

УДК 523.3-1/-8

Сейсмоакустические поля и электромагнитное (нетепловое) излучение Луны

О.Б. Хаврошкин¹, В.В. Цыплаков¹, А.А. Бережной², А.Е. Вольвач³, Л.Н. Вольвач³

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

² Государственный астрономический институт им. Штернберга, Московский государственный университет им. Ломоносова, Москва, Россия

³ Лаборатория радиоастрономии НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”,
РТ-22, Ялта, АР Крым, Украина
volvach@ukrpost.ua

Поступила в редакцию 1 августа 2011 г.

Аннотация. С целью изучения радиоизлучения Луны с помощью 22-метрового радиотелескопа РТ-22 НИИ “КраО” проведены наблюдения Луны в момент максимума метеороидного потока и в момент без внешних воздействий во время лунного затмения. Проведена статистическая обработка полученных наблюдательных данных. Определено, что экзо- и эндогенные процессы на Луне отображаются как в сейсмоэмиссионных полях, так и в нетепловом электромагнитном излучении Луны. Оба класса сигналов находятся в корреляционной связи. Сейсмические процессы и процессы электромагнитного излучения имеют общие периодичности, часть из которых определяется внутренним строением Луны. Аналогичные закономерности следует ожидать и для других небесных тел Солнечной системы.

SEISMO-ACUSTIC FIELDS AND NON-THERMAL ELECTROMAGNETIC RADIATION FROM THE MOON, *by O.B. Chavroshkin, V.V. Tsiplakov, A.A. Berezhnoj, A.E. Volvach, L.N. Volvach.* For deeper understanding of the nature of non-thermal radio emission radio observations of the Moon were performed during the total lunar eclipse and maximum of the Geminid meteor shower. Obtained observational data were analyzed statistically using modern methods of data analysis. Interpretation of obtained results was performed using the non-linear seismology of the Earth and Moon as well as observations. Exogenic and endogenic processes on the Moon can be studied by studies of seismic acoustic emissional poles and non-thermal electromagnetic emission of the Moon. Both types of signals correlate well. Seismic and electromagnetic processes have similar periodicities, some of them are determined by the internal structure of the Moon. Similar behavior is expected for other bodies of the Solar system. Monitoring and analysis of non-thermal radio emission of the Moon with radio telescopes are very useful for studies of the Moon.

Ключевые слова: сейсмоакустическая эмиссия, выбросы эмиссии, электромагнитное излучение среды, общность лунной и земной эмиссий, импакты

1 Введение

Известны положительные результаты по поиску и регистрации амплитудно-временных изменений (модуляции) радиотеплового микроволнового излучения Луны, совпадающих по времени с динамическими, сейсмическими процессами в литосфере и обусловленными ударными (импактными) воздействиями (Хаврошкин и др., 2001; Бережной и др., 2000; Бережной и др., 2001). Вероятно, физический механизм модуляции – нетепловой природы и обусловлен электромагнитным излучением (ЭМИ) горных пород, возникающим при нагружении, разрушении, деструкции и перестройке их микроструктуры, как и в случае трибо- или кандолюминесценции (Хаврошкин и др., 2000; Физическая энциклопедия, 1990). В рамках механики горных пород и физики разрушения геофизические механизмы ЭМИ подробно рассмотрены (Сурков, 2000), их можно дополнить только, в случае Луны, вариациями пористости (теплопроводности) реголита и возможностью модулировать собственный тепловой поток, а следовательно и микроволновое излучение. Радикальные отличия Луны как небесного тела, по сравнению с Землей, позволяют предполагать также лунный механизм электромагнитных эффектов, особенно в оптической и рентгеновской частях спектра. Радиоизлучение Луны – давний предмет научного поиска (Кротиков и Троицкий, 1963). Авторами рассматривались как традиционные модели ЭМИ, так и современные (Гохберг, 1995; Грималски и др., 2004). С течением времени произошло накопление наблюдательных данных (Хаврошкин и др., 2001; Бережной и др., 2001; Грималски и др., 2004; Бережной и др., 2002; Хаврошкин и Цыплаков, 2001; Орtiz и др., 2002; Осаки и др., 2001; Такано и др., 2005; Вольвач и др., 2005; Вольвач и др., 2009).

Для изучения данного эффекта с помощью 22-метрового радиотелескопа РТ-22 НИИ “КрАО” проведены наблюдения Луны в момент максимума пылевого потока (см. табл. 1, фрагмент) и в момент практически без таких воздействий, но в условиях затмения Луны (Вишпле, 1982).

Таблица 1. Сводные данные по метеороидным (газопылевым) потокам

Метеороидный поток	Возможная ассоциация (комета или астероид)	Максимум (дата)	Радянты		ZHR
			R. A.	Dec.	
Геминиды	3200 Фазтон	13–14 дек. 2004 г.	112.3°	+32.5°	88 ± 4°
Лириды	Татчер, 1861 I	22 апр. 2007 г.	271.4°	+33.6°	13 ± 1°

Интерпретация полученных результатов проведена с привлечением как более глубоких понятий нелинейной сейсмологии Земли и Луны, так и данных наблюдений, близких по физическому смыслу (Хаврошкин, 1999; Сатоши и др., 2011; Хаврошкин и др., 2008).

Радионаблюдения Луны проводились с помощью РТ-22 в Симеизе во время полных лунных затмений 3 апреля 2007 г. и 14 декабря 2004 г. В первом случае внешние импактные воздействия на Луну могли носить только случайный и незначительный характер, доминировали приливные напряжения, а во втором, напротив, слабые приливные эффекты, но наблюдался максимум потока Геминид, и доминировали воздействия от газопылевых частиц (см. табл. 1). Соответствующая статистическая обработка могла бы выявить различие сейсмического отклика литосферы Луны в условиях квазистатического или импульсного нагружения.

2 Наблюдение полного лунного затмения 3 апреля 2007 г.

Наблюдения вариаций интенсивности радиоизлучения Луны проводились с помощью радиотелескопа РТ-22 в Симеизе (Крым) во время полного лунного затмения 3 апреля 2007 г. на длинах волн 3.6 и 13 см. Длительность регистрации вариаций уровня сигналов составила около 2-х часов, частота опроса сигналов – 100 Гц ($T = 10$ мс), полоса регистрации – 500 МГц в каждом канале.

