

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ВАРИАЦИИ ЛУННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА ВОЛНАХ 1.35—3.9 СМ НА РАТАН-600

М. Н. Наугольная, Н. С. Соболева

По наблюдению собственного радиоизлучения Луны с большой чувствительностью и высоким одномерным разрешением на волнах 1.35, 2.08, 3.9 см уточнена частотная зависимость параметров первой гармоники изменения радиотемпературы Луны с фазой. Впервые на сантиметровых волнах надежно зарегистрирована вторая гармоника. Впервые проведен анализ наиболее очевидных четких деталей, по которым удалось проследить зависимость яркости от фазы Луны. Обнаружены также мелкомасштабные неоднородности на лунной поверхности размером 20"—67.5".

The frequency dependence of the mean parameters of the first harmonic of the Moon's radiotemperature variation with phase was refined on the base of high sensitivity and resolution observations at 1.35, 2.08 and 3.9 cm wavelengths. The second harmonic was also reliably detected. For some isolated regions with different properties the variations of temperature with phase were obtained and analyzed. Small temperature inhomogeneities with the sizes from 20" up to 67.5" on the Moon's surface were discovered.

Как известно [1, 2], наиболее удобной формой задания зависимости температуры поверхности Луны от условий освещения Солнцем в точке с координатами ψ_{ζ} — долгота и φ — широта является ряд Фурье в виде

$$T(0, \varphi, \psi_{\zeta}, t) = T_0(\varphi) + \sum_{n=1}^{\infty} T_n(\varphi) \cos(n\omega_{\zeta}t - n\psi), \quad (1)$$

где $n\psi$ — сдвиг по фазе для n -й гармоники изменения поверхностной температуры по отношению к фазе падающего потока.

На рис. 1 изображена лунная сфера в предположении, что плоскость эклиптики, лунной орбиты и лунного экватора совпадают, а либрация Луны отсутствует.

Найдем решение уравнения теплопроводности, определяющего изменение температуры с глубиной (y):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \quad (2)$$

где χ — температуропроводность, равная $k/\rho c_v$; ρ — плотность внешнего слоя Луны, k — его теплопроводность; c_v — его теплоемкость.

Тогда

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right). \quad (3)$$

При граничных условиях

$$\begin{aligned} k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} &= \eta_1 \sigma_0 T^4 - A_0 \eta_2 \cos z \text{ для } |t| < 1/4 \tau_{\zeta}; \\ k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} &= \eta_1 \sigma_0 T^4 \text{ для } \frac{1}{4} \tau_{\zeta} < t < \frac{3}{4} \tau_{\zeta}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\cos z = \cos \varphi \cos(\omega_{\zeta}t - \psi_{\zeta})$ (рис. 1); $\tau_{\zeta} = 2\pi/\omega_{\zeta} = 4.26 \cdot 10^4$ мин — период лунации; $A_0 = 2$ кал/(см²·мин) — солнечная постоянная; σ_0 — постоянная Стеффана—Больцмана; η_1 — излучательная способность вблизи максимума соб-

ственного излучения Луны; η_2 — излучательная способность в диапазоне волн падающего светового потока.

В простейшем случае рассчитывают температуру однослойной (однородной) модели лунной поверхности, полагая, что k , ρ , c_p не зависят от глубины и от температуры.

Обозначим $\xi = y/\lambda_m$, где

$$\lambda_m = 2\sqrt{\pi\chi\tau_\zeta} \quad (5)$$

— длина тепловой волны. Тогда уравнение теплопроводности и выражение для теплового потока принимают вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = (4\pi\tau_\zeta)^{-1} \frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2};$$

$$k \frac{\partial T}{\partial t} (4\pi\tau_\zeta)^{-1} (k/\rho c_p)^{1/2} \frac{\partial T}{\partial \xi}. \quad (6)$$

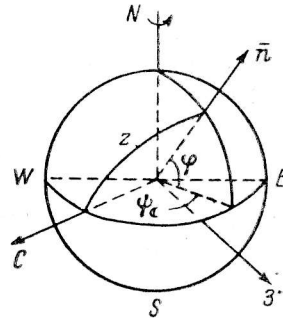
Отсюда видно, что распределение температуры $T(\xi, \psi_\zeta \varphi t)$ по глубине, выраженное в единицах глубины проникновения тепловой волны (l_m), зависит от параметра $(k/\rho c_p)^{1/2}$.

Параметры η_1 и η_2 мало отличаются от единицы. Таким образом, температура на поверхности $T(0, \psi_\zeta, \varphi, t)$ при данном периоде вращения и известном значении солнечной постоянной определяется лишь параметром

$$\gamma^{-1} = (k\rho c_p)^{1/2}, \quad (7)$$

Рис. 1. К теории теплового режима Луны.

\bar{n} — нормаль к поверхности в точке с селенографическими координатами (ψ_ζ — долгота, φ — широта); C — направление на Солнце, перемещающееся в плоскости лунного экватора с востока на запад; Z — направление на Землю, служит началом отсчета долготы (ψ_ζ — положительная к востоку); z — зенитный угол Солнца.



который называется параметром тепловой инерции. Чем больше величина этого параметра, тем меньше разность температуры при заходе и восходе Солнца.

Величина γ составляет для сплошных земных горных пород около 20, для пемзы, гравия, песка — 100—200, для порошков в вакууме — около 1000 [3].

Распределение температуры по глубине при граничном условии (1) будет [2]

$$T(y\psi_\zeta \varphi t) = T_0(\varphi) + \sum_{n=1}^{\infty} T_n(\varphi) e^{-y\sqrt{n\omega_\zeta/2\chi}} \cos(n\omega_\zeta t - n\psi - y\sqrt{n\omega_\zeta/2\chi}). \quad (8)$$

Решение (8) состоит из суммы постоянной составляющей $T_0(\varphi)$, которая не зависит от глубины, и переменных составляющих. Амплитуды высших гармоник быстро затухают с ростом глубины по экспоненциальному закону

$$l_m^{(n)} = \sqrt{2\chi/n\omega_\zeta}. \quad (9)$$

Для первой гармоники

$$l_m = \sqrt{2\chi/\omega_\zeta} = \sqrt{2\chi/\rho c_p \omega_\zeta}, \quad (10)$$

величина l_m характеризует толщину слоя, прогреваемого Солнцем в течение лунного дня. На этой глубине амплитуда колебаний убывает в e раз по сравнению со значением на поверхности.

Из сравнения (5) и (10) получаем длину тепловой волны

$$\lambda_m = 2\pi l_m. \quad (11)$$

Колебания температуры на глубине y для первой гармоники запаздывают по фазе относительно температуры поверхности на угол

$$\psi_1 = y\sqrt{\omega_\zeta/2\chi}. \quad (12)$$

Теория радиоизлучения Луны связывает наблюдаемые характеристики с тепловым режимом поверхности Луны, ее теплопроводностью, электропроводностью и диэлектрической постоянной. Впервые теория радиоизлучения Луны дана Педдингтоном и Минеттом в 1949 г. [4], а детальное рассмотрение выполнено В. С. Троицким [5].

Радиофизические методы измеряют поток радиоизлучения из поверхностного слоя Луны. Интенсивность излучения I при прохождении слоя вещества толщиной y убывает экспоненциально [6]:

$$I = I_0 e^{-\eta y}, \quad (13)$$

где η — коэффициент поглощения, зависит от длины волны.

Толщина эффективно излучающего слоя

$$l_0(\lambda) = \frac{1}{\eta(\lambda)} \quad (14)$$

называется глубиной проникновения электромагнитной волны.

В рассматриваемой нами области частот ν диэлектрическая проницаемость ξ будет [7]

$$\xi(\nu) = \xi'(\nu) + i\xi''(\nu) = \xi + i \frac{2\pi\sigma(\nu)}{\nu}, \quad (15)$$

где ξ — статическая диэлектрическая проницаемость; $\sigma(\nu)$ — эффективная электропроводность.

