

УДК 523 164.34

РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ ЛУНЫ В МИЛЛИМЕТРОВОМ И СУБМИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНАХ ВОЛН

Л. И. Федосеев, Л. В. Лубяко, Л. М. Кукин

Описывается методика и результаты измерений радиоизлучения Луны на волнах 0,87; 1,06; 1,26 и 1,45 мм. Производится сравнение с данными других измерений в миллиметровом диапазоне и с теорией однородной модели Луны.

Исследование Луны радиоастрономическими методами привело к представлению о примерной однородности ее верхнего слоя, отвергнув резко неоднородную двухслойно-пылевую модель [1, 2]. Отсутствие существенного пылевого покрова было подтверждено телевизионными передачами автоматических станций с Луны. Однако этим не исчерпаны связанные с Луной радиоастрономические задачи.

С совершенствованием радиотелескопов появилась возможность более подробного изучения лунного спектра. В частности, измерения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах могут дать сведения о таких тонких эффектах как температурные зависимости физических свойств лунного грунта, так как излучающий в этом диапазоне слой подвержен сильным температурным изменениям. Кроме того, по аналогии с некоторыми земными диэлектриками на субмиллиметровых волнах можно ожидать увеличения угла потерь лунного грунта.

Перечисленные обстоятельства делают целесообразным подробное исследование радиоизлучения Луны на возможно более коротких волнах. Описание таких измерений на волнах 0,87; 1,06; 1,26 и 1,45 мм приводится ниже.

1. АППАРАТУРА, МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ, ОБРАБОТКА

С целью уменьшения влияния атмосферного поглощения на точность измерений они проводились на высоте около 3000 м над уровнем моря (Высокогорная база ГАИШ близ Алма-Аты), зимой (ноябрь—декабрь 1966 г.), когда содержание водяного пара в атмосфере мало.

Наблюдения были произведены с помощью трех параболических антенн и детекторных радиометров [3]. Параметры радиотелескопов приведены в таблице 1.

На волнах 0,87 и 1,06 мм использовалась одна и та же аппаратура. Переход с одной волны на другую осуществлялся заменой детектора в фокусе параболоида. При этом юстировка антенны, а также сопряжение электрической оси ее с оптической осью видоискателя ежедневно проверялись по Солнцу.

Таблица 1

Длина волны (мм)	Относительная полоса частот приема $\frac{\Delta f}{f_0}$ (%)	Ширина диаграммы направленности (по уровню 3 дБ) $\theta_{0,5}$ (мин)	Порог чувствительности (°К) (постоянная времени $\tau = 1$ сек)
0,87	± 5	12,5	20
1,06	± 6	14	12
1,26	$\pm 7,5$	10	10
1,45	± 6	18,5	15

Калибровка радиотелескопов производилась по излучению атмосферы [4].

Обработка выполнялась по формуле

$$T_{\text{л}} = \frac{\alpha_{\text{л}} - \alpha_{\text{н}}}{\alpha_0 - \alpha_{\text{н}}} (T_0 + \Delta T_1 + \Delta T_2), \quad (1)$$

где $T_{\text{л}}$ — эффективная температура центральной части лунного диска; $\alpha_{\text{л}}$, $\alpha_{\text{н}}$ и α_0 — показания выходного прибора радиометра при антенне, наведенной соответственно на Луну, на область неба рядом с Луной (под тем же углом места) и на «черную» область, эффективная температура которой близка к температуре воздуха T_0 ; ΔT_1 — поправка на неизотермичность атмосферы; ΔT_2 — поправка на неизотропность рассеяния антенны.