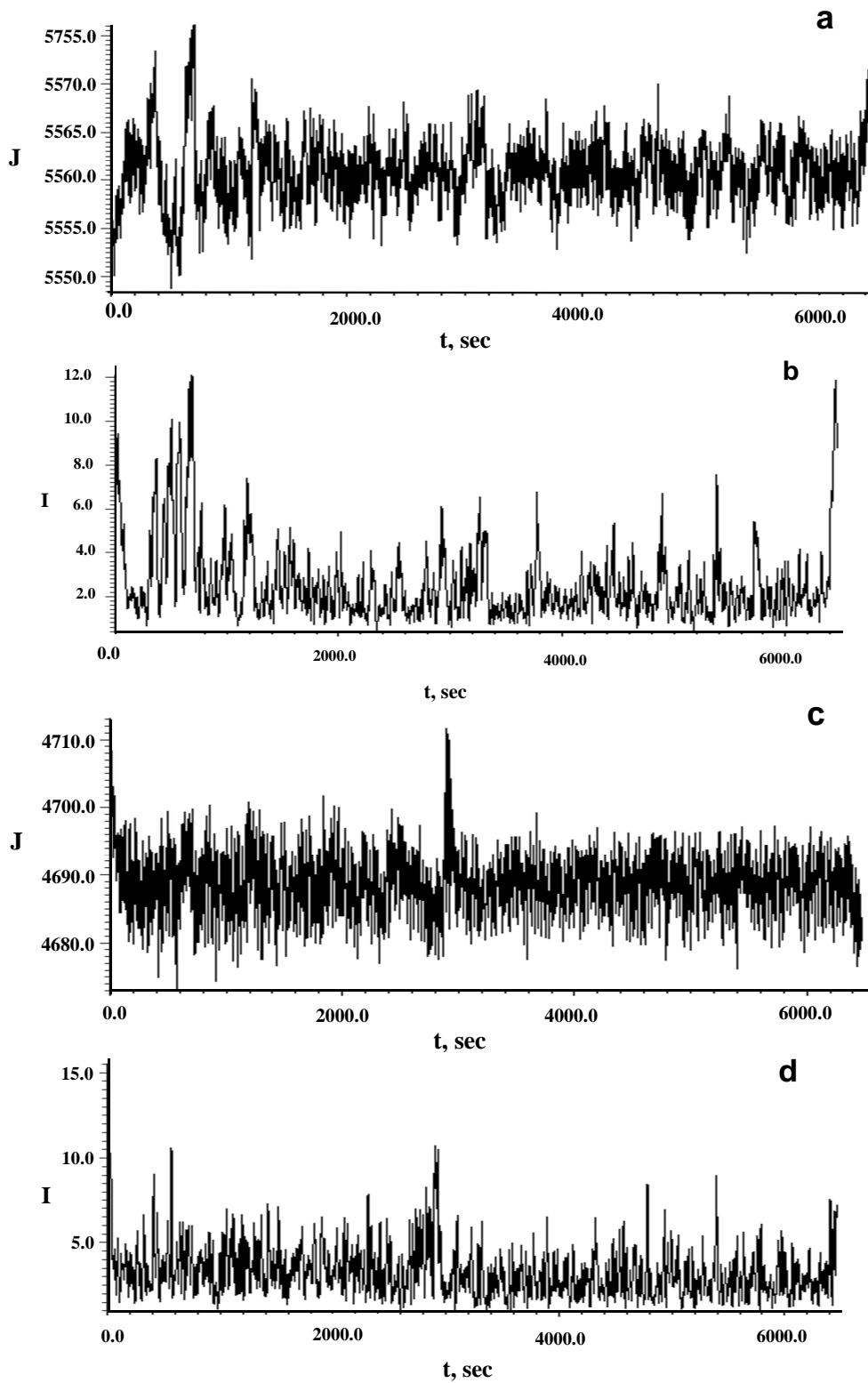


Рис. 1. Вариации среднего значения интенсивности радиоизлучения Луны (J) а), с) и среднеквадратичные вариации интенсивности (I) б), д) во время затмения на длинах волн 3.6 см (а, б) и 13 см (с, д)

