

УДК 523.3

**А. Е. Вольвач¹, А. А. Бережной², Б. Фоинг³,
П. Эренфройд⁴, О. Б. Хаврошкин⁵, Л. Н. Вольвач¹**

¹НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория»

98688, РТ-22, Кацивели, Ялта, Крым

²Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ

119992 Россия, Москва, ул. Университетский пр., 13

³Европейское космическое агентство

Нордвийк, Нидерланды

⁴Институт химии Лейдена

Лейден, Нидерланды

⁵Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта

123995 Россия, ГСП-5 Москва Д-242, ул. Б. Грузинская 10

Поиск радиовспышек, вызванных столкновениями метеороидов с Луной

Разработана методика наблюдений для выяснения природы вариаций радиоизлучения Луны. Оценена возможность обнаружения радиовсплеска, вызванного падением КА SMART-1 на Луну. Оценен верхний предел интенсивности радиоизлучения во время столкновений спорадических метеороидов с Луной на уровне 10^{-7} Ян/Дж на длине волны 3.6 см.

ПОШУК РАДІОСПЛАХІВ, ВИКЛИКАНИХ ЗІТКНЕННЯМИ МЕТЕОРОЇДІВ З МІСЯЦЕМ, Вольвач О. Є., Бережний О. А., Фоїнг Б., Еренфройд П., Хаврошкін О. Б., Вольвач Л. М. — Розроблено методику спостережень для з'ясування природи варіацій радіовипромінювання Місяця. Оцінено можливість виявлення радіосплеску, викликаного падінням КА SMART-1 на Місяць. Оцінено верхню межу інтенсивності радіовипромінювання під час зіткнень спорадичних метеороїдів з Місяцем на рівні 10^{-7} Ян/Дж на довжині хвилі 3.6 см.

A SEARCH FOR RADIO FLASHES, CAUSED BY COLLISIONS OF METEOROIDS WITH THE MOON, by Volvach A. E., Berezhnoy A. A., Foing B., Erenfroyd P., Havroshkin O. B., Volvach L. N. — An observation procedure for determination of the nature of detected variations of lunar radio flux is developed. The possibility to detect KA SMART-1 impact radio

flash is estimated. We estimated the upper limit of the intensity of the radio flashes produced by collisions of sporadic meteoroids with the Moon as 10^{-7} JyJ^1 at 3.6 cm.

ВВЕДЕНИЕ

На Земле электромагнитное излучение сейсмического происхождения было обнаружено в широком интервале частот от 1 Гц до нескольких МГц [4]. Теоретическое исследование электромагнитного излучения во время ударных явлений показывает, что микротрещины в камнях, образованные ударами, излучают в широком интервале частот вплоть до десятков ГГц, хотя максимум интенсивности радиоизлучения приходится на более низкие частоты [5].

Основным компонентом радиоизлучения Луны является тепловое излучение. Столкновения с Луной крупных метеороидов приводят к возникновению сейсмических волн на Луне, причем продолжительность подобных лунотрясений может достигать нескольких часов. Для поиска радиоизлучения сейсмического происхождения проводились радионаблюдения Луны до и после падения КА «Лунар Проспектор» 29 июля — 2 августа 1999 г. Была обнаружена быстрая переменность лунного радиоизлучения на длинах волн 13 и 21 см [6]. Коэффициент корреляции между вариациями лунного радиоизлучения на обеих длинах волн после падения «Лунар Проспектор» составил 0.6. Этот результат можно объяснить как вибрациями телескопа, так и обнаружением лунного радиоизлучения сейсмического происхождения. Значительные вариации интенсивности радиоизлучения Луны были обнаружены также на длине волны 2.46 см во время максимума интенсивности метеорного потока Леонид в ноябре 2000 г. и 2001 г. [1]. Однако одновременные наблюдения Луны на длине волны $\lambda = 6.2$ см на 22-м радиотелескопах в Пушино (Московская область, Россия) и Кацивели (Крым, Украина) не подтвердили лунного происхождения данных флуктуаций, поскольку не показали корреляции между ними [10].

НАБЛЮДЕНИЯ

Столкновение европейского КА СМАРТ-1 с Луной произошло 3 сентября 2006 г. в 5:42:22 UT (угол столкновения порядка 1° , масса космического аппарата 285 кг, его скорость 2 км/с). Наблюдения Луны проводились на длине волны $\lambda = 3.6$ см с помощью 22-м радиотелескопа в Кацивели (44 N, 35 E) 2 сентября с 14^h до 21^h UT и 3 сентября 2006 г. с 15^h до 21^h UT. Использовались два канала с полосами регистрации 2 МГц и 500 МГц. Временное разрешение составило 1.2 с, угловое — $5'$.