В случае экспоненциального убывания поглощения с высотой и линейного уменьшения температуры воздуха поправка на неизотермичность атмосферы имеет вид

$$\Delta T_1 = a \left\{ H_{\text{к}} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\Gamma_{\text{к}}^m}{m \cdot m!} + H_{\text{в}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Gamma_{\text{в}}^n}{n \cdot n!} \left[1 + \sum_{p=1}^{\infty} \frac{\Gamma_{\text{к}}^p}{\left(n \frac{H_{\text{к}}}{H_{\text{в}}} + p \right) p!} \right] \right\}, \quad (2)$$

где $\Gamma_{\text{к}}$ и $\Gamma_{\text{в}}$ — значения поглощения в кислороде и водяном паре в направлении Луны, $H_{\text{к}}$ и $H_{\text{в}}$ — эквивалентные длины пути в кислороде и водяном паре, a — вертикальный градиент температуры атмосферы. Для определения $\Gamma_{\text{к}}$ и $\Gamma_{\text{в}}$ перед началом наблюдений и после их окончания производились измерения полного вертикального поглощения и абсолютной влажности воздуха в месте расположения радиотелескопов [5]. Величины $H_{\text{в}}$ и $H_{\text{к}}$ были взяты из [5, 6]. Приведенное в [7] вертикальное распределение температуры воздуха в зимнее время аппроксимировалось линейной функцией с наклоном $a = 4,6$ град·км⁻¹.

Величина и знак поправки на неизотропность рассеяния антенны ΔT_2 зависят от величины и характера углового распределения боковых лепестков, расположения местных предметов, величины атмосферного поглощения и, главным образом, от того, насколько приходится изменять положение антенны по углу места h при наведении ее на Луну (относительно направления на «черную» область). Зависимость ΔT_2 от h оценивалась по данным измерений радиоизлучения Солнца под различными углами над горизонтом [8]. После усреднения результатов большого числа измерений оказалось, что температура Солнца, вычисленная по формуле (1) в предположении, что $\Delta T_2 = 0$, почти линейно убывает при изменении угла места от 9 до 30°. При этом отклонения от среднего значения максимальны на волне $\lambda = 0,87$ мм и достигают

* Такое уменьшение влияния задних и боковых лепестков было достигнуто благодаря бленде из поглощающего материала, которой по периметру была окружена антенна радиотелескопа на волну 1,26 мм.

$\pm 15\%$, минимальны ($\pm 4\%$) на волне $\lambda = 1,26 \text{ мм}^*$). Поэтому при окончательной обработке использовались только данные тех измерений, для которых можно было учесть зависимость $\Delta T_2(h)$, т. е. выполненных в интервале углов места Луны $9-35^\circ$.

Измерения проводились обычно при постоянной времени выходной цепи радиометра $\tau = 16 \text{ сек}$. За сеанс наблюдений производилось по 8—15 записей излучения Луны, неба и опорной области. Полученные в течение этого времени значения T_L усреднялись и относились к фазе Луны, соответствующей середине сеанса.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 1 в зависимости от фазы Луны представлены полученные на волнах 0,87; 1,06; 1,26 и 1,45 мм значения эффективной температуры центральной части лунного диска T_L . Постоянная составляющая и первые две гармоники фурье-разложения аппроксимирующих эти зависимости функций (их графики изображены сплошными линиями) следующие:

$$T_L = [191 + 139,5 \cos(i - 4^\circ 50') + 35 \cos(2i + 4^\circ)]^\circ\text{К} \quad (\lambda = 0,87 \text{ мм}),$$

$$T_L = [183 + 105 \cos(i - 13^\circ, 30') + 19 \cos(2i + 16^\circ, 30')]^\circ\text{К} \quad (\lambda = 1,06 \text{ мм}),$$

(3)

$$T_L = [186 + 107 \cos(i - 9^\circ, 30') + 20 \cos(2i - 9^\circ)]^\circ\text{К} \quad (\lambda = 1,26 \text{ мм}),$$

$$T_L = [194 + 97 \cos(i - 19^\circ) + 3 \cos(2i + 45^\circ)]^\circ\text{К} \quad (\lambda = 1,45 \text{ мм})$$

Здесь i — фазовый угол Луны ($i = 0$ соответствует полнолунию).

