.1 (а, б, в, г). Пример обработки сейсмограммы от падения лунного модуля LM71. Рис.1(а) и рис.1 (б) - непосредственный спектр огибающей, рис.1 (в) – энергетический спектр огибающей и рис.1 (г) - сглаженный энергетический спектр огибающей

Для сравнения анализировалась сейсмограмма от более мощного удара-падения последней ступени Ар.16 (72_199_2020). Были получены энергетические спектры огибающих импакта по трем компонентам записи: X, Y, Z. На рис. 2(а,б,в) представлены энергетические спектры огибающей импакта (Ар16(72_199_2020) по всем трем компонентам.

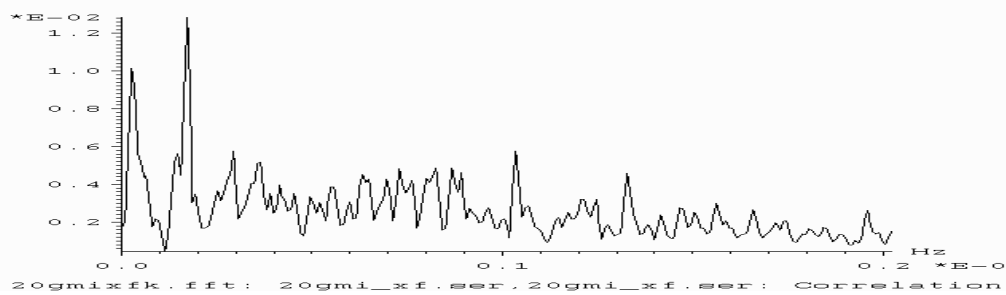


Рис.2 а (х -компонента)

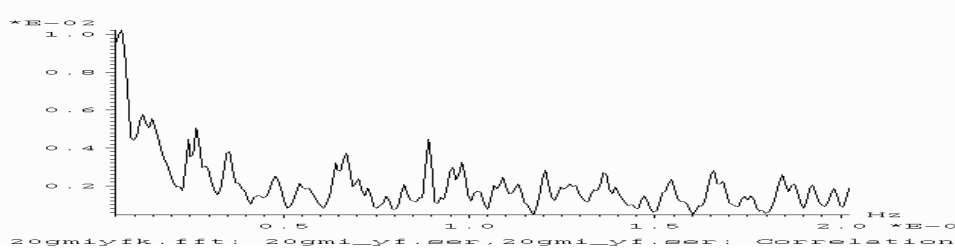


Рис.2 б (у-компонента)

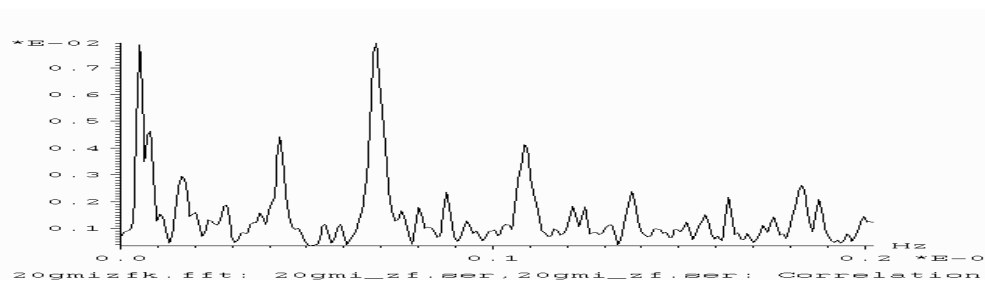


Рис.2 в. (z-компонента)

Заметны выделяющиеся гармонические сигналы и различия спектров на разных компонентах, X, Z в отличие от X компоненты имеют достаточно добротные пики, что ранее отмечалось другими исследователями как отсутствие корреляции сейсмического сигнала разных компонент.

В целом обработка массива трехкомпонентных лунных записей первичных сейсмограмм проводилась отдельно для каждой из 3-х компонент X, Y, Z, усредненных по 10 точкам в зависимости от длины реализации. Далее получали огибающие этих реализаций, которые также усреднялись по 5-10 точкам. Затем получались амплитудные и энергетические спектры как непосредственных сейсмических записей, так и огибающих со сглаживанием. Дополнительно, для обработки выбирались участки записи сейсмических сигналов только импактов (метеоритов и т.д.) и их коды волн. Длительность записи импактов была несколько часов, длительность коды - несколько суток.