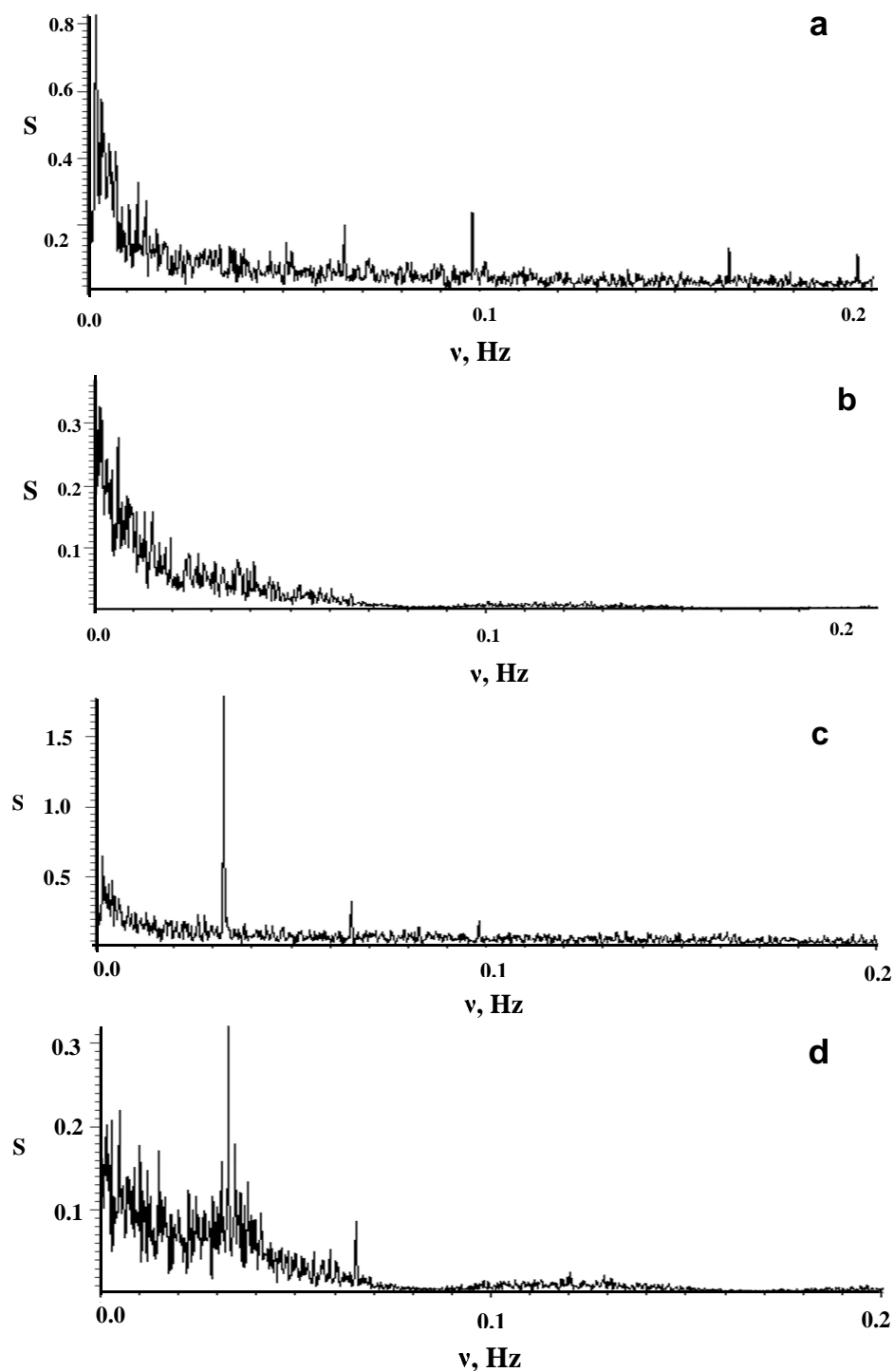


Рис. 2. Спектры вариации интенсивности (а, б) радиоизлучения Луны J и спектры среднеквадратичных вариаций I во время затмения на длинах волн 3.6 см (а, б) и 13 см (с, д)

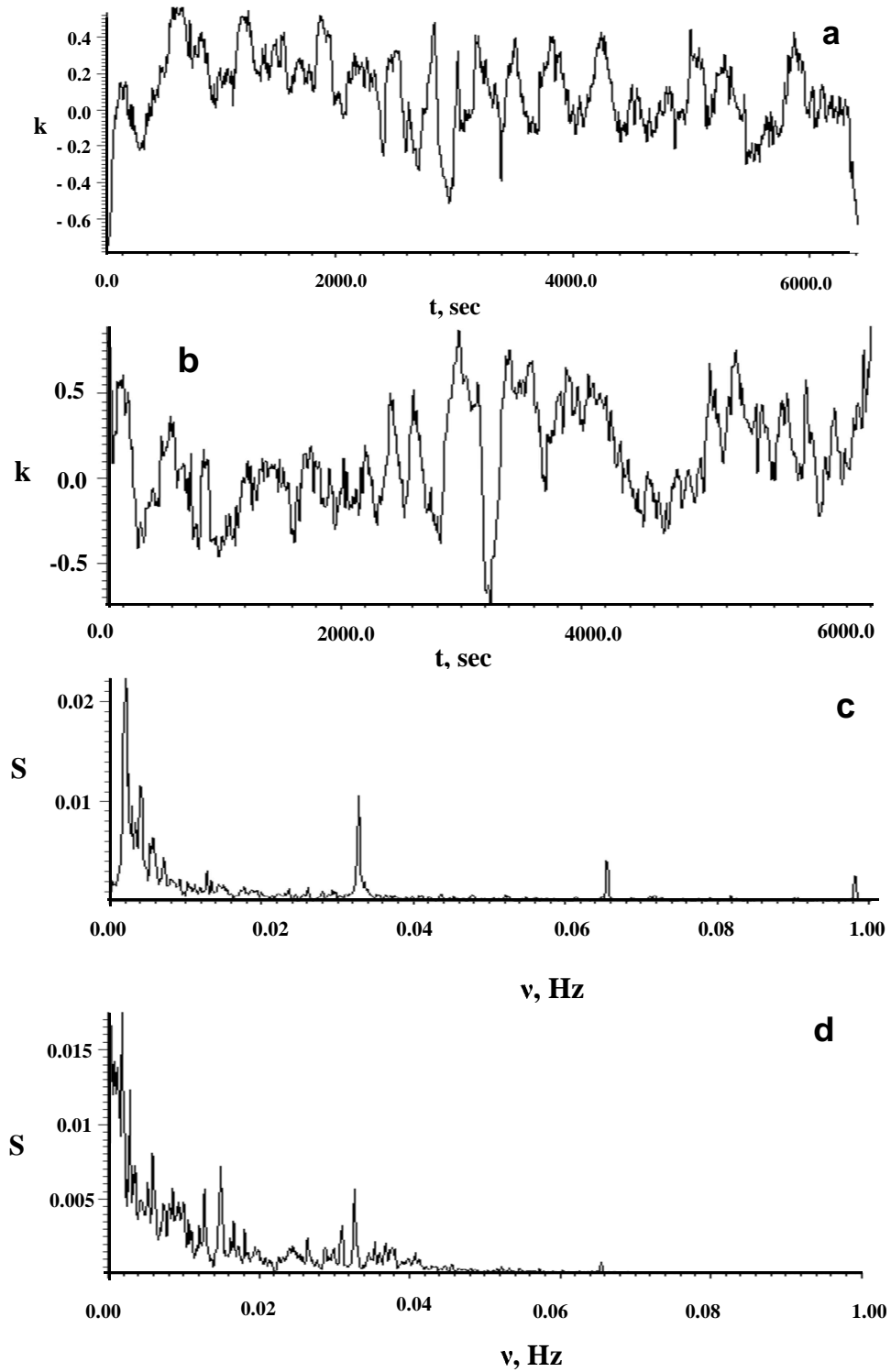


Рис. 3. Вариации скользящей корреляции интенсивности (а) радиоизлучения Луны их огибающих (b) и их спектры (c, d) во время затмения на длинах волн 3.6 см и 13 см