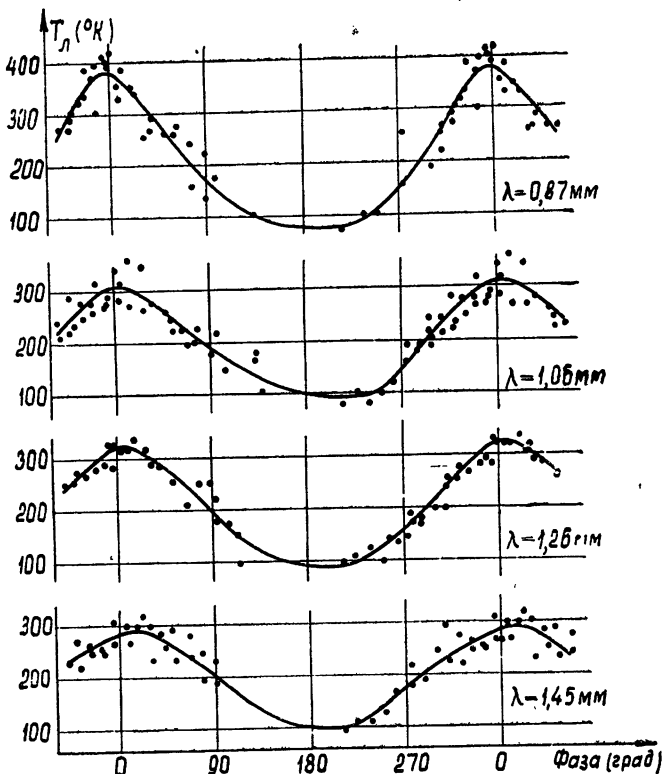


Рис. 1.

Среднеквадратичный разброс экспериментальных точек относительно аппроксимирующих кривых не превышает 10% на волнах 1,06; 1,26 и 1,45 мм и 14% на волне 0,87 мм. Этим разбросом (случайная ошибка) определяется точность относительных измерений постоянной составляющей и амплитуды первой гармоники. Точность определения амплитуды второй гармоники в 2—3 раза ниже.

Кроме случайной, не исключена также систематическая ошибка в определении абсолютных значений температуры. Основные источники ее следующие: неточность учета влияния неизотропности рассеяния антенны (ее можно оценить величиной $\pm 5-7\%$ на волнах 1,26; 1,06 и 1,45 мм и $\pm 10\%$ на волне 0,87 мм), неточность учета неизотермичности атмосферы, связанная с возможными систематическими отклонениями вертикального распределения метеопараметров от принятого в расчете (примерно $\pm 2\%$). Поэтому абсолютные значения температуры даются с точностью $\pm 12-13\%$ на волнах 1,25; 1,06 и 1,45 мм и $\pm 18\%$ на волне 0,87 мм.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для сравнения полученных результатов с теорией и данными других измерений на миллиметровых волнах на рис. 2а, б точками изображены следующие отношения:

$$M_1(\lambda) = \frac{T_0(\lambda)}{T_1(\lambda)} \frac{\beta_1}{\beta_0} \quad \text{и} \quad M_2(\lambda) = \frac{T_0(\lambda)}{T_2(\lambda)} \frac{\beta_2}{\beta_0}, \quad (4)$$

где $T_0(\lambda)$, $T_1(\lambda)$ и $T_2(\lambda)$ — экспериментальные значения постоянной составляющей и амплитуд первой и второй гармоник радиотемпературы Луны, измеренной на волне λ ; β_0 , β_1 и β_2 — коэффициенты, учитывающие усредняющее действие диаграммы направленности при измерении постоянной составляющей и амплитуд первой и второй гармоник [9].