По некоторым, обработанным таким образом записям были получены спектры, достоверные пики которых приведены таблично.

Таблица 1

Наблюдаемые значимые ($P > 0.95$) периодичности в непосредственных записях лунных сейсмограмм и их огибающих

Период/ част название	T(сек) (мин)									
199x im	2.28с									
Or199x	617с	73с	2.28с							
50gx	44с	35.7с								
50gy	166с	104с	34.5с	25с						
50gz	159с	112с	77с	46.3с	28.8с					
koda	128.8m	16m	7.8m	203с	112с	98с	42.5с	34.2с		
214	206m	41m	24m	15.8m	7.6m	5.7m	4.5m	115.6с	76с	58.5с
og215x	102.8m	44.2m	17.1m	11m	5.3m	4.36m	33.8m	189с	153с	126с
og215y	44.2m	18.1m	13.4 m	9.4m	5.24m	4.4m				
og215z	68.5m	61.7m	28.1 m	14.1m	161	137.6	129	68		
Im_72x	12.8m	171.8с	96.6	70.4	49.9	27	20			
Im_72y	6.4m	103с	67с	44.2с	26с	13.5с				
Im_72z	12.8m	140с	103с	49.9с	32.8с	27.6с	25с	18.6с	13.4с	11.4с
Im_mix	68.7m	9.8m	343.5 с	274с	96с					
Im_miy	68.7m	13.8m	11.4 m	374с	281с	149с	112с			
Im_miz	34.4m	10.2m	238с	145с	92.6с	40.7с	37.7с	27.2с		
Ko105x	36m	197с	114с	94.3с	38с	27.2с				
Ko105y	18m	114с	43.3с	34.9с						
Ko105z	18m	120с	48с	28с	26с					
Фр. шу a14	25.8m	5.7m	103с	92-88с	51с	20с	12.4с	8.8с	7.3с	2.28
gsf	4.7-14.2n	9.5m	6.4m	287с						
Im_a14	29.4m	11.4m	7.9m	6.4m	5.7m					

Как следует из табл.1 периодичности огибающих записей импактов при высокой добротности регистрируемых сигналов длительностью в несколько часов в основном сосредоточены в диапазоне десятков секунд и минут. Данные периодичности для 3-х компонент разные с незначительными совпадениями. Сейсмические сигналы, составляющие коды сейсмограмм импактов уже содержат более длительные периодичности в десятки минут и даже часов (табл.2). Отчасти эти особенности спектров огибающей сейсмических сигналов обусловлены строением Луны в

месте падения импакта. Причем, если сейсмический сигнал импакта несет информацию в основном только о геологической структуре места падения (мощность коры, литосферы), то последствие (кода) уже связано и с глобальным строением Луны как небесного тела. Особенно интересны записи тех импактов, которые зарегистрированы на всех сейсмических станциях сети «Аполлон» (12-16).

Таблица 2

Наблюдаемые значимые ($P > 0.95$) периодичности в спектрах огибающей лунных данных и их A12-A16 до и после импакта 72г 133-134 дня (Z компонента)

Период/ название	Начало записей по Гринвичу A12-72-133-21ч58м, A14-72-134-8ч08м A15-72-134-6ч02м, A16-72-134-7ч50м.										
До A12-15	154.6м	34.4м	12.9м	9.4м	4.7м	3.9м	187с	165с	151с	71с	49с
A12				9.4м	4.7м		187с				
A16-14		25.8м	17.2м	9.0м	7.6м	3.6			118с	69с	
A12-15	58.9м	29.4м	20.6м	16.6м	12.9м	8.6м	7.8м	5.8м	4.2м	69с	65с
Ко A12-15			9.8м	5.7м	4.7м	3.4м	144с	133с	122с	73с	49с

Полученный значительный массив значений периодичностей для дальнейшего углублённого анализа и интерпретации требует создания новой формы представления конечных результатов и последующей интерпретации. Однако, предварительно желательно для сравнения получить другой массив периодичностей, но на основе других первичных данных, записанных при других параметрах ударного процесса. Рассматривались сейсмограммы уникальных событий- падений крупных метеороидов или импактов в мае и июле 1972г или (72_133) и (72_199).