Продолжительность непрерывных наблюдений места падения СМАРТ-1 (34S, 43W) составляла 30 мин, затем в течение 20 мин наблюдалась сейсмически пассивная область (30S, 30E). Последние 10 мин каждого часа проводились наблюдения неба в нескольких градусах от Луны. Для исследования природы вариаций радиоизлучения Луны было проведено несколько тестовых наблюдений калибровочных источников и радиоизлучения земной атмосферы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Данные наблюдений перед их обработкой были откалиброваны. Амплитуда вариаций полученного сигнала от калибровочных источников и неба была равна 0.5 К для полосы 2 МГц и 0.2 К для полосы 500 МГц как 2, так и 3 сентября. Амплитуда вариаций полученного сигнала в полосах 2 и 500 МГц для места падения СМАРТ-1 и сейсмически пассивной области составила 2 и 0.7 К соответственно. Не было обнаружено различий параметров вариаций радиоизлучения места падения КА СМАРТ-1 до и после падения космического аппарата.

Вариации принимаемого радиоизлучения Луны вызываются различными факторами, в том числе и нестабильностью приемников. Влияние нестабильности приемников на уровень интенсивности принимаемого сигнала может быть аппроксимировано полиномами, причем эффекты нестабильности приемников сильнее всего проявляются при длительности наблюдений более 3 мин. После вычитания эффекта нестабильности приемников коэффициент корреляции между вариациями потока радиоизлучения Луны в полосах 2 и 500 МГц равен 0.9. Этот факт можно объяснить лунной природой вариаций, нестабильностью приемников, шумами от земных источников, а также вибрациями телескопа. Гипотеза шумов от земных источников была отвергнута, так как амплитуда вариаций радиоизлучения Луны значительно превышает амплитуду вариаций радиоизлучения неба на расстоянии нескольких градусов от Луны. Гипотеза нестабильности приемников не может объяснить отсутствие корреляции между вариациями радиоизлучения неба в полосах 2 и 500 МГц.

Дополнительные наблюдения Луны были проведены 29/30 ноября 2006 г. спустя три лунных месяца после падения СМАРТ-1 для исследования зависимости вариаций принимаемого радиоизлучения Луны от фазы Луны и расстояния места наблюдений от центра лунного диска. Эти наблюдения показали увеличение амплитуды регистрируемых флуктуаций вблизи терминатора и края лунного диска. Для этих областей характерны максимальные значения градиента изменения яркостной температуры Луны. Таким образом, вибрации телескопа могут объяснить квазипериодические флуктуации принимаемого сигнала (см. рис. 1). Квазипериодичность принимаемого радиоизлучения Луны сильнее выражена для места падения КА СМАРТ-1 по сравне-

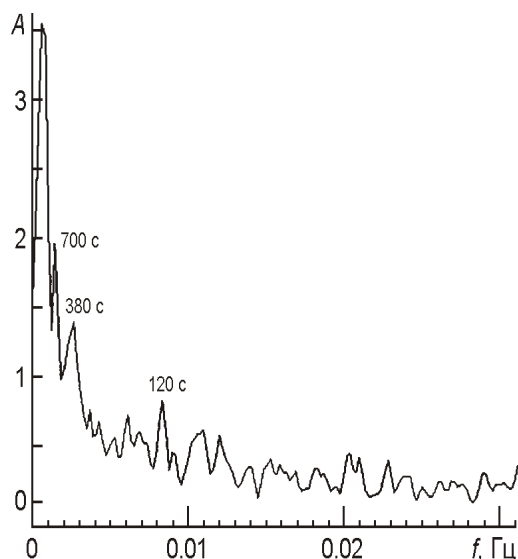


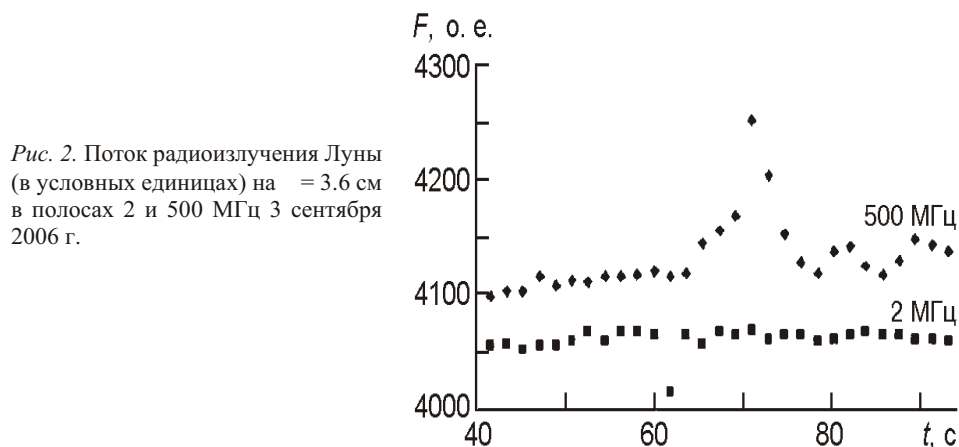
Рис. 1. Периодограмма радиоизлучения Луны от места падения КА СМАРТ-1. Наблюдения проведены 3 сентября 2006 г.