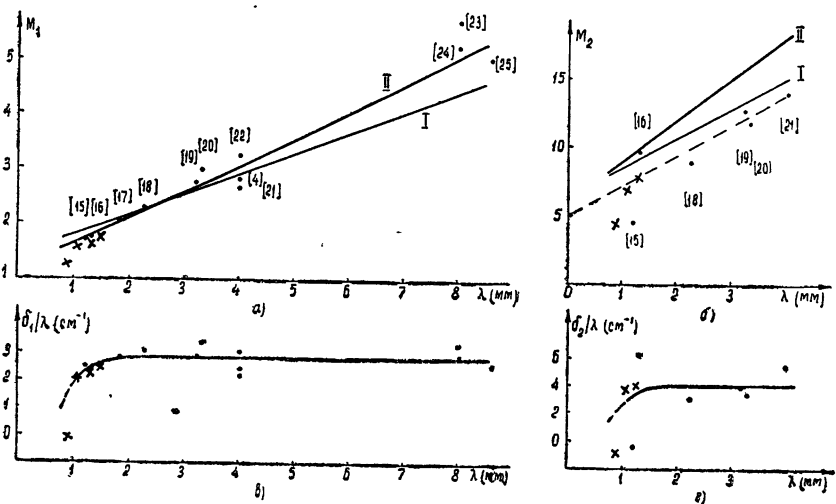


Рис. 2.

На этих же рисунках сплошными линиями проведены теоретические кривые I и II для однородной модели Луны с не зависящими от температуры параметрами. Кривая I соответствует $\gamma = 400$ ($\gamma = (k\rho c)^{-1/2}$, где k — теплопроводность, ρ — плотность и c — теплоемкость) и

$\frac{\delta_1}{\lambda} = 2^*$ ($\delta_1 = \frac{l_2}{l_{T_1}}$, где l_2 и l_{T_1} — соответственно глубина проникания в лунный грунт электромагнитной волны и первой гармоники тепловой волны), кривая II — $\gamma = 1000$ и $\frac{\delta_1}{\lambda} = 2,8$.

Полученные в настоящей работе M_1 и M_2 (крестики) хорошо согласуются со значениями, вычисленными по данным измерений на других волнах (точки).

Как видно из рисунка 2а, в диапазоне волн 0,87—8,6 мм кривая II, соответствующая отношению постоянной составляющей к амплитуде первой гармоники поверхностной температуры $M_1(0) = 1,29$, проходит гораздо ближе к экспериментальным точкам, чем кривая I ($M_1(0) = 1,48$). Систематическое отклонение от последней четко видно на волнах короче 1,8 мм и около 8 мм, причем расхождение с кривой I данных измерений на волнах 0,87; 1,06; 1,26, а также на волне 8 мм [23, 24], выходит за пределы ошибок измерений. Заметим, что подбором δ_1/λ (при фиксированном $M_1(0) = 1,48$, соответствующем $\gamma = 400$) невозможно добиться устранения этого расхождения одновременно на высокочастотном и низкочастотном концах рассматриваемого диапазона. Таким образом, в рамках однородной гладкой модели с не зависящими от температуры параметрами лунационные измерения на миллиметровых волнах, так же как и инфракрасные измерения, лучше удовлетворяют модели с $\gamma = 1000$, чем модели с $\gamma = 400$.

Температурная же зависимость теплопроводности, как показано в [13, 14], приводит к некоторому увеличению постоянной составляющей и очень мало влияет на отношение $T_0(\lambda)/T_1(\lambda)$, так как даже при $T = 300^\circ$ радиационная компонента теплопроводности k_r составляет лишь 20—30% от молекулярной компоненты k_0 . Поэтому кривая $M_1(\lambda)$, учитывающая k_r проходит в районе $\lambda \sim 1$ мм несколько выше кривой, характеризующей «температурно независимую модель» и соответствующей тому же значению γ (при $T = 300^\circ$).

Противоположное влияние на M_1 оказывает зависимость теплоемкости от температуры. Совместное действие этих факторов ($k_r \sim T^3$, $k_r(300^\circ\text{K}) = 0,25 k_0$ [13], теплоемкость зависит от температуры по закону, характерному для земных силикатов [14], причем $c(300^\circ\text{K}) = 0,2$, $\gamma(300^\circ\text{K}) = 800$) приводит к тому, что изменение $M_1(\lambda)$, как и в случае модели с постоянными параметрами и $\gamma = 1000$, изображается кривой II, которая удовлетворяет данным измерений.