Угол диэлектрических потерь Δ равен

$$\Delta = \text{arctg} \frac{\xi''(\nu)}{\xi'(\nu)} = \text{arctg} \frac{2\pi\sigma(\nu)}{\xi\nu}. \quad (16)$$

Для земных диэлектриков $\text{tg} \Delta \ll 1$ не зависит от частоты.

Коэффициент поглощения [8]

$$\eta(\lambda) = \frac{4\pi\sigma(\nu)}{c\sqrt{\xi}} = \frac{2\pi\nu\sqrt{\xi} \text{tg} \Delta}{\lambda}. \quad (17)$$

Подставим (17) в (14):

$$l_0(\lambda) = L\lambda, \quad (18)$$

где

$$L = \frac{1}{2\pi\nu\sqrt{\xi} \text{tg} \Delta}. \quad (19)$$

Более длинные радиоволны приходят с больших глубин. Для абсолютно черного тела спектральная плотность потока энергии при условии $h\nu \ll kT$, которое хорошо соблюдается для радиоизлучения Луны, определяется формулой Релея—Джинса [6]:

$$e(\nu T) = \frac{kT}{\lambda^2}, \quad (20)$$

где k — постоянная Больцмана; h — постоянная Планка.

Так как Луна не является абсолютно черной в радиодиапазоне, интенсивность излучения в данной точке характеризуется эффективной или яркостной температурой $T_0(\psi, \varphi)$, т. е.

$$e(\nu T) = \frac{kT_0(\psi, \varphi)}{\lambda^2}. \quad (21)$$

С другой стороны, используя закон Кирхгоффа, плотность потока можно представить [2, 9, 4] в виде

$$e(\nu T) = [1 - R(\mathbf{a}')] \int_0^\infty \frac{kT}{\lambda^2} \eta e^{-\eta y \sec a'} \sec a' dy, \quad (22)$$

где $T(y\psi_{\zeta}t)$ — температура на глубине y в момент t ; $R(\nu a')$ — коэффициент отражения; a' — угол падения на поверхность Луны; a'' — угол преломления. Причем

$$\cos a' = \frac{1}{\sqrt{\xi}} \sqrt{\xi - \sin^2 a''}. \quad (23)$$

Приравнивая (21) и (22), найдем связь эффективной (яркостной) и фактической температуры:

$$T_0(\varphi\psi_{\zeta}t) = [1 - R(\nu a'')] \int_0^{\infty} T(y\psi_{\zeta}t) \eta \sec a' e^{-\eta y \sec a'} dy. \quad (24)$$

Соотношение (24) лежит в основе теории радиоизлучения Луны [2]. Оно позволяет сравнивать экспериментальные значения $T_0(\varphi\psi_{\zeta}t)$ с теоретическими для той или иной модели.

Подставив (8) в (24), получим

$$T_0(\varphi\psi_{\zeta}t) = [1 - R(a'')] T_0(\varphi) + [1 - R(a'')] \times \\ \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{T_n(\varphi) \cos(n\omega_{\zeta}t - n\psi - \psi_n)}{\sqrt{1 + 2\delta_n \cos a' + 2\delta_n^2 \cos^2 a'}}; \quad (25)$$

где

$$\delta_n = \frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{n\omega_{\zeta}}{2\chi}} = \frac{l_0}{l_m^{(n)}} \quad (26)$$

— отношение глубины проникновения электромагнитной волны к глубине проникновения n -й гармоники тепловой волны; ψ_n — сдвиг фазы n -й гармоники радиотемпературы относительно оптической фазы:

$$\operatorname{tg} \psi_n = \frac{\delta_n \cos a'}{1 + \delta_n \cos a'}. \quad (27)$$

Таким образом, особенности радиоизлучения каждой модели определялись параметром δ , который зависит как от электрических, так и от тепловых свойств лунных пород. При $\delta \rightarrow \infty$ радиоволны приходят с больших глубин и амплитуда колебаний радиотемпературы стремится к нулю.

При наблюдении радиоизлучения Луны измеряется некоторая усредненная по диаграмме направленности F радиотемпература T_F , которая связана с T_0 соотношением

$$T_F = \frac{\int_{\omega_{\zeta}} T_0 F d\Omega_{\zeta}}{\int_{\omega_{\zeta}} F d\Omega_{\zeta}}. \quad (28)$$

При наблюдении с узкой диаграммой направленности, принимающей излучение в телесном угле $\Omega_a \ll \Omega_{\zeta}$,

$$T_F = T_0. \quad (29)$$

Все приведенные до сих пор формулы справедливы для однослойной модели, т. е. когда вещество, образующее покров Луны, однородно в глубину. Еще Ниддингтон и Миннет [4] при объяснении фазового хода $\lambda = 1.25$ см использовали двухслойную модель.

В случае двухслойной модели предполагается, что верхний «пылевой» слой ($\gamma_1 = 1000$) прозрачен для радиоволн, но ослабляет тепловую волну. Тогда соотношение (25) для однородной модели справедливо и для двухслойной, если вместо амплитуды гармоник температуры на поверхности в него подставить их значение на нижней границе «пылевого» слоя. Тогда, например, радиотемпература для центра диска с учетом первой гармоники [10] будет

$$T_s(00t) = (1 - R_{\perp}) T_0(0) + (1 - R_{\perp}) \frac{T_1}{m \sqrt{1 + 2\delta + 2\delta_s^2}} \cos(\omega_{\text{с}} t - \psi_s - \psi_1), \quad (30)$$

где

$$m = \sqrt{1 + 2\delta + 2\delta_s^2} \quad (31)$$

— дополнительное ослабление тепловой волны;

$$\psi_s = \text{arctg} \frac{\delta_s}{1 + \delta_s} \quad (32)$$

— дополнительный сдвиг фазы;

$$\delta_s = \frac{k}{k_1} = \frac{\Delta y}{l_m}; \quad (33)$$

k и k_1 — теплопроводность нижнего и верхнего слоев; Δy — толщина «пылевого» слоя.

Так как радиотелескоп РАТАН-600 на коротких волнах имеет сравнительно узкую диаграмму направленности и довольно высокую чувствительность, была поставлена задача: получить по крайней мере для отдельных областей экваториальной части видимой полусферы Луны фазовый ход радиотемпературы и выделить отклонение его от некоторого эффективного значения [11].

Наблюдения. Наблюдения на РАТАН-600 проводились на волнах 1.35, 2.08, 3.9, 8.2, 13, 31.3 см. Узкие диаграммы направленности на $\lambda = 1.35$ см ($5'' \times 40'' \text{ cosec } h$), на $\lambda = 2.08$ см ($10'' \times 60'' \text{ cosec } h$), на $\lambda = 3.9$ см ($20'' \times 120'' \text{ cosec } h$) позволили получить зависимость эффективной температуры от фазы для отдельных малых областей поверхности Луны и сравнить эти зависимости между собой. Ниже мы приводим результаты наблюдений, полученные с декабря 1979 г. по февраль 1980 г. с хорошим качеством записи на самой короткой волне (1.35 см).

На рис. 2 представлены кривые распределения антенной температуры (в относительных единицах) на $\lambda = 1.35$ см в узкой полосе лунной поверхности (шириной около $40'' \approx 30$ км), проходящей через видимый центр диска. Кривые расположены в порядке возрастания селеноцентрической долготы Солнца. В правой и левой частях рисунка приведены даты наблюдений и картинка, иллюстрирующая затененность лунного диска в зависимости от условий освещенности солнцем (неосвещенная часть Луны заштрихована).

Кривые, полученные по двум лунациям, хорошо повторяют друг друга даже в отдельных деталях (рис. 3). Такая повторяемость особенно хорошо прослеживается на $\lambda = 1.35$ см. Она наблюдается и на $\lambda = 2.08$ см, хотя и менее выражена. Для сравнения деталей распределения T_a на разных волнах при одной фазе Луны на рис. 3 представлены кривые прохождения 27.12.79 и 25.01.80 на волнах 1.35, 2.08, 3.9 см. Из этого рисунка следует, что наблюдается коррелирование вариаций T_a отдельных деталей на $\lambda = 1.35$ см и на $\lambda = 2.08$ см. На $\lambda = 3.9$ см отдельные мелкие детали уже не видны, в основном из-за усредняющего действия диаграммы направленности.