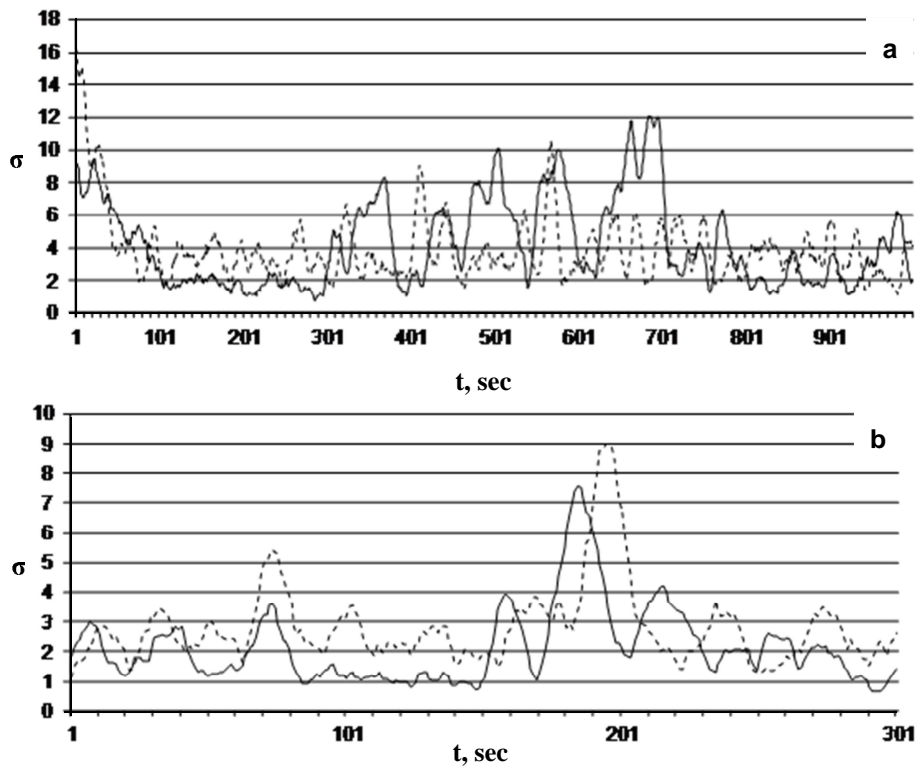


Рис. 4. Фрагмент реализации среднеквадратичных отклонений с большим разрешением; сплошная линия – запись на длине волны 3.6 см; прерывистая – на 13 см

Как всегда важна структура полученных спектров. В табл. 2 приводятся величины значимых спектральных пиков, полученных по реализациям вариаций интенсивности радиоизлучения Луны на длинах волн 3.6 см (а) и 13 см (б), вариации среднеквадратичных отклонений их интенсивностей с отфильтрованным трендом, а также вариации радиоизлучения неба и контрольного источника.

Данные табл. 2 в основном наблюдались ранее, но их достоверность дополнительно усилена данными по регистрации излучения неба и контрольного источника (Хаврошкин и Цыплаков, 2001; Бережной и др., 2000; Бережной и др., 2001; Грималски и др., 2004; Бережной и др., 2002). Не менее важно существование пиков в ЭМИ, совпадающих с пиками, выявленными сейсмическими методами и относящимися по генезису к Луне как к небесному телу. То есть существуют совпадения периодичностей ЭМИ Луны и собственных колебаний Луны, что открывает новые аппаратурно-методические подходы дистанционного изучения Луны и планет.

3 Радионаблюдения Луны в Симеизе (максимум потока Геминид)

Наблюдения вариаций интенсивности излучения поверхности Луны проводились 14 декабря 2004 г. во время потоков Геминид с помощью 22-метрового радиотелескопа РТ-22 в Симеизе на длинах волн 3.6 см (а) и 13 см (б). Длительность регистрации вариаций уровня сигналов составляла несколько часов. Частота опроса сигналов 100 Гц ($T = 10$ мс), полоса регистрации – 500 МГц в каждом канале.

3.1 Методика обработки данных

Так как полученные файлы велики для непосредственной обработки в целом, то весь материал был разделен на 3 части (отрезка) наблюдений. Затем были получены функции среднего значения вари-

аций уровня интенсивности (по 100 точкам на интервале $\Delta t = 1c$) и функции среднеквадратичного отклонения вариаций уровня по каждому из каналов. Далее проводилась обработка полученных файлов с целью выявления как отдельных всплесков, которые могут происходить в результате внешнего воздействия на поверхность Луны (метеоров, космических лучей), так и периодичностей. Для этого были получены спектры этих функций. Кроме того, проводилась фильтрация с целью вычесть тренд, образованный техническими причинами. На рис. 5 (а, b, с, d) представлены вариации полученных функций среднего значения интенсивности J и функций среднеквадратичного отклонения I на длинах волн 3.6 и 13 см.

Таблица 3. Спектральные пики интенсивности I ЭМИ на Луне 14.12.2004 г.

Название	мин	мин	мин	мин	мин	мин	мин	мин	мин
K1_afv	15.2	8.0	5.9	4.9	4.1	3.4		2.73	1.8
K2_bfa	15.2	8.5		4.7	4.3	3.6	3.2	2.7–2.6	2.2
K3_ba	15.2	9.8	6.2	5.0	4.4	3.9–3.4	3.1	2.7	2.3

Таблица 4. Значимые спектральные пики анализа ФСК

Название	мин	мин	мин	мин	мин	мин	мин	мин	мин
K1absk	27.3	10.5	7.2	5.5	3.2		2.8–2.7	2.3	2.0–1.9
K2absk	34.2		8.1	4.3	3.5	3.0	2.6	2.3	1.5
K3absk	34.2	19.5	13.7	9.7	6.8	5.5	4.4	3.6	2.8–2.4