Учитывая важность результатов, опишем обработку более подробно. Для точности форма представления выбрана табличной. Таблицы состоят из значимых ($P > 0.95$) спектральных пиков огибающей непосредственно сейсмического отклика на падение метеороидов, а также их коды в диапазоне от 60мин до 30с. по всем трем компонентам. Методика обработки сейсмических материалов заключалась в следующем. Выделялся файл одной конкретной компоненты (X,Y,Z), для каждой из сейсмостанций (A12–A16) и проводилась операция выделения огибающей по 10 точкам (частота оцифровки 6.625Гц) и далее проводилось сглаживание (усреднение) по 20 точкам. Полученные таким образом реализации разбивались на участки, содержащие непосредственно момент удара, и затем содержащие коду события. Далее проводили фильтрацию полученных реализаций и отделяли низкочастотные сигналы длительностью более одного часа. Затем, из полученных сглаженных энергетических спектров реализаций заносили в таблицы только те значения спектральных пиков, которые превышали случайные с вероятностью более 0.95. “Неслучайность” пика формально не объясняет физического механизма происхождения и требует последующей работы интерпретатора. Данные сведены в таблицу³ из 9 столбцов и 19-20 строк. В первом столбце порядковый номер пика, во втором столбце (iog12...) значения пиков огибающей импакта в минутах или секундах на сейсмостанции Аполлон 12, в третьем столбце значения пиков огибающей коды (kog12...) импакта в минутах или секундах на станции Аполлон 12. В 4 и 5 столбцах тоже самое, но на сейсмостанции Аполлон 14, в 6 и 7 столбцах - A15, в 8 и 9 столбцах - A16.

Таблица 3

Значимые ($P > 0.95$) наблюдаемые периодичности записей огибающей 72_133X
лунных сейсмограмм на Аполлон

N	A12 (м, с) iog12z	A12 kog12z	A14 iog14z	A14 kog14z	A15 iog15z	A15 kog15z	A16 iog16z	A16 kog16z
1		25.8м	25.8м	51.5м	22.9м	25.76		29.4м
2							20.5м	20.6
3			14.7		14.7			14.7
4	12.9м				10.8		10.3	11.4
5	8.96							
6	7.36	8.6		7.36				7.36
7	6.4							6.44
8	4.8	5.7	5.15	4.7			5.7	5.02
9	4.12		3.8		4.12	4.3	3.8	4.12
10			206с			206с		213с
11	176.7с	193с	187					
12	156.5		167	171.7с	167	171.7	167с	179.2
13	139		154.5	134				
14			143.6					147.2
15		123.6	131.6		118.9		123	124.9
16	99	99.7	116.6					
17	91.6	90.9	110.4		110.4		108.5	
18	87.1	83.5	99.7	93.5	87.1	83.5	77.3	101.3
19	64.7	70.3					71.9	
20	58.6	40.7				59.5	66.5	

Таблица 4

Значимых ($P > 0.95$) наблюдаемых периодичностей записей огибающей 72_133у
лунных сейсмограмм на Аполлон

N	A12 (м,с) iog12z	A12 kog12z	A14 iog14z	A14 kog14z	A15 iog15z	A15 kog15z	A16 iog16z	A16 kog16z
1	29.4м		25.8м		25.8м	34.3м	25.8м	25.8м
2	15.85м			17.18м				15.86
3			12.9					12.1
4	10.3м							
5	8.24	8.6м		8.6				
6			7.37	7.36	7.36			6.4
7			5.15	5.15	5.7		5.15	
8			4.3	4.7				4.1
9		3.97						3.8
10			206с		193.2с	193.2	199.6с	193.2с
11	179.2с	171.7с						
12	156.0				154.6			
13		147.3						150.8
14				140.5с	140.5			
15				123.6с				125
16	111.4					114.6с		
17				99.7			95.2	
18	87.6	81.4			87			
19	72.7				81.4	72.7		
20	49.3	59.5		61.8	60	61.7	58.3	

Таблица 5

Значимые ($P>0.95$) наблюдаемые периодичности записей огибающей 72_133 Z
лунных сейсмограмм Аполлон