Ниже мы покажем, как из полученных данных по распределению радиояркости на $\lambda = 1.35, 2.08, 3.9$ см можно найти средние эффективные характеристики лунной поверхности, и свяжем их с теорией [1, 2] радиоизлучения Луны.

Эффективные характеристики лунной поверхности. Наблюдения на РАТАН-600 не имеют абсолютной привязки. На каждое наблюдение элементы основной поверхности устанавливаются в новое положение с некоторой небольшой погрешностью. Вторичный отражатель также перемещают в новое положение со своей погрешностью. Кроме того, в течение лунации высоты Луны значительно меняются, а антенна имеет разные параметры на разных высотах. Все это вместе затрудняет абсолютную привязку. Для связи данных, полученных в разные дни, а тем более в разные лунации, мы перепробовали несколько методов: пытались связать наши наблюдения с фазовыми кривыми, полученными горьковскими радиоастрономами [5] для центра лунного диска, использовали штатные калибровки и т. д. В результате мы остановились на следующем

варианте. Сначала из кривых прохождения был выделен и удален рассеянный фон (так называемая подложка [13]), связанный с небольшими погрешностями в положении отражающих элементов. Потом все кривые были переведены в антенные температуры с учетом штатных калибровок. В связи с тем что вертикальная диаграмма направленности достаточно узкая на волнах 1.35 и 2.08 см, каж-

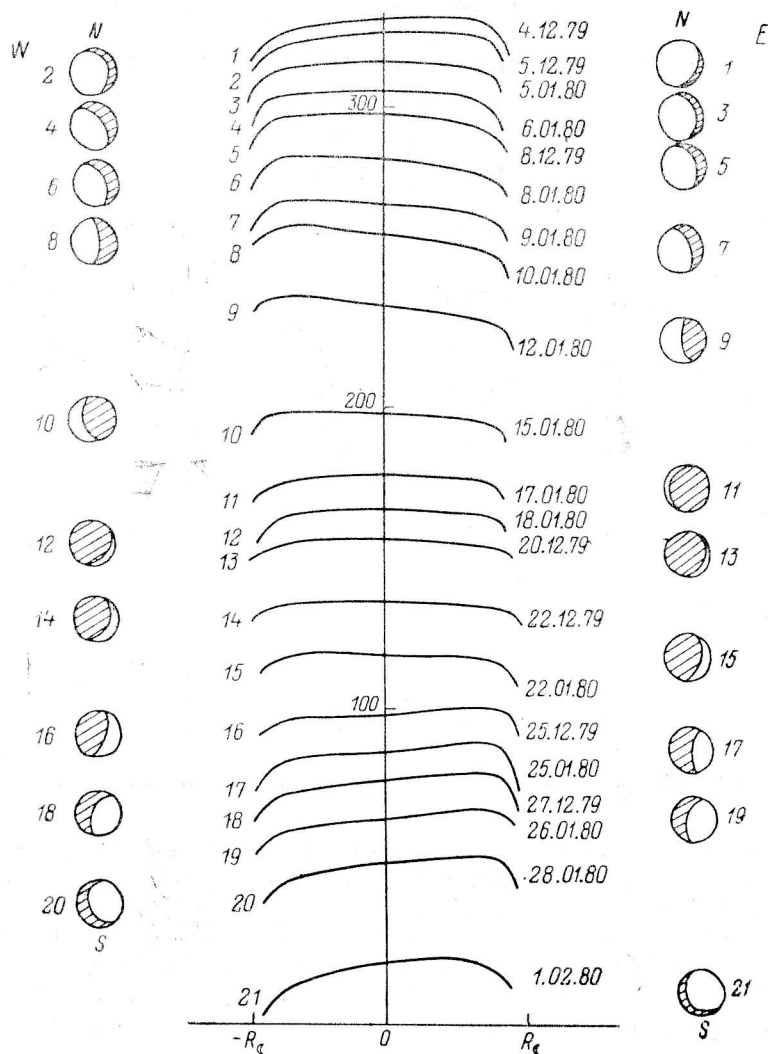


Рис. 2. Кривые распределения T_a , отн. ед., по диску Луны на $\lambda=1.35$ см в порядке возрастания селеноцентрической долготы Солнца.

дой точке кривой прохождения на этих волнах можно приписать определенное значение оптической фазы (угол между направлением на Солнце и на Земле). Затем была построена зависимость антенной температуры от оптической фазы по каждой из кривых прохождения (причем рассматривались участки $\pm 50^\circ$ по долготе от видимого центра Луны).

Основным предположением, из которого мы исходили при связи кривых прохождения, полученных в разные дни, было предположение об изотропности свойств Луны и периодичности изменений радиотемпературы любой ее точки. Иными словами, мы полагали в первом приближении, что лунная поверхность однородна и обладает некоторыми средними эффективными свойствами, и зависимость антенной радиотемпературы от фазы имеет вид

$$T_a = T_0 + T_1 \cos(\Phi - \psi_1) + T_2 \cos(2\Phi - \psi_2) + \dots \quad (34)$$

с одинаковыми константами T_i и Φ_i для любой точки поверхности. Поэтому в точках с некоторой фазой Φ_i во все дни наблюдений T_a одинакова.

Для совмещения кривых прохождения на волнах 1.35 и 2.08 см за два соседние дня i и $i+1$ значения антенных температур T_{a_i} и $T_{a_{i+1}}$ на каждой λ в эти два дня сравнивались при одинаковых значениях фазы Φ_j :

$$T_{a_i}(\Phi_j)/T_{a_{i+1}}(\Phi_j) = \alpha_{(i+1), j}. \quad (35)$$

Затем значения α_{i+1} осреднялись по индексу j (при различных значениях фазы):

$$\bar{\alpha}_{i+1} = \frac{\sum_j^n \alpha_{(i+1), j}}{n}, \quad (36)$$

где n — число одинаковых фаз в i -й и $(i+1)$ -й день, использованных при расчете

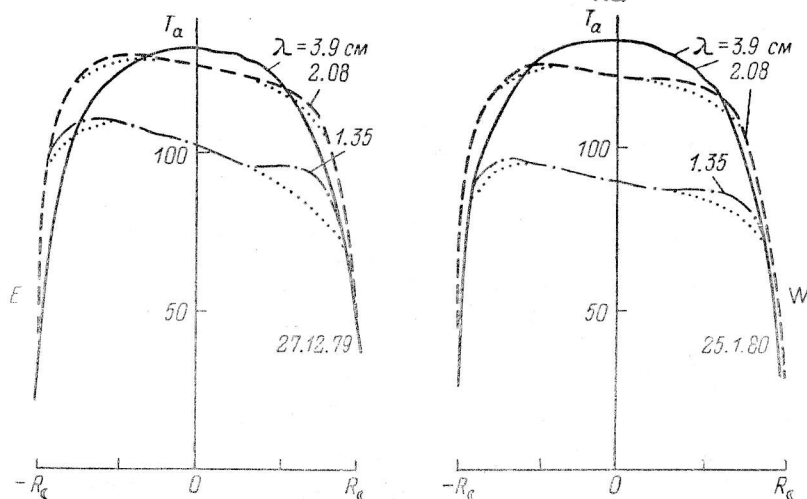


Рис. 3. Две серии одномерных кривых распределения антенной температуры по диску Луны.

Антенные температуры во всех точках во второй день $(i+1)$ умножались на $\bar{\alpha}_{i+1}$. После чего кривые прохождения в i -й и $(i+1)$ -й день наносились на общий график зависимости T_a от фазы.

Для примера в табл. 1 приведены значения антенных температур на $\lambda = 1.35$ см для соседних дней i (5.01.80) и $(i+1)$ (6.01.80) в зависимости от значения фазы Φ_i , там же посчитаны значения $\alpha_{(i+1), j}$ и $\bar{\alpha}_{(i+1), j}$, а также приведены значения $T_{a_{i+1}} \bar{\alpha}_{i+1}$ (при $\bar{\alpha}_{i+1} = 0.876$). Полученные результаты иллюстрирует рис. 4.