Таблица 5. Сводные данные по структурно-временным параметрам Луны

Структура	ΔR , км	V_p , км/с	V_s , км/с	p , мин	s , мин	T_p^e , мин	T_s^e , мин	$\Delta \bar{R}$, км	\bar{V}_p , км/с	\bar{V}_s , км/с	t_p , с	t_s , с
Кора	50–60	4–7.5	3.7–4	0.3	0.5	0.3	0.5	55	5.6	3.8	10	14
Верхняя мантия	300–400	7.7 ± 0.2	4.3 ± 0.15	1.28	2.8	1.3	2.3	350	7.8	4.3	38.5	70
Средняя мантия	900–1100	7.6 ± 0.6	4.2 ± 0.1	4.06	8.2	2.8	5.4	1000	7.8	4.0	83.5	162.3
Нижняя мантия	1400	7.5–8	3.7–3.5; 2.0	5.8	12.6	2.2	4.43	1400	7.8	3.0	51.6	132.8
Ядро	1600	7.6–8	2.0; 3.5	6.93	14.8	0.86	2.2	1600	7.8	3.0	25.8	66.4
Центр	1738			7.55	16.5	0.59	1.6	1738	7.8	3.0	17.7	45.3

Таблица 6. Пример сейсмических периодичностей на Луне после падения крупного метеороида

Название переменной (мин)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
иo12x14				9.6	8.3	6.7		5.4	4.3	3.3
иo12y14	16.5	14.7	11.4	9.6	8.1	7.6	5.9		4.5	3.5
иo12z14	17.2	10.0		9.4		7.5			4.6	3.2
иl2xyz14		15.3	10.5	9.4	8.8	8.1	7.5	6.7	5.3	3.4
ko12x14		12.5		9.6	8.3		6.2	5.5	4.4	3.5
ko12y14	19.6	14.2	10.0			6.7	5.8		4.5	3.4
ko12z14				9.6					4.7	3.2
кl2xyz14				9.6	8.3		6.2		4.7	3.2

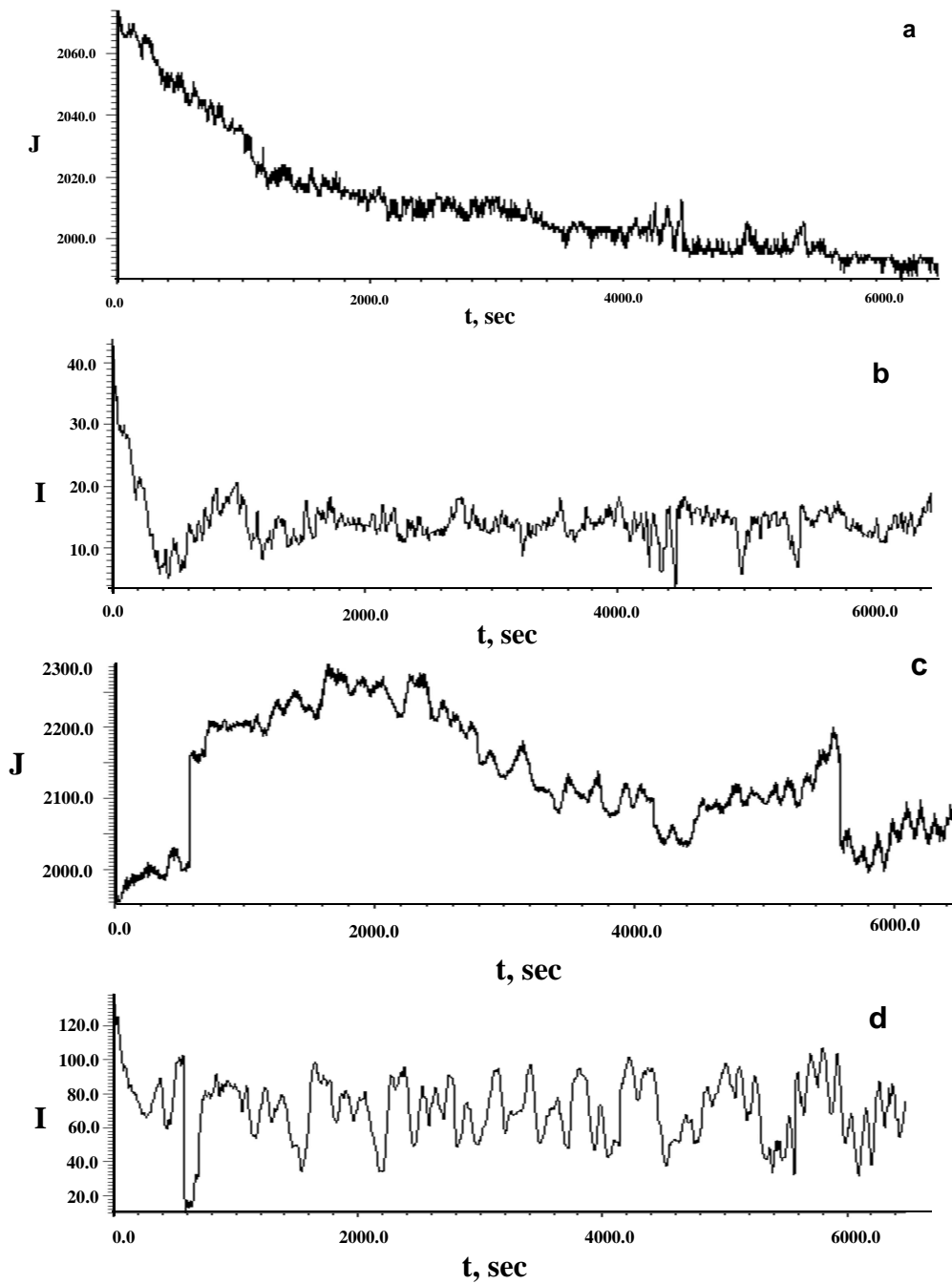


Рис. 5. Вариации средних J (а, с) и среднеквадратичных I значений (b, d) функций интенсивности радиоизлучения Луны на частотах 3.6 и 13 см на 1 отрезке наблюдений

