

УДК 537.591.15:550.34.09

О ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛУННОЙ РАДИОЭМИССИИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ С ПОМОЩЬЮ ЛУННОГО ОРБИТАЛЬНОГО РАДИОДЕТЕКТОРА

Б. Н. Ломоносов, О. Б. Хаврошкин¹, В. А. Царев

Обсуждается возможность исследования лунной радиоэмиссии сейсмической природы с помощью лунного орбитального радиотелескопа ЛОРД.

В настоящее время ФИАН, НПО им. Лавочкина, НИИЯФ МГУ и Институт космической физики Швеции совместно готовят к реализации эксперимент по регистрации космических лучей и нейтрино ультравысоких энергий с помощью Лунного Орбитального Радиодетектора (ЛОРД) [1]. Предполагается, что телескоп будет регистрировать с высокой чувствительностью радиоизлучение с поверхности Луны в области частот выше 100 МГц, которое возникает при взаимодействии космических частиц с лунным реголитом. Наряду с решением основной астрофизической задачи, радиотелескоп ЛОРД может быть использован и для получения информации, представляющей интерес также для других областей науки, таких как планетология, физика космической плазмы и т.п. Так, регистрация с помощью радиотелескопа ЛОРД излучения от дневной поверхности и приповерхностных структур Луны позволит исследовать вариации потока радиоэмиссии (РЭ) нетепловой природы и тем самым получить качественно новую информацию относительно лунной сейсмической активности и внутренней структуры Луны. Поскольку лунная РЭ может быть обусловлена также взаимодействием с Луной потоков рентгеновского и γ -излучения от астрофизических источников, это открывает возможность использования Луны как гигантского детектора этих потоков. Вместе с тем, исследование нетеплового излучения от поверхности Луны может способствовать

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

лучшему пониманию механизмов электромагнитного излучения (ЭМИ) сейсмической природы на Земле. Как известно, ЭМИ от сейсмических источников на Земле может возникать в результате движений зарядов, сопровождающих процессы микродеформаций и микроразрушений среды [2]. Природа этого ЭМИ пока изучена не достаточно полно. Существует несколько моделей преобразования механических напряжений в ЭМ излучение, которые используются для объяснения сейсмической эмиссии.

1. Образование новых микротрещин с заряженными поверхностями в породах.
2. Возникновение зарядов в вершинах существующих трещин под воздействием увеличивающихся нагрузок.
3. Сдвиговые движения пород, приводящие к вынужденным колебаниям атомов среды [3].
4. Пьезоэлектрические и пьезомагнитные эффекты.

Основной практический интерес к исследованию радиосейсмической эмиссии на Земле связан, прежде всего, с задачей предсказания землетрясений (ЗТ). Один из возможных методов выявления предвестников ЗТ – исследование ЭМИ сейсмической природы. ЭМ эмиссия, предшествовавшая ЗТ, зарегистрирована в $\kappa Гц$ и $МГц$ областях [4], а также при разрушении образцов пород в лабораторных условиях [5]. При возникновении сейсмических явлений на Земле источник ЭМ излучения (очаговая зона), как правило, располагается вблизи эпицентра ЗТ на глубинах 10 – 30 км. В этом случае только низкочастотная часть полного ЭМИ может достичь поверхности Земли из-за конечной проводимости земной коры. Поэтому не удастся измерить полный спектр ЭМИ. (В экспериментах максимум ЭМИ наблюдается при частотах 100 $\kappa Гц$ – 100 $МГц$, периоды модуляции излучения – 0.1 с – 20 мин.)

Есть основания полагать, что подобные радиосейсмические излучения должны возникать и на Луне, и других планетах земной группы. Спорадическая РЭ может возникать во время столкновений больших метеоритов или газопылевых потоков с Луной; регулярная РЭ – из-за приливных сил, температурных градиентов и локальных механических напряжений [6].

Как известно, основной источник лунной РЭ на сантиметровых длинах волн – термическая эмиссия с яркостной температурой $T \approx 250 K$. Интенсивность термической РЭ меняется медленно с периодом около месяца. Однако, после сильных ударов метеоритов или космических аппаратов по лунной поверхности, можно ожидать быстрых изменений интенсивности лунной РЭ, поскольку удар может вызвать собственные колебания Луны, что, в свою очередь, может сопровождаться трещинообразованием и

подвижкой разломов вблизи поверхности Луны и последующей генерацией ЭМИ. Для микротрещин длиной 0.1 – 1 мкм максимум ЭМИ ожидается в области частот 1 – 10 ГГц.

Действительно, подобная радиоэмиссия в различных частотных диапазонах была зафиксирована после сильных ударов метеоритов или космических аппаратов по лунной поверхности.