Аналогичные процедуры производились со всеми используемыми днями наблюдений. В результате мы получили кривую (рис. 5, а), показывающую изменение антенной температуры в течение лунации (0° соответствует полнолу-

ТАБЛИЦА 1

Угол фазы	T_{a_i}	$T_{a_{i+1}}$	$\alpha_{(i+1), j}$	$T_{a_{i+1}} \bar{\alpha}_{i+1}$
0	100.6	116.0	0.867	103.0
10	102.2	118.0	0.867	103.3
20	103.3	119.0	0.868	104.3
30	103.3	119.5	0.865	104.7
40	103.8	119.5	0.868	104.7
50	103.3	119.0	0.868	104.3
60	102.0	118.3	0.880	103.7
70	99.2	116.0	0.855	103.0
80	95.6	112.0	0.855	98.0

нию, 180° — новолунию, 90 и 270° — квадратурам). Так как кривых прохождения достаточно много, то для определенного значения оптической фазы по-

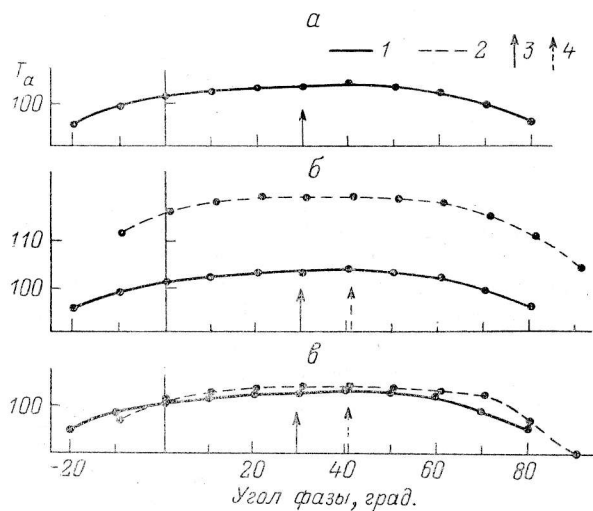


Рис. 4. Образец совмещения кривых прохождения Луны на $\lambda=1.35$ см за два соседних дня в пределах $\pm 50^\circ$ от видимого центра.

1 — i -й день; 2 — $(i+1)$ -й день; положение видимого центра Луны: 3 — 5.01.80, 4 — 6.01.80.

лучается целый набор значений антенной температуры на разных кривых прохождения.

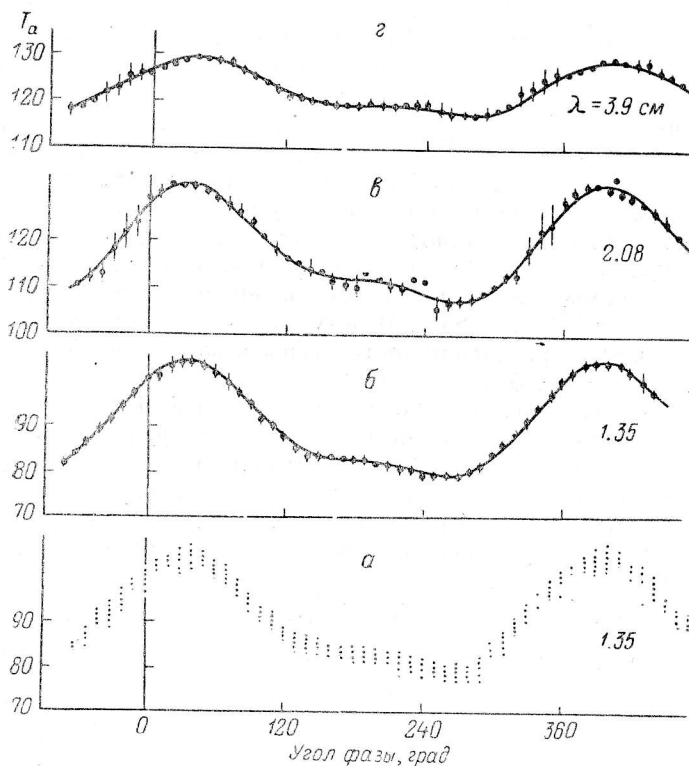


Рис. 5. Кривая изменения антенной температуры поверхности Луны в зависимости от угла оптической фазы.

а — построение фазовой кривой на $\lambda=1.35$ см (отмечены точки через 10° по фазе); средние наблюдаемые фазовые кривые на λ , см: г — 1.35, в — 2.08, б — 3.9.

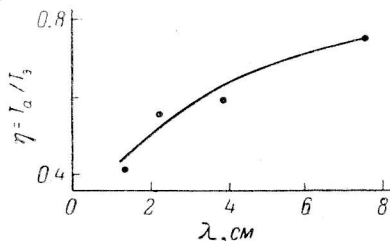
При каждом значении фазового угла (через 10°) были вычислены средние значения антенной температуры T_{a_i} и погрешности ΔT_{a_i} :

$$\bar{T}_{a_i} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n T_n;$$

$$\Delta T_{a_i} = \sqrt{\frac{\sum_n T^2 - \frac{(\sum_n T)^2}{n}}{n-1}}. \quad (37)$$

На рис. 5 показаны полученные зависимости антенной температуры от оптической фазы на $\lambda=1.35$ см (б) и $\lambda=2.08$ см (в).

Полученное из наблюдений распределение антенной температуры в зависимости от угла фазы было разложено в ряд Фурье. Вычисления проводились на микрокалькуляторе Hawlett-Packard-67. Ряд Фурье представлен в виде



$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n \cos \frac{n2\pi t}{T} + B_n \sin \frac{n2\pi t}{T} \right) =$$

$$= \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} T_n \cos \left(\frac{n2\pi t}{T} - \psi_n \right), \quad (38)$$

Рис. 6. Зависимость от длины волны коэффициента перехода от антенной температуры к яркостной для наблюдений на РАТАН-600 на волнах сантиметрового диапазона.

где

$$T_n = (A_n^2 + B_n^2)^{1/2}; \quad \psi_n = \text{arctg} \frac{A_n}{B_n}.$$

Как и следовало ожидать, наши наблюдения хорошо аппроксимируются первыми членами ряда Фурье.

Рассмотренный способ совмещения наблюдений, полученных в разные даты, дал удовлетворительные результаты на коротких волнах. На более длинных волнах из-за стрип-интегрирования распределения яркости по диску Луны постоянная составляющая одномерного распределения антенной температуры испытывает сильное падение к краю диска за счет сглаживания вертикальной диаграммой направленности. После учета этого эффекта на волне 3.9 см был использован тот же самый метод для участков поверхности Луны $\pm 30^\circ$ по долготе, что и на волнах 1.35 и 2.08 см. В результате мы получили кривую изменения антенной температуры поверхности Луны в зависимости от условий освещения на $\lambda=3.9$ см (рис. 5, в).

Наблюдения Луны на волне 3.9 см, так же как и на 1.35 и 2.08 см, довольно хорошо аппроксимируются первыми тремя членами ряда Фурье.

Итак, по наблюдениям на РАТАН-600 мы получили значения антенных температур для амплитуды постоянной части изменения радиотемпературы Луны с фазой и для амплитуд первой и второй гармоник. Для перехода к яркостной (эффективной) температуре воспользуемся соотношением, приведенным, например, в [14]:

$$T_3 = T_a / \eta_\lambda.$$

(В данном случае коэффициент, учитывающий соотношение телесных углов, $\eta_3=1$).

Примем значение амплитуд постоянной части эффективной радиотемпературы Луны на волнах 1.35—3.9 см равным $T_0=214.7$. Эта величина является средней из наблюдений на сантиметровых волнах по сводке данных, собранных Хагфорсом [15, 16]. Тогда коэффициенты пересчета антенной температуры в яркостную для наших наблюдений будут: $\eta_{1.35}=0.415$, $\eta_{2.08}=0.550$, $\eta_{3.9}=0.652$. На рис. 6 приведена кривая изменения коэффициента η_λ в зависимости от длины волны.