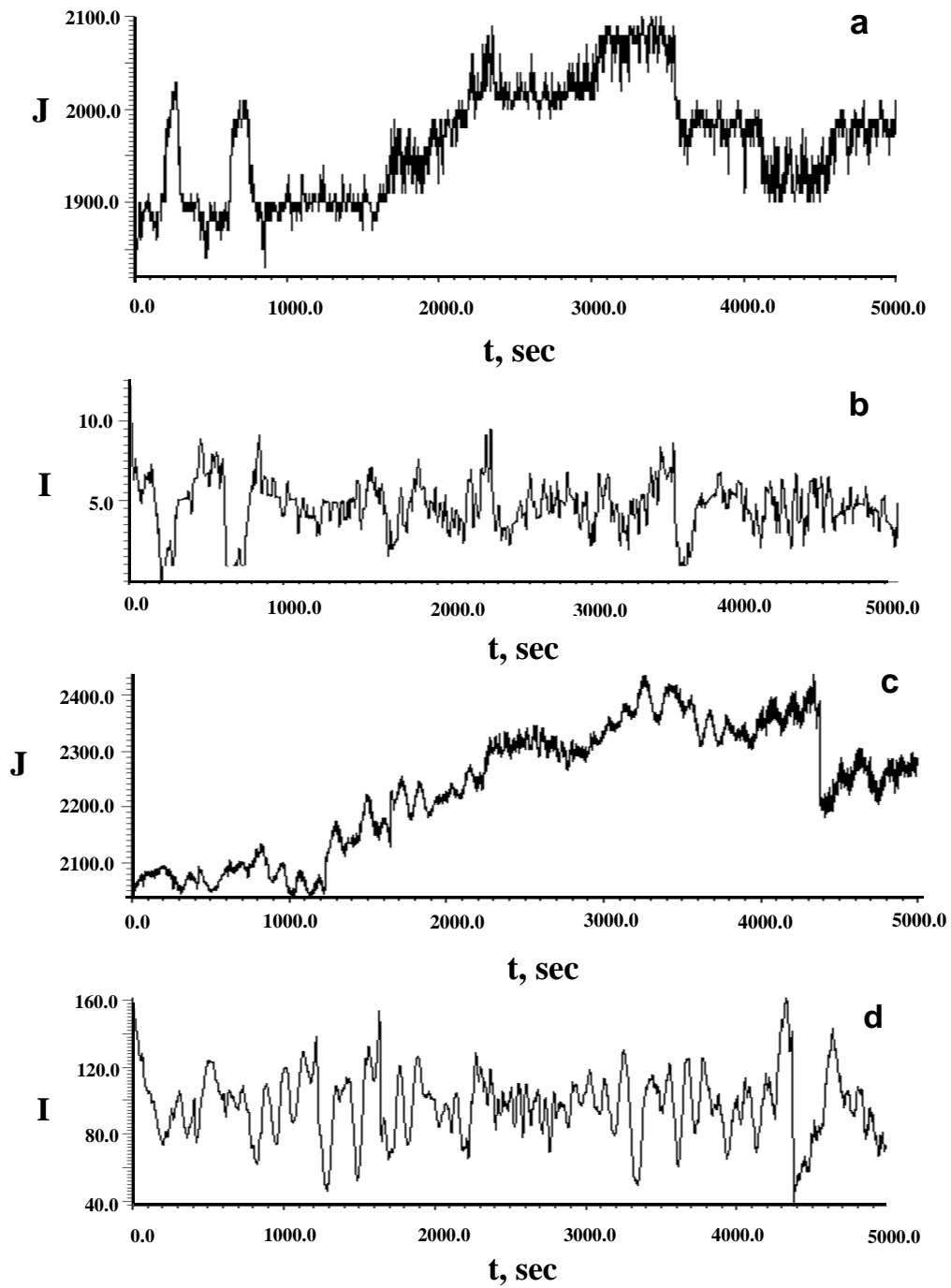


Рис. 6. Вариации средних (а, с) и среднеквадратичных значений (b, d) функций интенсивности радиоизлучения Луны на длинах волн 3.6 и 13 см на 2 отрезке наблюдений