нию с сейсмически пассивной областью, так как место падения СМАРТ-1 ближе к краю лунного диска, чем наблюдавшаяся сейсмически пассивная область.

Наблюдаемые характерные периоды флуктуаций (120, 380 и 700 с) характеризуют периодичности механических вибраций телескопа. Амплитуду механических вибраций телескопа можно определить, исходя из характерной амплитуды вариаций принимаемого радиоизлучения Луны. Таким образом, радионаблюдения терминатора и краев лунного диска могут быть полезны для исследования параметров механических вибраций радиотелескопов. В частности, амплитуду L механических вибраций радиотелескопа можно оценить по формуле $L \sim DdT/T$, D — угловое разрешение радиотелескопа, dT — характерная величина амплитуды флуктуаций регистрируемой яркостной температуры Луны при наблюдениях края лунного диска, T — яркостная температура Луны. В нашем случае $D = 300$, $dT \sim 5$ К, $T = 200$ К, отсюда $L \sim 7$.

ПОИСК РАДИОВСПЫШЕК ВО ВРЕМЯ СТОЛКНОВЕНИЙ МЕТЕОРОИДОВ С ЛУНОЙ

Вспышки радиоизлучения Луны на длине волны $\lambda = 3.6$ см, вызванные падениями метеороидов на Луну, не были обнаружены во время метеорного потока Леонид в 1999 г. [8]. В тоже время были зарегистрированы оптические вспышки во время столкновений метеороидов потока Леонид с Луной [8].



Был произведен поиск радиовсплесков, вызванных падениями метеороидов на Луну, путем анализа данных наблюдений Луны на длине волны $\lambda = 3.6$ см 2/3 сентября и 29/30 ноября 2006 г. Не было обнаружено одновременных радиовсплесков на длине волны $\lambda = 3.6$ см в полосах 2 и 500 МГц на уровне 3, что соответствует 5 Ян при длительности вспышки, равной 1 с, за 10 часов наблюдений Луны. Некоторые всплески были обнаружены только в полосе 500 МГц (рис. 2). Длительность этих всплесков составляет 2—5 с, в то время как ожидаемая длительность всплесков, вызванных падениями метеороидов на Луну, порядка 0.03 с. Скорее всего, эти всплески вызваны шумами от земных источников, так как они наблюдались только в более широкой полосе. Для более аккуратного поиска радиовсплесков на Луне ударного происхождения радионаблюдения должны проводиться с временным разрешением порядка 0.01 с.

С этой целью были проведены одновременные наблюдения Луны 4 марта 2007 г. (21:30—23:50 UT) на длинах волн 3.6 и 13 см. Полосы регистрации обоих приемников составили 500 МГц, временное разрешение — 0.01 с. Также в течение 20 мин были проведены наблюдения фона неба и калибровочного источника на обеих длинах волн. Не было обнаружено одновременных радиовспышек на Луне на уровне 4 (около 10 К) как на длине волны $\lambda = 3.6$ см, так и на длине волны 13 см. При наблюдениях Луны были обнаружены одновременные всплески на уровне 3. Частота обнаружения одновременных всплесков на уровне 3 (один всплеск в минуту) и всплесков только на одной длине волны на уровне 4 (см. рис. 3) примерно совпадает как при наблюдениях Луны, так и при наблюдениях калибровочного источника и неба, поэтому природа этих всплесков не связана с Луной. Заметим, что наблюдения Луны с временным разрешением 0.01 с позволяют уменьшить верхний предел регистрации интенсивности лунных радиовспышек на порядок по сравнению с наблюдениями с временным разрешением 1 с.