В табл. 2 дана амплитуда постоянной части и параметры первых двух гармоник Фурье-разложения эффективной температуры Луны и значения отношений

амплитуд постоянной части к амплитудам гармоник на исследованных нами длинах волн уже в яркостных температурах.

В табл. 2 указаны максимальные пределы измеряемых величин. На $\lambda = 2.08$ см большое значение погрешности объясняется тем, что точность на долготах $\pm 30^\circ$ ухудшается. Возможно, на $\lambda = 2.08$ см, так же как на $\lambda = 3.9$ см, нужно учитывать сглаживающий эффект диаграммы направленности.

На рис. 7 приведены кривые изменения эффективной температуры лунной поверхности в зависимости от угла фазы по наблюдениям на РАТАН-600 на волнах 1.35, 2.08 и 3.9 см, параметры Фурье-разложений для которых даны

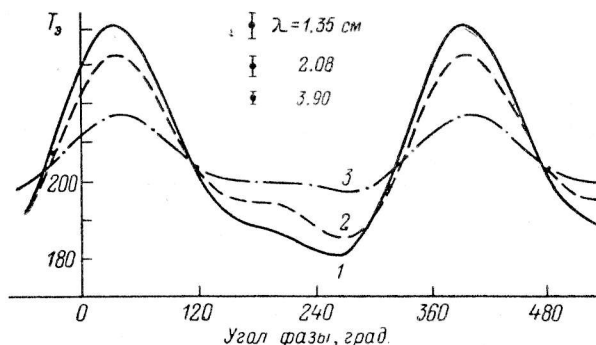


Рис. 7. Изменение температуры лунной поверхности в ходе лунации по наблюдениям на РАТАН-600.

λ , см: 1 — 1.35, 2 — 2.08, 3 — 3.9; значками показано значение среднеквадратичной погрешности.

в табл. 2. В табл. 3 из [17] приведена сводка наблюдений других авторов по изменению постоянной составляющей радиотемпературы и параметров первой гармоники в зависимости от длины волны.

ТАБЛИЦА 2

λ , см	Амплитуда постоянной части T_0	1-я гармоника		2-я гармоника	
		T_1	ψ_1	T_2	ψ_2
1.35	214.69 ± 3.61	27.71 ± 0.48	41 ± 0.2	8.68 ± 0.1	57 ± 0.2
2.08	214.69 ± 2.96	20.68 ± 0.52	47 ± 4.2	8.00 ± 0.3	59 ± 8.1
3.9	214.69 ± 1.67	8.97 ± 0.3	46 ± 5	3.51 ± 0.3	69 ± 4

λ , см	$M_1 = T_0/T_1$	$M_2 = T_0/T_2$	$M_3 = T_1/T_2$
1.35	7.7 ± 0.03	24.5 ± 0.7	3.2 ± 0.1
2.08	10.4 ± 0.2	26.8 ± 1.3	2.6 ± 0.2
3.9	24 ± 1	61.3 ± 6.1	2.6 ± 0.2

Ниже мы сравним данные табл. 3 с наблюдениями на РАТАНе. Как показано в [2], целесообразно рассматривать величины, не зависящие от точности отдельных измерений и излучательной способности Луны. При радионаблюдениях такими параметрами будут, очевидно, сдвиг фазы и относительное изменение эффективной температуры на протяжении лунации.

Характер зависимости угла сдвига фазы ψ_n и отношения постоянной составляющей радиотемпературы к амплитуде первой гармоники M_1 от длины волны определяется структурой поверхности Луны [18]. Теоретическая кривая $M_1(\lambda)$ для двухслойной модели имеет вид

$$M_1(\lambda) = m \frac{T_0(0)}{T_1(0)} \sqrt{1 + 2\delta + 2\delta^2}; \quad (39)$$

$$\delta = n\lambda.$$

ТАБЛИЦА 3

Длина волны, см	Амплитуда постоянной части T_0 , К	1-я гармоника		$M_1 = \frac{T_0}{T_1}$	Ширина диаграммы по половине мощ- ности, мин. дуги
		Амплитуда T_1 , К	Фаза ψ_1 , град.		
0.10 ц*	229	115	18	1.99	3.9
0.13 ц	216	120	16	1.8	10.
0.15 с**	265	145		1.83	5.
0.18 ц	240	115	14	2.09	6
0.32 ц	210	65	10	3.24	9
0.33 ц	196	70	27	2.8	2.9
0.40 с	230	73	24	3.15	25
0.40 ц	228	85	27	2.68	1.6
0.40 с	204	56	23	3.04	36
0.80 ц	197	32	40	6.15	18.
0.80 ц	211	40	30	5.52	2.
0.86 ц	225	45	40	5.	6.
1.18 ц	220	29	48	7.57	3.5
1.25 ц	215	35	45	6.15	23.
1.37 ц	220	24	43	9.16	4.
1.6 с	208	37	30	5.62	44.
1.63 с	224	36	34	6.22	26.
1.63 с	207	32	10	6.47	44.
2.0 ц	190	20	40	9.48	4.
3.15 ц	195	12	44	16.25	9.
3.2 ц	223	17	45	13.15	6.
3.2 с	216	16	15	13.5	40.

* Температура в центре диска.

** Температура средняя по диску.

Здесь, как и раньше, $T_0(0)$ и $T_1(0)$ — значения амплитуды постоянной части радиотемпературы и амплитуды первой гармоника на поверхности Луны; m — ослабление в пылевом слое; δ — отношение глубины проникновения электромагнитной волны к глубине проникновения тепловой волны.

В случае, если поверхность Луны покрыта слоем пыли, дополнительный сдвиг фазы определяется соотношением (32), тогда угол сдвига фазы будет

$$\psi_n = \operatorname{arctg} \frac{\delta}{1 + \delta} + \psi_s. \quad (40)$$

Теоретическая зависимость $\psi(M)$ получается путем исключения из формул (39) и (40) δ и имеет, согласно Троицкому [2], следующий вид:

$$\psi(M) = \operatorname{arctg} \frac{-\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{M}{m} \frac{T_1(0)}{T_0(0)} \right)^2 - 1 \right\}}}{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{M}{m} \frac{T_1(0)}{T_0(0)} \right)^2 - 1 \right\}}}. \quad (41)$$

При $m=1$ ослабления в «пылевом» слое не происходит.

На рис. 8 приведена теоретическая зависимость M_1 [19] в предположении, что на поверхности $T_0(0)/T_1(0)=1.5$. Кривая 1 соответствует однослойной модели ($m=1$, $\psi_s=0$), кривая 2 — двухслойной с $m=1.1$, $\psi_s=5^\circ$. При дальнейшем утолщении слоя пыли, лежащего на поверхности Луны, кривые $\psi(M)$ будут сдвигаться вверх и вправо; так, кривая 3 — для более толстого слоя пыли с $m=1.4$, $\psi_s=15^\circ$.

На этот же рисунок нанесены экспериментальные данные, полученные нами на $\lambda=1.35, 2.08, 3.9$ см, и данные из сводки в табл. 3; последние имеют довольно сильный разброс.

Результаты исследования Луны на РАТАНе сравнительно хорошо ложатся на теоретическую кривую 2 для двухслойной модели лунной поверхности с тонким слоем пыли. Этот результат не противоречит нашим выводам о наличии на Луне тонкого приповерхностного слоя толщиной 4—6 см, плотность которого растет от 0.4 до 1.6 г/см³.

Выводу о существовании тонкого приповерхностного слоя на Луне не противоречит также зависимость $M(\lambda)$ (рис. 9).