Так, 31 июня 1999 г. американский космический аппарат (КА) Lunar Prospector столкнулся с поверхностью Луны. Удар сопровождался сейсмическими эффектами, эквивалентными большому “лунотрясению”, т.к. при массе КА 160 кг, скорости 1.7 км/с кинетическая энергия удара составила около 10^{15} эрг. При этом ожидаемая энергия ЭМИ могла быть в пределах $\sim 10^8 - 10^{11}$ эрг. Во время наблюдения на 64 м радиотелескопе “Калязин” 30 июля – 2 августа 1999 г. были зафиксированы вариации потока лунного радиоизлучения на длинах 13 и 21 см [6] при чувствительности радиотелескопа ~ 0.3 К [6]. Была найдена корреляция между вариациями лунного сигнала на обеих длинах волн, что рассматривается как свидетельство в пользу общего механизма РЭ. Средние величины амплитуд вариаций лунной яркостной температуры составили 2 – 10 К.

Сообщалось об измерениях РЭ на 32 м РТ Международного Радиоастрономического центра в Вентспилсе при прохождении Луны через метеороидный поток в 2000 и 2001 гг. [7]. При бомбардировке поверхности Луны в момент прохождения максимума потока “Леонид” 17 и 18 ноября 2000 г. амплитуда флуктуаций лунного радиоизлучения на длине волны 2.46 см возросла в 3 – 5 раз и достигала 10 К. Большинство зафиксированных квазипериодических осцилляций имели периоды от 1 до 6 мин. Амплитуды осцилляций, наблюдавшиеся в 2001 г., были еще больше и достигали 18 и 19 ноября 25 К. Типичные периоды составляли 2.5; 3.0; 3.7 и 6.0 мин и походили на периоды, зарегистрированные в 2000 г.

На том же РТ в Вентспилсе 16 – 20 апреля 2001 г. были проведены исследования флуктуаций лунного радиоизлучения на длинах волн 1.3, 6 и 18 см в момент прохождения Луной метеороидного потока Lyrid [7]. Обнаружена переиодичность вариаций потока лунной РЭ с периодами от 2 до 15 мин и амплитудами 1 – 10 К на всех длинах волн.

Указанные наблюдения представляют несомненный интерес, поскольку открывают новый канал для исследования лунной сейсмической активности и внутреннего строения Луны. Однако на зарегистрированные вариации лунного радиопотока в некоторых

случаях могли оказывать влияние и атмосферные возмущения. Поэтому измерения с борта лунного спутника, не подверженные атмосферным искажениям, будут особенно ценными. Важно подчеркнуть, что в случаях ударного возбуждения сейсмической активности Луны, моменты ударного воздействия могут быть заранее известны, а источники излучения располагаться на поверхности и в приповерхностных структурах Луны. Поэтому имеется принципиальная возможность регистрации полного спектра ЭМИ, что существенно как для исследования внутреннего строения Луны, так и для изучения механизмов сейсмической РЭ. Это, в свою очередь, может также способствовать лучшему пониманию механизмов ЭМИ сейсмической природы на Земле.

Оценим теперь ожидаемую чувствительность канала для измерений амплитуд вариаций лунной яркостной температуры поверхности Луны и соответствующих минимальных потоков электромагнитного излучения, доступного для регистрации в эксперименте ЛОРД [1]. Напомним, что в этом эксперименте предполагается использовать многолучевую антенную систему, лучи которой направлены на лимб Луны и просматривают либо весь лимб, либо его часть (см. рис. 1).

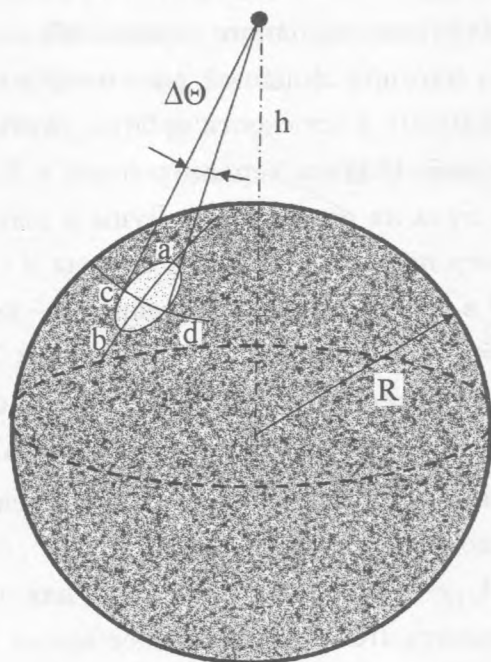


Рис. 1. Видимая область поверхности Луны для одного из лучей антенны (размеры видимой области: $ab = d_1$ - продольный и $cd = d_2$ - поперечный).