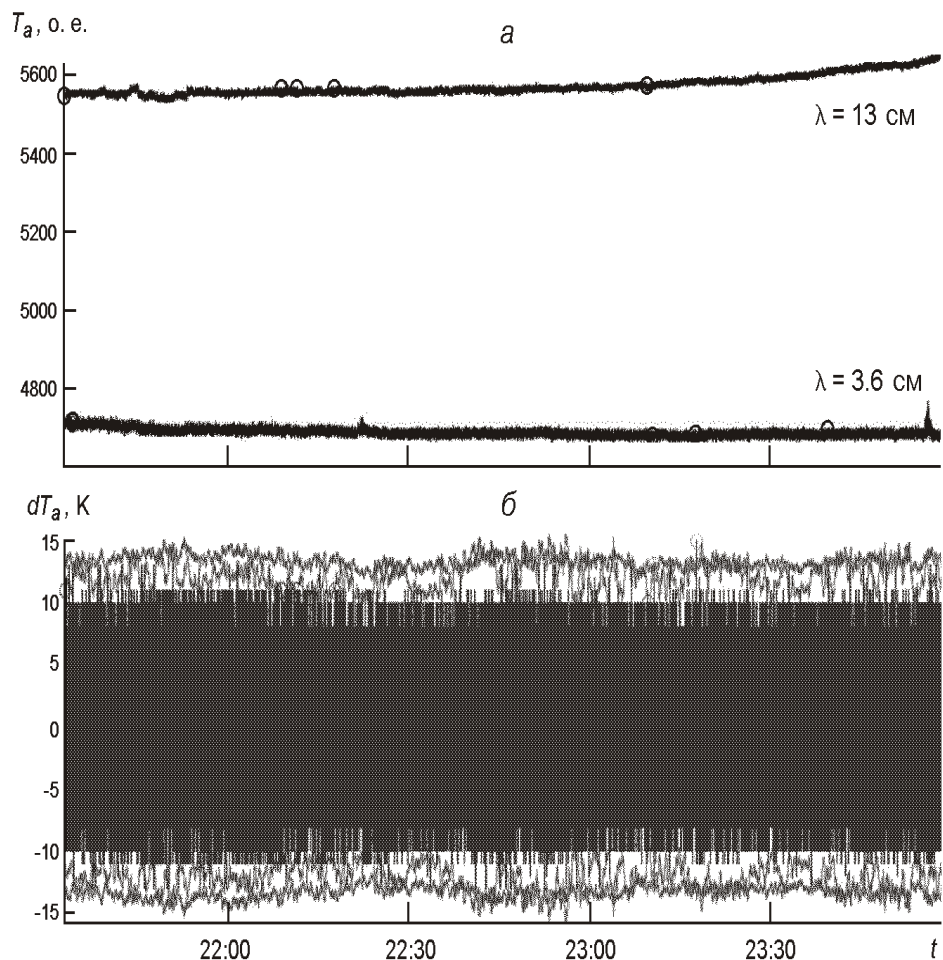


Рис. 3. Поток радиоизлучения Луны 4 марта 2007 г.: *a* — антенная температура T_a (кружки означают всплески на уровне 4); *б* — разница антенных температур между соседними значениями потока радиоизлучения (верхние и нижние кривые показывают изменение уровня 4 с течением времени)

ОЦЕНКА ИНТЕНСИВНОСТИ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПАДЕНИИ КА СМАРТ-1 НА ЛУНУ

Можно оценить интенсивность радиоизлучения во время падения КА СМАРТ-1, основываясь на результатах ударных экспериментов и предыдущих радионаблюдений. Верхний предел интенсивности радиовсплесков во время активности Леонид в 2001 г. оценен на уровне 100 Ян на длине волны $\lambda = 6.2$ см, если длительность вспышки равна 0.02 с [10]. Заметим, что кинетическая энергия метеороидов потока Леонид [7], вызвавших самые яркие оптические вспышки на Луне, сравнима с кинетической энергией СМАРТ-1 в момент столкновения с Луной. Таким образом, верхний предел радиовсплеска на длине вол-