Наблюдаемое уменьшение амплитуды фазовой зависимости радиотемпературы Луны с ростом длины волны (на 1.35 см — 13 %, на 2.08 см — 10 %, на 3.9 см — 4 % — значение величины амплитуды первой гармоники от амплитуды постоянной части) вполне естественно с точки зрения радиоизлучения Луны и обусловлено тем, что более глубокие слои, ответственные за излучение на более длинных волнах, меньше охлаждаются лунной ночью и не успевают сильно прогреться в лунный день. Этой же причиной объясняется значительный фазовый сдвиг радиотемпературы Луны от ее инфракрасной температуры.

На рис. 10 приведены теоретические кривые фазового сдвига ψ_1 в зависимости от длины волны, вычисленные по (41) при $m=1.1$, $\psi_s=5^\circ$ и для различных соотношений δ и λ . На этот же рисунок нанесены экспериментальные данные

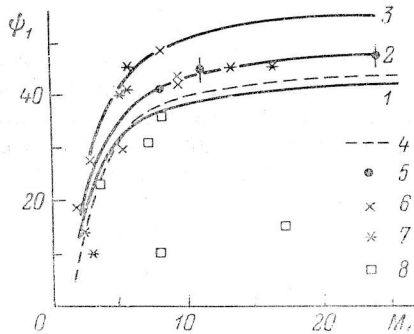


Рис. 8. Зависимость фазы отставания первой гармоники ψ_1 радиотемпературы Луны от отношения постоянной составляющей радиотемпературы к амплитуде первой гармоники $M_1 = T_0/T_1$.

1 — однородная модель ($m=1$, $\psi_s=0$); 2 — двухслойная модель с очень тонким слоем пыли ($m=1.1$, $\psi_s=5^\circ$); 3 — двухслойная модель с утолщенным слоем пыли ($m=1.4$, $\psi_s=15^\circ$); 4 — по теоретическим расчетам из [20]; 5 — наблюдения на РАТАН-600; 6 — данные из табл. 3 с диаграммой меньше 4' по полуширине; 7 — с диаграммой больше 4' по полуширине; 8 — средние по диску наблюдения, пересчитанные при помощи преобразования изменения яркости по диску, согласно [15].

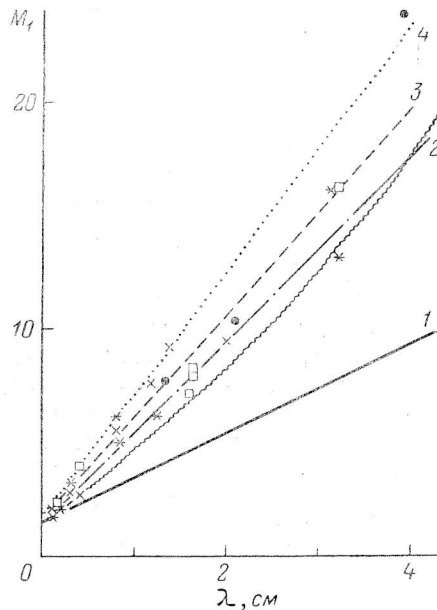


Рис. 9. Зависимость отношения $M_1 = T_0/T_1$ от длины волны.

1 — однородная модель ($m=1$, $\delta=\lambda$); 2 — однородная модель ($m=1$, $\delta=2\lambda$); 3 — двухслойная модель ($m=1.1$, $\delta=2\lambda$); 4 — двухслойная модель ($m=1.1$, $\delta=2.4\lambda$); 5 — модель по теоретическим расчетам в [20]. Наблюдательные данные обозначены так же, как на рис. 8.

РАТАНа и данные табл. 3. Точность данных табл. 3 равна $\pm(5^\circ-10^\circ)$. Наблюдения на РАТАН-600 имеют большую точность. Они хорошо ложатся на теоретические кривые для неоднородной модели с тонким слоем пыли ($m=1.1$, $\psi_s=5^\circ$).

Вернемся еще раз к рис. 8—10. На них нанесены теоретические кривые из работы [20]. Результаты, полученные на РАТАН-600, на всех рисунках лежат выше этих кривых. Так как теоретические расчеты опирались на экспериментальные результаты, полученные по методу «искусственной Луны» с широкой диаграммой направленности (несколько десятков угловых минут), то, возможно, именно в этом лежит причина отличия наших результатов от расчетов [20]. Согласно работе [15], средняя температура диска связана со средней температурой в центре Луны соотношением $T_{d_0} = b_0 T_{c_0}$, где $0.91 \leq b_0 \leq 0.96$ и зависит от ξ . Амплитуда изменения температуры с лунацией определяется формулой

$$T_{d_1} = b_1^2 T_{c_1}$$

$0.75 \leq b_1 \leq 1.0$ в зависимости от ξ и δ .

Если пересчитать данные наблюдений на РАТАНе с учетом коэффициентов, указанных выше, то экспериментальные точки на всех рис. 8—11 будут ближе к теоретическим кривым Кротикова—Пелюшенко [20].

Выше мы рассматривали значение амплитуды постоянной части радиотемпературы Луны и величины параметров первой гармоники. Так как радиотелескоп РАТАН-600 имеет сравнительно узкую диаграмму направленности и высокую чувствительность на коротких волнах, нам удалось надежно выделить

вторую гармонику и определить ее параметры. До сих пор вторая гармоника наблюдалась только на миллиметровых волнах [21]. На рис. 11 приведены

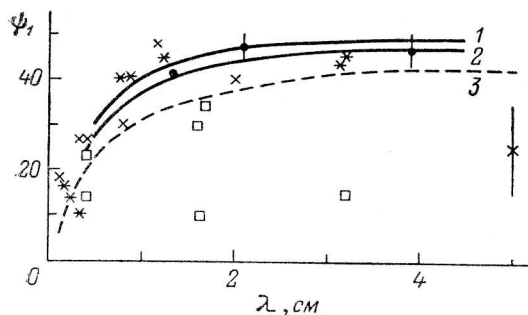


Рис. 10. Фазовый угол изменения температуры Луны в течение лунации в функции длины волны.

Теоретические кривые для $m=1.1$, $\phi_s=5^\circ$; 1 — $\delta=2.4\lambda$; 2 — $\delta=2\lambda$; 3 — по расчетам из [20]. Вертикальные отрезки — максимальная погрешность наблюдений из табл. 3. Обозначения наблюдений те же, что на рис. 8.

теоретические кривые изменения $M_2 = T_0/T_2$ и ϕ_2 в зависимости от длины волны [20]. Здесь же отмечены экспериментальные данные, полученные на РАТАНе, а на рис. 11, а — и на миллиметровых волнах [21]. Значение угла сдвига фаз второй гармоники, по нашим наблюдениям, близко к теоретическим расчетам. Как известно, вторая и более высокие гармоники несут информацию о стратификации лунной поверхности. Из наших наблюдений вторая гармоника затухает медленнее, чем это следует из теории [20]. Это говорит об устойчивой стратификации лунной поверхности.

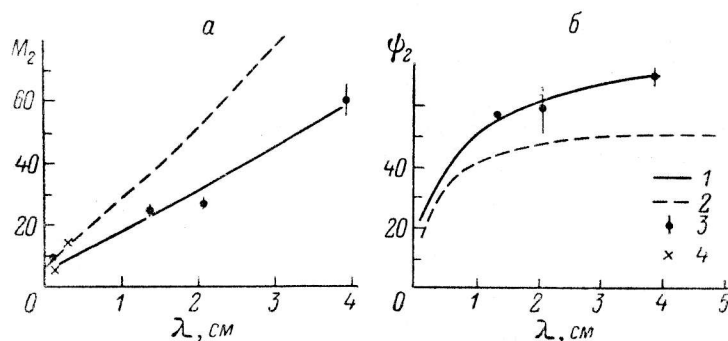


Рис. 11. Значения M_2 (а) и ϕ_2 (б) для второй гармоники изменения радиотемпературы Луны в функции длины волны.

1 — экспериментальные данные; 2 — теоретические расчеты [20]; 3 — наблюдения на РАТАН-600; 4 — наблюдения на мм-волнах [21].

Крупномасштабные неоднородности на поверхности Луны. До сих пор мы говорили о некоторых эффективных значениях параметров лунной поверхности. Однако, как было указано выше, распределение яркости на Луне на коротких волнах неоднородно.