На рис. 2в представлено изменение параметра δ_1/λ в зависимости от длины волны («температурно независимая модель» с $\gamma = 1000$ либо «температурно зависимая» с $\gamma(300^\circ\text{K}) = 800$). В диапазоне 2—8 мм эта величина остается примерно постоянной и равна $\delta_1/\lambda = [2,8 \pm 0,5]$ см⁻¹. На более коротких волнах заметно уменьшение ее, особенно резкое на волне $\lambda = 0,87$ мм. Такое уменьшение δ_1/λ может быть объяснено увеличением удельного тангенса угла потерь $\text{tg}\Delta/\rho$.

Согласно [1],

$$\frac{\gamma}{\text{tg}\Delta/\rho} = \frac{\sqrt{\epsilon}}{\sqrt{\Omega}} \frac{2\sqrt{2\pi}\delta_1}{c\lambda}, \quad (5)$$

где ϵ — диэлектрическая постоянная, Ω — частота лунаций. При $\epsilon = 1,5$ и $c = 0,2$ получаем, что на волнах 2—8 мм

* Согласно [1], считалось, что однородная модель с такими параметрами удовлетворяет данным относительных измерений радиоизлучения Луны в диапазоне волн 1,3 мм — 3 см. Однако в [1] не учитывалось усредняющее действие диаграммы направленности.

$$\frac{\gamma}{\operatorname{tg}\Delta/\rho} = (10,7 \pm 1,9) \cdot 10^4$$

и на волне 1 мм

$$\frac{\gamma}{\operatorname{tg}\Delta/\rho} = (6,9 \pm 2) \cdot 10^4.$$

Заметим, что из затменных измерений на волнах 1, 2; 4 и 6 мм [10] следует:

$$\frac{\gamma}{\operatorname{tg}\Delta/\rho} = (6,5 \pm 1,5) \cdot 10^4.$$

Таким образом, слой лунного грунта, излучающий на волнах короче 1 мм, как и поверхностный слой, подверженный температурным изменениям во время затмений [11], обладает потерями, в полтора раза превышающими потери в глубине.

Резкое уменьшение δ_1/λ на волне 0,87 мм (этот результат, безусловно, требует дальнейшего экспериментального подтверждения) может быть связано с наличием линий поглощения в лунном грунте. Известно [12], что в субмиллиметровом диапазоне прозрачность таких земных диэлектриков, как кварц, стекло, слюда, NaCl, KBr, LiF и др., заметно уменьшается. Предварительные результаты измерений показывают, что на волне 1,2 мм тангенс угла потерь гранита и биотитового диорита в 1,5—2 раза, а у некоторых разновидностей туфа — почти на порядок больше, чем на сантиметровых волнах*.

Обратимся ко второй гармонике изменения эффективной температуры Луны во время лунаций. Как видно из рис. 2б, теоретические кривые I и II даже при наличии заметного разброса значений $M_2(\lambda)$ проходят выше экспериментальных точек.

Соответствие с данными измерений может быть получено, если положить, что отношение постоянной составляющей к амплитуде второй гармоники поверхностной температуры $M_2(0) \simeq 5$, а не 6,08, как следует из [1]. Это можно проиллюстрировать рисунком 2г. Приведенный на нем график $\delta_2(\lambda)/\lambda$ получен из $\delta_1(\lambda)/\lambda$ с помощью следующего из однородной модели соотношения:

$$\frac{\delta_2(\lambda)}{\lambda} = \sqrt{2} \frac{\delta_1(\lambda)}{\lambda}, \quad (6)$$

а изображенные точками и крестиками значения $\delta_2(\lambda)/\lambda$ вычислены по данным $M_2(\lambda)$ в предположении однородной модели с $M_2(0) = 5$. Заметим, что это значение гораздо лучше удовлетворяет также и результатам измерений [26] второй гармоники на сантиметровых волнах.

В заключение авторы пользуются случаем выразить искреннюю признательность начальнику Высокотемпературной базы ГАИШ Е. А. Макаровой и поблагодарить В. С. Троицкого за постоянное внимание к работе и полезную дискуссию, а также Е. К. Олонова и П. В. Шобырева, принимавших участие в измерениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Д. Кротиков, В. С. Троицкий, УФН, 81, вып. 4, 589 (1963).
2. В. С. Троицкий, Астрон. ж., 39, 73, (1962).
3. Л. И. Федосеев, Д. М. Козицын, Приборы и техника эксперимента, № 1, 125 (1967).