N	A12 (м,с) iog12z	A12 kog12z	A14 iog14z	A14 kog14z	A15 iog15z	A15 kog15z	A16 iog16z	A16 kog16z
1	31.7м			29.4				29.4м
2				17.9		17.2	18.7м	18.7
3			12.9м	14.7	12.5		13.2	
4	11.8			11.1				
5		9.4		9.16			9.8	
6			8.24	8.1			8.2	8.2
7	6.2			6.76			7.1	
8		5.4		4.63	5.4		5.5	4.7
9	4.1		4.2		4.1		3.96	
10		220.8	199.4с	222.7с	201с	228	209.6с	
11		181				186с		169.5с
12	142.9		150.8			150		
13		131		134			136.6	
14			120					120.0
15		108	105		118.3		117.2	
16		98	96					
17	73.5	88	84.7	71.7	66	83		84
18		67.9	69	64				
19	48.7	51			54	57	56.8	

Таблица 6

Значимые ($P>0.95$) наблюдаемые периодичности записей огибающей
лунных 72_199X сейсмограмм экспедиции Аполлон

N	A12 (м,с) iog12x	A12 kog12x	A14 iog14x	A14 kog14x	A15 iog15x	A15 kog15x	A16 iog16x	A16 kog16x
1		68.7м	25.8м	34.4м	29.4м	51.5м	25.8м	
2	18.7м			18.7				
3			13.7	14.7	12.9			
4	11.4	11.4		10.8				
5	9.4	9.4	8.6	8.24			9.4	9.4м
6	7.9	8.2	7.1			7.9		
7		6.7		6.7			6.9	
8	4.8	6.06		6.06				
9	4.3	5.6		4.9	4.5		4.9	4.7
10		4.3		4.1,3.8		4.1		
11	193.2с	213с	206.2с	209.6с				
12		164.9		190.2		164.9с	176.7с	
13		152.7		158.7	145.6с			
14	131.6	147.2	137.4	130.2		138.9		137.4с
15	120	128.8	126.2			123.6	123.7с	
16		117.8	120	116.7	118.9	99		116.7
17	106	111.4	109.с	111.4		85.5	98	93.7
18			100.5		79.2	75.2	81.3	
19	62.9		75.2	70.9	56		31.9	

Таблица 7

Значимые ($P > 0.95$) наблюдаемые периодичности записей огибающей
лунных сейсмограмм 72_199Y экспедиции Аполлон

N	A12 (м,с) iog12y	A12 kog12y	A14 iog14y	A14 kog14y	A15 iog15y	A15 kog15y	A16 iog16y	A16 kog16y
1	29.4м	51.5м	25.8м		25.8м		25.8м	20.6м
2				20.6м				
3	13.7	17.2	2				14.7	
4			12.1		10.3			10.3
5			8.4					
6						7.9м		
7	5.9	6.4	6.2	5.8		5.8	6.4	6.4
8	4.4	4.3			4.9	5.2	4.9	4.5
9	3.6			4.1	4.4	4.1		
10				199.6с				
11		193.2с				196.5с		
12	167с			162.7	167с			176.7с
13		158.5				156.5	154.6с	
14			142.1с					137.4
15	125	128.8				121.2		
16			117.8			110.4		
17		108.5			105.7	103.1	103	104.8
18	89		80.6			93	90.9	
19	82		69				83.5	

Таблица 8

Значимые ($P > 0.95$) наблюдаемые периодичности записи огибающей
лунных сейсмограмм 72_199 Z экспедиции Аполлон

N	A12 (м,с) iog12z	A12 kog12z	A14 iog14z	A14 kog14z	A15 iog15z	A15 kog15z	A16 iog12z	A16 kog16z
1	29.4м		31.7м			29.4м	25.8м	25.5
2	18.7	16.5	22.9			22.9		
3	15.9		17.2	15.9м	13.7	15.9		
4	11.1	10.8				11.4		
5	9.4	9.6		8.96		8.7	8.6	9.4
6	8.4		8.4		8.2	6.9		
7	7.4			6.64	6.4	5.5		6.1
8		4.7	4.6		5.7	4.8		4.5
9					4.1	3.9	3.96	
10	193с				204с	215с		
11		190с		184с	179	196.3		
12	164		159.5с		161.5	191.7		154.5с
13					150	161.8	147.2с	
14	140.5	142			140.5	130.8		
15						125.5		
16						121.8		114.5
17						110.4	110.4	103
18						94.3	90.9	
19						85.2	77.5	81.8