Дисперсия локальных, чисто поверхностных свойств, которая появилась из анализа комплекса оптических, инфракрасных, локационных и, наконец, прямых измерений в нескольких точках [22], вполне могла найти отражение и в характере радиоизлучения. Первые указания на такие различия, полученные с разрешением $(2-6)'$ в миллиметровом диапазоне волн действительно были опубликованы еще в 60-х годах. Коатс [23] при наблюдении Луны на $\lambda=4.3$ мм с диаграммой шириной 6.7 обнаружил при угле фазы 77° увеличение яркости восточной области Луны, расположенной в Море Ясности, Изобилия и Нектара (рис. 12) по сравнению с углом фазы 340° . Из этого наблюдения Коатс сделал вывод, что морские области, видимо, быстрее нагреваются и быстрее остывают,

чем окружающие горные районы. Он отметил, что очень важно повторить исследования на более длинных волнах с большим разрешением. Соломонович [24] по двумерным изображениям Луны на $\lambda=0.8$ см с разрешением $2''$ обратил внимание на отклонение изофот от осевой симметрии и предположил, что это связано с различными свойствами морей и материков. Соломонович, Лосовский, Кисляков [25—28] провели цикл измерений Луны на 4 и 8 мм. Они показали, что на волне 8 мм температура морей выше, чем температура материков на 8 К при любых значениях угла фазы. Таким образом, измерения на волнах 4 и 8 мм прежде всего установили, что моря и материки поверхности Луны имеют несколько различную радиотемпературу, хотя фазовая зависимость этих различий была изучена плохо, а физическая интерпретация неоднозначна.

Для исследования фазовой зависимости радиотемпературы отдельных областей лунной поверхности были выбраны наблюдения за два месяца — с декабря 1979 г. по февраль 1980 г., с хорошим качеством записи Луны на самой короткой волне (1.35 см). На рис. 13 приведено несколько характерных кривых

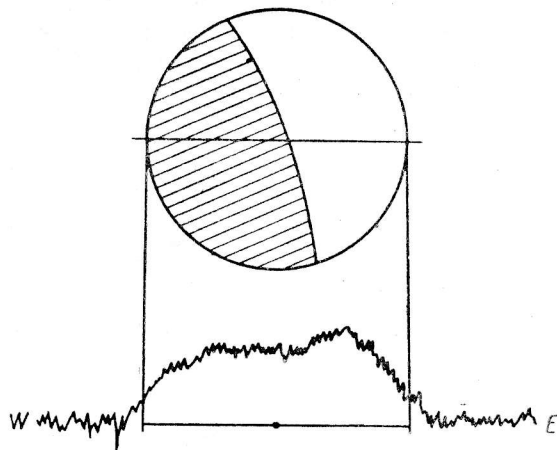


Рис. 12. Увеличение яркости восточной области Луны при угле фазы 77° по наблюдениям Коатса [23].

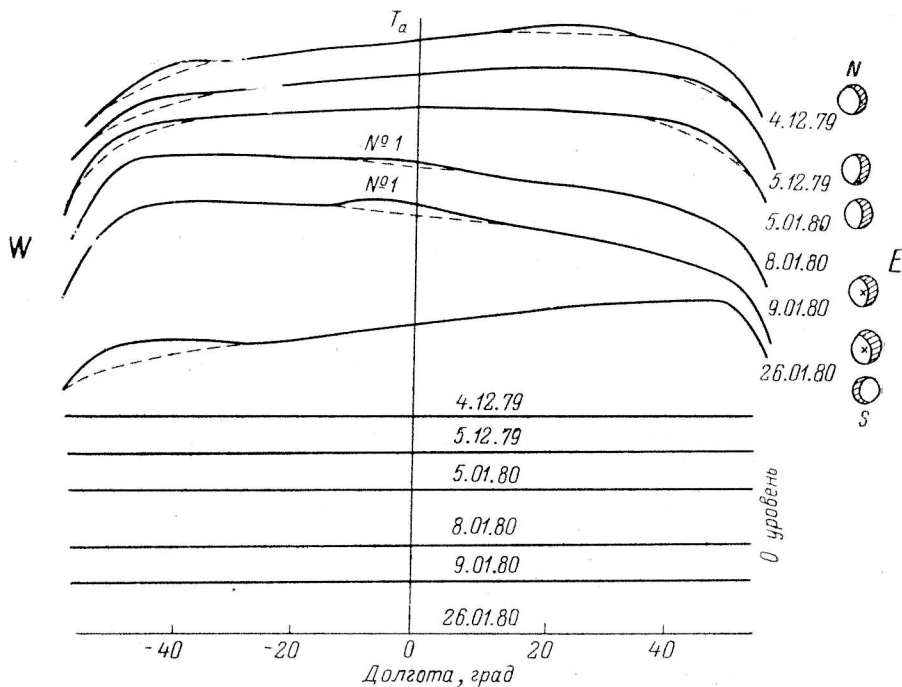


Рис. 13. Ряд характерных кривых Луны на $\lambda=1.35$ см.

Яркость детали № 1 меняется в зависимости от условий освещения.

прохождений на этой волне. Если проследить за каким-то определенным участком Луны в течение всей лунации (например, деталь № 1), то видно, что яркость этого участка меняется в зависимости от условий освещения. Мы не нашли ни одного участка на поверхности Луны, который имел бы более высокую или

более низкую температуру по сравнению с соседними участками при всех значениях оптической фазы.

Если на кривой прохождения учесть эффективный фазовый ход, вычтеть эффективное распределение антенной температуры, то мы найдем отклонение антенной температуры для различных значений оптической фазы.*

Результаты такого вычитания для 21 дня наблюдений на $\lambda=1.35$ и 2.08 см приведены на рис. 14.

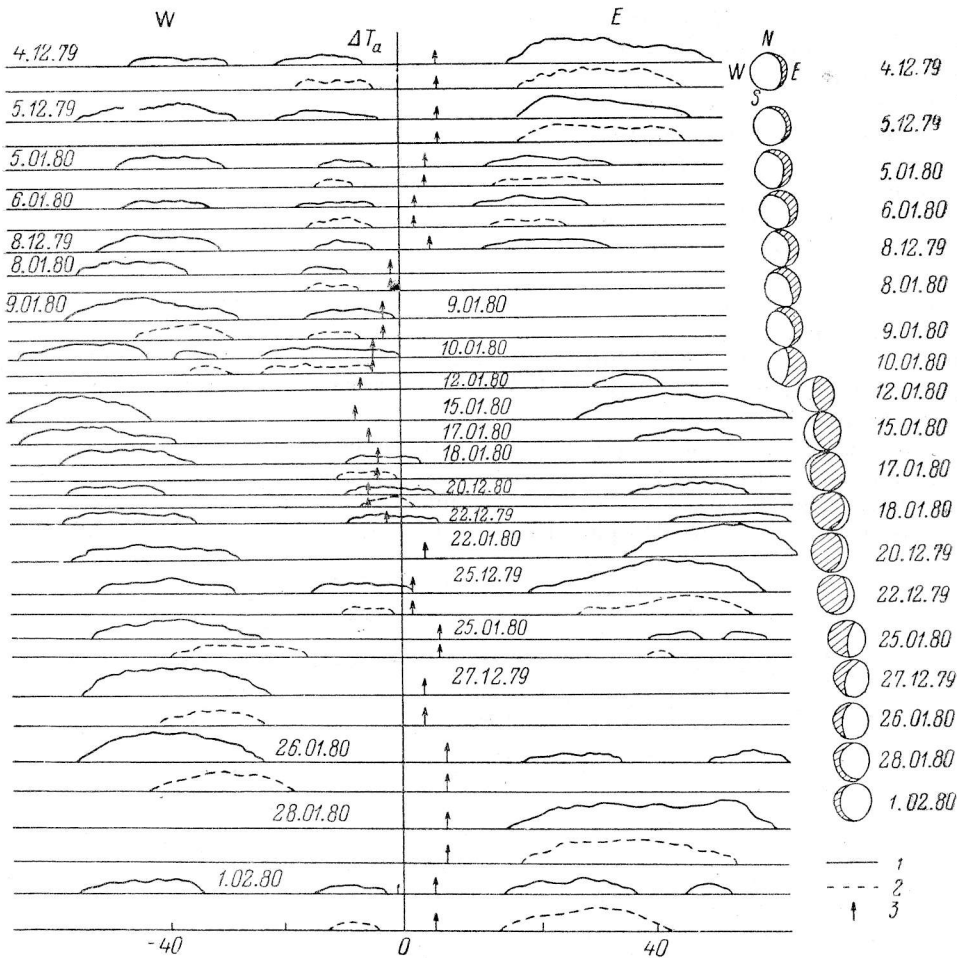


Рис. 14. Отклонение антенной температуры ΔT_a отдельных участков Луны от эффективной температуры для различных значений оптической фазы.