Рассмотрим один из этих лучей с угловым размером $\Delta\theta$. Если за время проведения эксперимента полное время наблюдения данным лучом активной зоны поверхности Луны составляет Δt , то очевидно, что разрешение температурных измерений ΔT равно [8]

$$\Delta T = T/(\Delta f \Delta t)^{-1/2},$$

где Δf – частотная полоса антенны. Для оценки Δt рассмотрим два типичных случая: (а) температурные флуктуации, обусловленные сейсмической активностью, распределены однородно по поверхности Луны (или по всей области, просматриваемой лучом при движении спутника); (б) сейсмическая активность ограничена областью с характерным размером d в плоскости орбиты спутника. Очевидно, что в первом случае ограничения на величину Δt накладываются только характерными ожидаемыми длительностями периодов сейсмической активности Δt_0 , которые, как это следует из приведенных выше наблюдений, составляют обычно несколько часов. Полагая $T = 300 \text{ K}$, $\Delta t_0 = 2 \text{ час}$ (что близко к периоду обращения спутника вокруг Луны) и $\Delta f = 50 \text{ МГц}$, получим $\Delta T_a \approx 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ K}$. Во втором случае, активная область будет находиться в области видимости данного луча лишь часть η от полного периода обращения спутника по орбите вокруг Луны. Легко видеть, что при заданной высоте орбиты наименьшие значения Δt соответствуют лучу, лежащему в плоскости орбиты спутника. Тогда $\eta \approx d/2\pi R$ и $\Delta T_b = T/(\Delta f \eta \Delta t_0)^{-1/2}$, где $R = 1738 \text{ км}$ – радиус Луны и d определяется размерами области видимости данного луча на поверхности Луны в плоскости орбиты. При ориентации луча на лимб, размер пятна в плоскости орбиты d существенно превосходит размер $d_1 = (2Rh + h^2)^{1/2} \Delta\theta$ в поперечном направлении (h – высота орбиты спутника). Полагая $h = 200 \text{ км}$ и $\Delta\theta = 15^\circ$, получим $d_1 \approx 214 \text{ км}$, $d \approx 740 \text{ км}$ и $\eta \approx 0.07$. Если, по-прежнему, считать, что характерная продолжительность сейсмической активности составляет 2 часа, то получим оценку точности измерений $\Delta T_b \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ K}$.

Соответствующие значения чувствительности ΔQ измерений плотности потока радиоизлучения можно найти по формуле $\Delta Q = 2k\Delta T(A_{eff})^{-1}$, где $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ – постоянная Больцмана и A_{eff} – эффективная площадь для одного луча антенны. Поскольку параметры эксперимента ЛОРД в настоящее время окончательно не определены, рассмотрим два возможных выбора длины волны: $\lambda_1 = 1 \text{ м}$ и $\lambda_2 = 0.5 \text{ м}$. Тогда значения A_{eff} равны 16 и 4 м², соответственно, что приводит к следующим оценкам: $\Delta Q_{a1} = 0.086 \text{ Ян}$, $\Delta Q_{a2} = \Delta Q_{b1} = 0.34 \text{ Ян}$ и $\Delta Q_{b2} = 1.38 \text{ Ян}$ (1 Ян =

10^{-26} Вт/м²/МГц), соответственно для рассмотренных случаев. Таким образом, ожидаемая чувствительность в эксперименте ЛОРД вполне достаточна для регистрации радиоэмиссии, обусловленной как сейсмической активностью Луны, так и внешними воздействиями астрофизического и космогонического происхождения.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Гусев Г. А., Ломоносов Б. Н., Пичхадзе К. М. и др. Космические исследования, **44**, 22 (2006).
- [2] Соболев Г. А., Демин В. М. Механоэлектрические случаи в Земле, М., Наука, 1980.
- [3] Sasaki H. and Tsarev V. A. J. Atmospheric Electricity, **17**(2), 77 (1997).
- [4] Gokhberg M. B., Moegunov V. A., and Pokhotelov O. A. Earthquake prediction – Seismoelectromagnetic phenomena, Amsterdam, Gordon and Breach Publishers, 193 (1995).
- [5] Гершензон Н. И., Зилпимани Д. О., Манцгаладзе П. В., Похотелов О. А. Доклады АН СССР, **228**, 75 (1986).
- [6] Bereznoi A. A., Gusev S. G., Khavroshkin O. B., et al. Proc. of the 4th Intern. Conf. on Exploration and Utilization of the Moon, 2000, p. 179.
- [7] Bereznoi A. A., Bervalds E., Khavroshkin O. B., et al. Baltic Astronomy, **11**, 507 (2002).
- [8] Хаврошкин О. Б. Некоторые проблемы нелинейной сейсмологии, М., ОИФЗ РАН, 301 (1999).

Поступила в редакцию 27 апреля 2006 г.