Предварительный анализ. Рассмотрим спектральные пики импактов 72_133 и 72_199. Как правило, спектральные пики огибающей импакта не совпадают с пиками огибающей коды. За исключением низкочастотных пиков совпадения значений пиков разных компонент (X,Y,Z) не наблюдается или наблюдаются редко. Обнаружены совпадения спектральных пиков на разных станциях регистрации (например, 14.7м на iog14x, iog15x, kog16x) одного и того же импакта. Всего значимых спектральных пиков на всех станциях наблюдается около десяти в основном в диапазоне собственных колебаний Луны, от 18.7м до 50сек. Полученные результаты соответствуют механизму модуляции несущей частоты сейсмического сигнала собственными колебаниями Луны возбужденной импактом. Тем более что диапазон собственно сейсмического сигнала от импакта находится в узкой полосе (доли и единицы Герц) иногда вырождаясь в линию гармонического сигнала. Другая особенность: спектр огибающих от одного и того же сигнала на разных станциях как правило, разный и по вероятно обусловлен внутренней структурой коры под точкой регистрации, ее слоистостью и энергонасыщенностью. Сам факт необыкновенной длительности лунных сейсмограмм говорит не только о высокой добротности среды распространения сейсмического сигнала, но и об энергетической подпитке сигнала. В этом смысле на модуляцию огибающей сейсмического сигнала влияет возможность лунной среды подпитывать сейсмический сигнал, т.е. энергонасыщенность среды. Поэтому, когда через лунную блочную среду проходит сейсмический сигнал и какие-то слои, обладающие большим или меньшим запасом упругой энергии, отдают ее в сигнал, что влияет на модуляцию огибающей сигнала с частотами характерными для распространения сейсмических волн в этих слоях. Этому соответствует и диапазон наблюдаемых периодичностей (от десятков секунд до десятков минут), примерно совпадающей с временами прохождения слоев Луны (коры, литосферы, мантии) сейсмическими сигналами от удара. Иногда наблюдаются кратные периоды или даже третьи и четвертые гармоники. При сравнительном рассмотрении периодичностей от ударов разных метеоритов, но под одной станцией полного совпадения наблюдаемых периодов не бывает, хотя близкие периодичности типа 9.4, 9.6, 9.2, 9.8 либо 6.4, 6.6, 6.9, 6.1 и т.д. существуют.

Рассматривая периодичности коды сейсмических сигналов, когда амплитуда уменьшается в десятки раз и механизм подпитки сигнала не эффективен на первый план выходит модуляция сейсмических шумов. Тем не менее, иногда наблюдаются одинаковые периодичности в огибающей коды и сигнала от удара метеороидов. Одной из возможностей получения значимых периодов в огибающей сигнала являются биения, обусловленные близкими гармоническими частотами несущей. В этом случае должен наблюдаться период в огибающей равный обратной величине разнице частот.

$$T = 1/\Delta f$$

Однако объяснить появление близких частот при возбуждении и распространении сейсмического сигнала от импакта весьма проблематично. Сам факт появления гармонических сигналов, как в несущем сигнале, так и в огибающей сигнала недостаточно изучен и может объясняться только нелинейными свойствами лунной среды и, ее энергонасыщенностью и способностью к отрицательному затуханию, то есть, к сейсмической автогенерации. Таким образом, получено семейство спектральных пиков, относящихся к указанному диапазону периодов собственных колебаний Луны. Их эффективное использование требуют как более эффективной формы их представления, так и более глубокой физической интерпретации, а также привлечения обработки данных других наблюдений.

Вестник Отделения наук о Земле РАН - №1(27) 2009

Информационный бюллетень Ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии 2009 года (ЕСЭМПГ-2009)

URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2009/informbul-1_2009/planet-27.pdf

Опубликовано 1 сентября 2009 г.

© *Вестник Отделения наук о Земле РАН, 1997 (год основания), 2009*

При полном или частичном использовании материалов публикаций журнала, ссылка на «Вестник Отделения наук о Земле РАН» обязательна