ны $\lambda = 6.2$ см при падении SMART-1 также может быть оценен на уровне 100 Ян. Во время столкновения ударника массой 1 г с алюминиевой мишенью со скоростью 4 км/с длительность радиоизлучения составляла 0.3 мс. Средняя и максимальная мощность радиоизлучения на длине волны 1.35 см и полосе регистрации 300 МГц составила $3 \cdot 10^{-8}$ Вт и 10^{-5} Вт соответственно [9]. Заметим, что максимальная мощность радиоизлучения достигалась во время очень коротких (менее 10^{-6} с) всплесков радиоизлучения. Предположим, что продолжительность радиовспышки пропорциональна размерам ударника. В этом случае длительность радиовспышки при падении SMART-1 будет равна 0.03 с. Предположим, что мощность радиоизлучения пропорциональна кинетической энергии ударников. Тогда на длине волны $\lambda = 1.35$ см мощность коротких всплесков может достигать 0.1 Ян, а средняя мощность радиоизлучения — $3 \cdot 10^{-4}$ Ян. Интенсивность радиовспышки при падении SMART-1 значительно выше на более длинных волнах, так как интенсивность радиоизлучения микротрещин, образующихся при ударных процессах, увеличивается с увеличением длины волны [5]. Наша оценка параметров радиоизлучения при падении КА SMART-1 на Луну может быть проверена при анализе интерферометрических наблюдений падения SMART-1 на других радиотелескопах на длине волны $\lambda = 13$ см с временным разрешением 10^{-6} с [3]. Значительный прогресс в исследовании радиоизлучения во время ударных явлений на Луне может быть достигнут при радионаблюдениях Луны во время падений американского, японского, китайского и индийского космических аппаратов на Луну, запланированных на ближайшие годы.

Результаты проведенных радионаблюдений Луны могут быть использованы для оценки верхнего предела интенсивности радиовсплесков при падениях спорадических метеороидов на Луну. В настоящее время частота обнаружения оптических вспышек при падении спорадических метеороидов на Луну составляет 0.1 ч^{-1} , причем масса метеороидов — порядка 1 кг, а их скорость — 15—20 км/с [2]. Логично предположить, что за 10 ч радионаблюдений Луны произошло падение 1 кг метеороида на Луну. Так как это падение не было зарегистрировано, то верхний предел интенсивности радиоизлучения при ударных событиях составляет 10^{-7} Ян/Дж при длительности радиоизлучения, равной 0.02 с.

ВЫВОДЫ

Разработана оригинальная методика проведения наблюдений для выяснения природы вариаций радиоизлучения Луны. Показано, что флуктуации радиоизлучения Луны вызываются нестабильностью приемников и механическими вибрациями радиотелескопа. Радионаблюдения края лунного диска могут определить амплитуду и харак-

терные частоты механических вибраций радиотелескопа. Оценена возможность обнаружения радиовсплеска, вызванного падением СМАРТ-1 на Луну. Оценен верхний предел интенсивности радиоизлучения во время столкновений спорадических метеороидов с Луной.

1. *Berezhnaya A. A., Bervalds E., Khavroshkin O. B., et al.* Radio observations of the Moon during activity periods of the Leonid and Lyrid meteor streams // *Baltic Astronomy*.—2002.—**11**.—P. 507—527.
2. *Cooke W. J., Suggs R. M., Suggs R. J., et al.* Rate and distribution of kilogram lunar impactors // 38th Lunar and Planetary Science Conference, League City, Texas. Abstract.—2007.—N 1986.
3. *Ehrenfreund P., Foing B. H., Veillet C., et al.* SMART-1 impact ground-based campaign // 38th Lunar and Planetary Science Conference, League City, Texas. Abstract.—2007.—N 2446.
4. *Gokhberg M. B.* Earthquake prediction: Seismoelectromagnetic phenomena. — Amsterdam: Gordon and Breach Publishers, 1995.—195 p.
5. *Grimalsky V., Torres A. J., Zuniga C., et al.* Photodetector with giant internal current amplification: experiment and numerical calculated model // *Natural Hazards and Earth System Sciences*.—2004.—**4**.—P. 793—798.
6. *Khavroshkin O. B., Tsyplakov V. V.* Temporal structure of meteoroid stream and lunar seismicity according to Nakamura's catalogue // *Doklady Earth Sciences*.—2001.—**376**.—P. 90—92.
7. *Ortiz J. L., Quesada J. A., Aceituno J., et al.* Observation and interpretation of Leonid impact flashes on the Moon in 2001 // *Astrophys. J.*—2002.—**576**.—P. 567—573.
8. *Osaki H., Okubo Hiroshi, Koyama Yasuhiro.* Observing electromagnetic radiation by Leonid impacts on the Moon // *J. Commun. Res. Laboratory*.—2001.—**48**.—P. 159—162.
9. *Takano T., Maki K., Soma E., et al.* Material dependence of microwave emission due to a hypervelocity impact // *Proc. 4th European Conference on Space Debris, ESA/ESOC, Darmstadt, Germany*.—2005.—P. 501—505.
10. *Volvach A. E., Berezhnaya A. A., Khavroshkin O. B., et al.* The simultaneous observations of the Moon at 6.2 cm using 22-m radio telescopes at Pushchino and Simeiz during Leonid meteor shower on November 2001 // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*.—2005.—**21**, N 1.—P. 60—65.

Поступила в редакцию 15.04.08