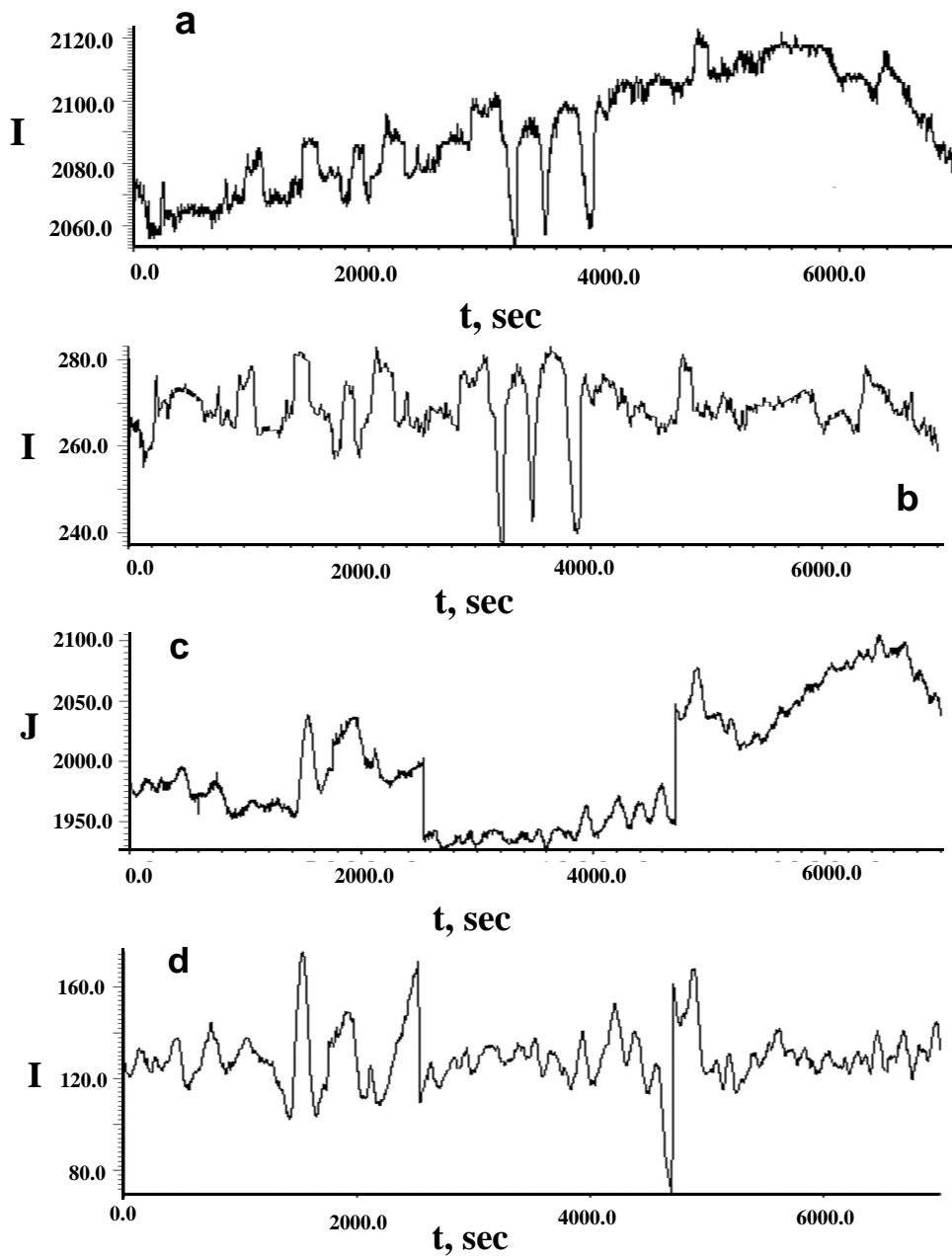


Рис. 7. Вариации средних (а, с) и среднеквадратичных значений (b, d) функций интенсивности радиоизлучения Луны на длинах волн 3.6 и 13 см на 3 отрезке наблюдений

Такие же процедуры были проведены и на других интервалах наблюдений. Эти результаты в той же последовательности, что и ранее, приведены на рис. 6 а, b, с, d и на рис. 7 а, b, с, d.

Из полученных взаимокорреляционных функций определены взаимные спектры для длин волн 3.6 см и 13 см по всем трем реализациям с целью выявления спектральных пиков одинаковых для обеих частот. В табл. 3 приводятся значения значимых взаимных спектральных пиков (в секундах, минутах), полученных по реализациям вариаций интенсивности радиоизлучения Луны на длинах волн 3.6 см (а) и 13 см (б), отфильтрованных по тренду. Последовательно даны: K1_afv – спектр взаимокорреляционной функции средних значений ab фильтрованной на а (3.6 см), K2_bfa – спектр взаимокорреляционной функции среднеквадратичных значений ab фильтрованной на b (13 см), K3_ba – спектр взаимокорреляционной функции ab нефильтованной на ab (3.6 см, 13 см).

Затем в 1 % окне были получены функции скользящей корреляции (ФСК) между однотипными функциями каждого канала. Примеры ФСК для нефильтованных и фильтрованных ФСК представлены на рис. 8 а, b.

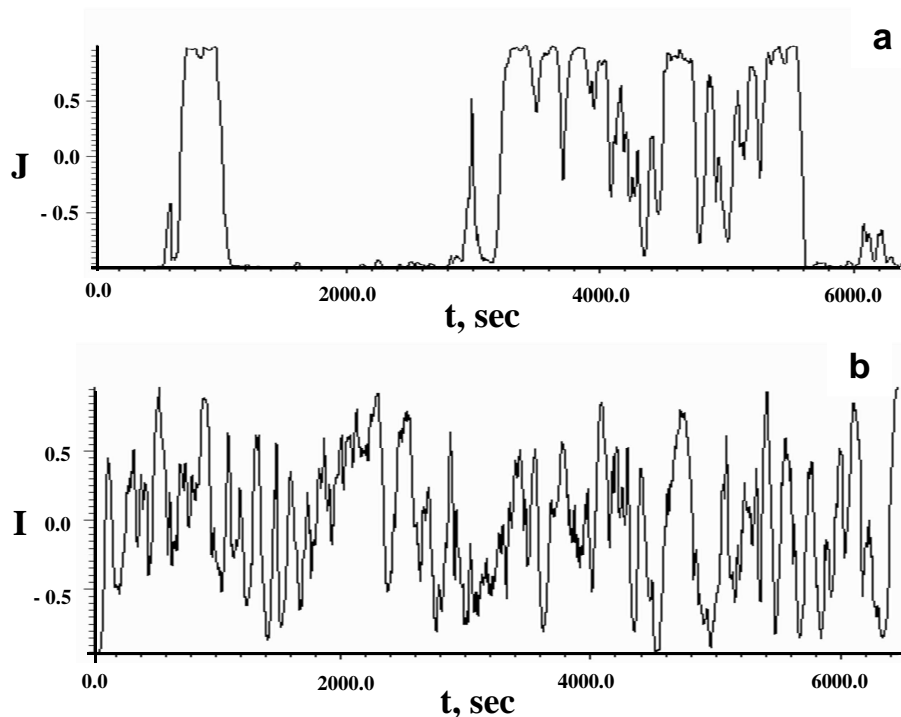


Рис. 8. Примеры нефильтованных и фильтрованных ФСК для вариаций средних значений радиоизлучения Луны на частотах 3.6 и 13 см первого отрезка наблюдений

Далее были получены спектры функций скользящей корреляции, значимые пики которых представлены в табл. 4. Последовательно даны: K1absk – пики спектра функции скользящей корреляции в 1 % окне средних значений ab (3.6 см, 13 см), K2absk – пики спектра функции скользящей корреляции в 1 % окне среднеквадратичных значений ab (3.6 см, 13 см), K3absk – пики спектра функции скользящей корреляции в 1 % окне ab (3.6 см, 13 см) нефильтованной.

В табл. 5 (Сатоши и др., 2011): 1-й столбец – элементы структуры; 2-й – мощность каждого элемента (ΔR , км); 3-й – скорость продольной волны V_p , км/с; 4-й – скорость поперечной волны (V_s , км/с); 5-й – период кратной Р-волны для системы дневная поверхность-верхняя граница структурного элемента (T_p , мин); 6-й – то же для S-волны $9T_s$ мин; 7, 8 – периоды кратных Р-, S-волн в