* Эти измерения были выполнены К. А. Горониной и Р. К. Беловым.

- 4 А. Г. Кисляков, Изв. высш. уч. зав.—Радиофизика, **4**, № 3, 433 (1961).
- 5 Л. М. Кукин, Л. В. Лубяко, Л. И. Федосеев, Изв. высш. уч. зав.—Радиофизика, **10**, № 6, 747 (1967)
- 6 А. Г. Кисляков, Изв. высш. уч. зав.—Радиофизика, **9**, № 3, 451 (1966)
- 7 Приложение № 2 к временной стандартной атмосфере 1960 г. (BCA-60), изд. ЦАГИ, 1962.
- 8 Л. И. Федосеев, Л. В. Лубяко, Л. М. Кукин, Астрон. ж., **44**, № 6, 1191 (1967).
- 9 В. Д. Кротиков, Изв. высш. уч. зав.—Радиофизика, **8**, № 3, 453 (1965).
- 10 С. А. Каменская, А. Г. Кисляков, В. Д. Кротиков, А. И. Наумов, В. Н. Никонов, В. А. Порфирьев, В. М. Плечков, К. М. Стрежнева, В. С. Троицкий, Л. И. Федосеев, Л. В. Лубяко, Э. П. Сорокина, Изв. высш. уч. зав.—Радиофизика, **8**, № 2, 219 (1965).
- 11 В. С. Троицкий, Астрон. ж., **42**, № 6, 1296 (1965)
- 12 Н. Г. Ярославский, УФН, **62**, вып. 2, 159 (1957).
- 13 В. С. Троицкий, Изв. высш. уч. зав.—Радиофизика, **10**, № 8, 1051 (1967).
- 14 Т. Н. Алешина, А. В. Буров, В. С. Троицкий, Изв. комиссии по физике планет (в печати).
- 15 F. J. Low, A. W. Davidson, *Astrophys. J.*, **142**, № 3, 1278 (1965).
- 16 Л. И. Федосеев, Изв. высш. уч. зав.—Радиофизика, **6**, № 4, 655 (1963).
- 17 А. И. Наумов, Изв. высш. уч. зав.—Радиофизика, **6**, № 4, 848 (1963).
- 18 А. И. Наумов, А. Г. Кисляков, Изв. высш. уч. зав.—Радиофизика (в печати).
- 19 C. W. Tolbert, G. T. Coats, Report № 7—24. Electrical Engineering Research Laboratory. The University of Texas. Austin, Texas, 1963.
- 20 B. Gary, J. Stacey, F. D. Drake, *Astrophys. J.*, **143**, suppl. № 108, v. XII (1966).
- 21 А. Г. Кисляков, А. Е. Саломонович, Изв. высш. уч. зав.—Радиофизика, **6**, № 3, 431 (1963).
- 22 А. Г. Кисляков, В. М. Плечков, Изв. высш. уч. зав.—Радиофизика, **7**, 46, № 1, (1964).
- 23 А. Е. Саломонович, Астрон. ж., **35**, 129 (1958).
- 24 А. Е. Саломонович, Б. Я. Лосовский, Астрон. ж., **39**, 1074 (1962).
- 25 I. E. Gibson, *Proc. IRE*, **46**, 280 (1958).
- 26 J. M. Morgan, D. H. Staelin, *Astron. J.*, **71**, № 9, 865 (1966).

Научно-исследовательский радиофизический институт
при Горьковском университете

Поступила в редакцию
24 апреля 1967 г.

RADIO EMISSION OF THE MOON IN MILLIMETER AND SUBMILLIMETER RANGES

L. I. Fedoseev, L. V. Loubyako, L. M. Koukin

The methods and measurement results of radio emission of the Moon at 0.87, 1.06, 1.26 and 1.45 mm wavelengths are described. The comparison is made with the data of the other measurements in millimeter range and with the theory of the homogeneous model of the Moon.