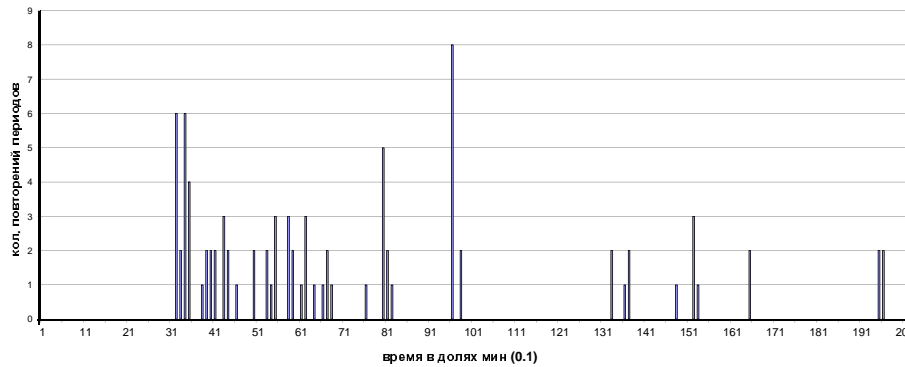


Рис. 9. Гистограмма лунных периодов

структурах (T_p^e мин, T_s^e мин); 9–11 – то же, что и 1–3 ($\Delta\bar{R}$, км, \bar{V}_p , км/с, \bar{V}_s , км/с), но усредненные; 12, 13 – время прохождения P-, S-волн через соответствующие элементы структуры (t_p , сек, t_s , сек).

В табл. 6 (Сагоши и др., 2011) приведен пример сейсмических периодичностей на Луне, которые возникают после падения крупного метеороида.

На рис. 9 приведена гистограмма лунных периодичностей, общих для сейсмических и ЭМИ процессов на Луне.

3.2 Обсуждение результатов

Функции скользящей корреляции в 1 % окне очень неустойчивы, хотя иногда на интервалах в несколько сотен секунд и даже десятков минут показывают достаточно высокую значимость ($P > 0.99$). Удивительны изменения ФСК при применении фильтрации и снятии низкочастотного тренда. Так на рис. 4а видно, что без фильтрации наблюдаются участки длительных почти синхронных вариаций на длинах волн 3.6 и 13 см с корреляцией почти равной $K = 1$ или $K = -1$, тогда как после снятия тренда (по-видимому, образованному техническими помехами), мы наблюдаем очень частую смену корреляций и антикорреляций, что в данном случае в первую очередь связано со случайным пространственно-временным распределением метеороидов и их ударов. Более того, удары метеороидов газопылевого потока по лунной поверхности ввели заметные отличия в функции J (рис. 7а, 7с) от функций J затмения (рис. 1а, 1с).

4 Общие выводы

1. Экзо- и эндогенные процессы на Луне отображаются как в сейсмоэмиссионных полях, так и в нетепловом электромагнитном излучении Луны; оба класса сигналов находятся в корреляционной связи.
2. Сейсмические и ЭМИ процессы имеют общие периодичности, часть из которых определяется внутренним строением Луны. Аналогичные закономерности следует ожидать и для других небесных тел Солнечной системы.
3. Мониторинг и последующий анализ ЭМИ Луны с помощью радиотелескопа принципиально расширяет возможности изучения небесных тел.

Благодарности. Работа поддержана грантом ДФФД и НАН Украины – РФФД России. Авторы благодарны И.Д. Стрепке за подготовку приемной аппаратуры, М.М. Позднякову и персоналу пульта управления РТ-22 за помощь в проведении измерений.

Литература

- Бережной и др. (Berezhnoi A.A., Gusev S.G., Khavroshkin O.B., et al.) // Proceedings of the Fourth International Conference on Exploration and Utilisation of the Moon. / Eds Foing B.H. and Perry. M. 2000. P. 179.
- Бережной и др. (Berezhnoi A.A., Bervalds E., Khavroshkin O.B., et al.) // Geophysical Research Abstracts. 2001. V. 3.
- Бережной и др. (Berezhnoy A., Bervalds E., Khavroshkin O., et al.) // Baltic Astronomy. 2002. V. 11. P. 507.
- Вишле (Whipple Fred L.) // Meteors and comets and interplanetary complex: The Collected contributions of Fred L. Whipple. Smithsonian Astrophysical Observatory. Cambridge. Massachusetts. 1972. V. 1.
- Вольвач и др. (Volvach A., Berezhnoy A., Khavroshkin O., et al.) // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. 2005. V. 21. Issue 1. P. 60.
- Вольвач и др. (Volvach A.E., Berezhnoy A.A., Foing B., et al.) // Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel. 2009. V. 25. №. 4. P. 277.
- Гохберг (Gokhberg M.B.) // Earthquake prediction: Seismoelectromagnetic phenomena. Amsterdam: Gordon and Breach Publishers. 1995.
- Грималски и др. (Grimalsky V., Torres A. J., Zuniga C., et al.) // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2004. V. 4. P. 793.
- Кротиков В.Д., Троицкий В.С. // Радиоизлучение и природа Луны. УФН. 1963. Т. 81. Вып. 4.
- Ортиз и др. (Ortiz J.L., Quesada J.A., Aceituno J., et al.) // Astrophys. J. 2002. V. 576. P. 567.
- Осаки и др. (Osaki H., Hiroshi O., Yasuhiro K., et al.) // J. Commun. Res. Laboratory. 2001. V. 48. P. 159.
- Сатоши и др. (Сатоши Танака, Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В.) // Инженерная физика. М.: Научтехлитиздат. 2011. (в печати).
- Сурков В.В. // Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. Моск. гос. инж.-физ. ин-т. М.: 2000.
- Такано и др. (Takano T., Maki K., Soma E., et al.) // Proc. 4th European Conference on Space Debris. SA. ESOC. Darmstadt. Germany. 2005. P. 501.
- Физическая энциклопедия // М.: Советская энциклопедия. 1990. Т. 2.
- Хаврошкин О.Б. // ОИФЗ РАН. М.: 1999.
- Хаврошкин и др. (Khavroshkin O.B., Tsyplakov V.V., Vidmont N.A.) // Microsymposium-32. On Comparative Planetology. Abstracts. 2000. Moscow. Russia.
- Хаврошкин и др. (Khavroshkin O.B., Tsyplakov V.V., Poperechenko B.A., et al.) // Doklady Earth Sciences. 2001. V. 376. №. 1. P. 90.
- Хаврошкин и др. (Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В., Собко А.А.) // Инженерная физика. М.: Научтехлитиздат. 2008. С. 31.
- Хаврошкин и Цыплаков (Khavroshkin O.B. and Tsyplakov V.V.) // Doklady Earth Sciences. 2001. V. 376. P. 90.