λ , см: 1 — 1.35, 2 — 2.08, 3 — положение видимого центра Луны на момент наблюдения. По вертикальной оси — ΔT_a , по горизонтальной — селеноцентрическая долгота ϕ_s .

Используя рис. 14, а также значения позиционного угла и величины либрации Луны по широте и долоте для каждого дня наблюдений, можно получить локализацию на лунном диске участков поверхности с характеристиками, отличающимися от эффективных. По рис. 14 на $\lambda=1.35$ было выделено пять отдельных участков, расположение которых на поверхности Луны отмечено номерами (рис. 15, а). Считаем, что размеры областей по вертикали не менее полуширины вертикальной диаграммы направленности. На рис. 15, б приведена оптическая карта Луны. Из сравнения рис. 15, а с лунной картой (рис. 15, б) видно, в каких областях лунной поверхности находятся выделенные участки.

* В действительности вместо эффективного фазового хода теоретического распределения радиояркости, соответствующего эффективному фазовому ходу, мы вычитали нижнюю огибающую кривой распределения радиотемпературы.

Площадка I расположена в области с селенографическими координатами $90^{\circ} W-20^{\circ} W$ и $10^{\circ} N-30^{\circ} N$. Она находится в Океане Бурь, в окрестностях лучевого кратера Аристарха. Как известно, Аристарх является наиболее ярким объектом в полнолуние. Он горячее окружающей поверхности на $40^{\circ} C$ при лунном затмении по инфракрасным наблюдениям Саари и Шортхилла [29]. В этой же области расположен небольшой кратер Геродот, где многие наблюдатели неоднократно отмечали различные нестационарные явления [30].

Площадка II ограничена селенографическими координатами $60^{\circ} W-20^{\circ} W$, $3^{\circ} S-12^{\circ} N$ и расположена в Океане Бурь, в районе кратеров Кеплер и Коперник. Согласно [31], район кратера Коперник имеет наиболее позднее происхождение.

Площадка III имеет селенографические координаты $70^{\circ} W-23^{\circ} W$ $3^{\circ} S-30^{\circ} S$. Кроме Океана Бурь она частично находится в Море Познанном и Море Влажности. На ней расположен кратер Гассенди, возникший в результате неразгадан-

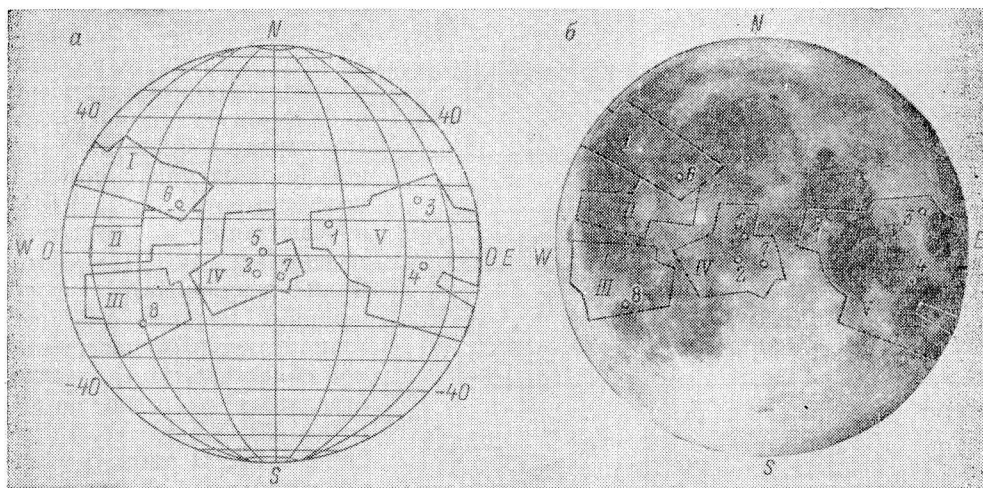


Рис. 15. Области на лунной поверхности, где расположены участки I—V с характеристиками, отличающимися от «эффективных».

а — расположение выделенных участков в системе селенографических координат; б — их местонахождение на карте Луны. Точками отмечены мелкие неоднородности.

ного процесса поднятия и опускания почвы, следствием чего является сложная система складок, прожилков, трещин на его дне [32].

Эти западные области (I—III), расположенные в Океане Бурь, по-видимому, можно рассматривать как единую неоднородность.

Площадка IV находится в центральном районе Луны с селенографическими координатами $20^{\circ} W-10^{\circ} E$, $10^{\circ} N-15^{\circ} S$. Это области Центрального Залива, края Моря Познанного и Моря Облаков. На краю этой области расположен кратер Фра Мауро, из окрестностей которого ($3.7^{\circ} S$, $17.5^{\circ} W$) «Аполлоном-14» [33] были доставлены образцы пород на Землю.

Площадка V расположена в восточной части Луны, имеет селенографические координаты $10^{\circ} E-90^{\circ} E$, $20^{\circ} S-20^{\circ} N$. Это район Моря Спокойствия, Кризисов, Изобилия, Нектара. Эта площадка примерно совпадает с областью, наблюдавшейся Коатсом [23] (рис. 12).

Таким образом, все пять областей расположены в морских районах с молодыми кратерами.

На волне 2.08 см участки с характеристиками, отличающимися от эффективных, находятся в тех же районах и имеют те же размеры.

На рис. 16 приведены величины T_a в зависимости от оптической фазы Луны для каждой из трех неоднородностей: западной (I+II+III), центральной (IV) и восточной (V) на волнах 1.35 и 2.08 см. Как видно из этого рисунка, увеличение

яркости происходит не только на освещенной части Луны (фазы $290-120^\circ$), но и на темной (фазы $180-270^\circ$) (вторая гармоника разложения Фурье). И так, области с характеристиками, отличающимися от эффективных, видны как на $\lambda=1.35$ см, так и на $\lambda=2.08$ см. (После учета вертикальной диаграммы такие области обнаружены и на волне 3.9 см). Следует отметить, что по наблюдениям на $\lambda=2.08$ см виден только восточный край западной неоднородности, так как большая часть ее находится западнее 40° и не наблюдается на указанной выше волне из-за усредняющего действия диаграммы направленности. По этой же причине мы наблюдаем только западный край восточной неоднородности.

Это видно из рис. 16, а, в и на $\lambda=2.08$ см.

Для каждой области на $\lambda=1.35$ см построена зависимость температуры от условий освещения и, так же как и для эффективной Луны, посчитано разложение в ряд Фурье, наилучшим образом аппроксимирующее наблюдаемую зависимость. Полученные значения антенной температуры с помощью коэффициента $\eta_{1.35} = 0.415$ пересчитаны в яркостную температуру. Параметры Фурье-разложения посчитаны нами не только для восточной, центральной и западной областей Луны, но и для отдельных разрезов по долготам: $20^\circ W$, $30^\circ W$, $45^\circ W$, $25^\circ E$ и 0° . В табл. 4 указаны параметры Фурье-разложения для различных участков Луны. Там же посчитаны средние значения различных величин для восточного, центрального, западного и материкового районов Луны. В предыдущем разделе для параметров Фурье-разложения эффективной Луны указаны максимальные пределы погрешностей.

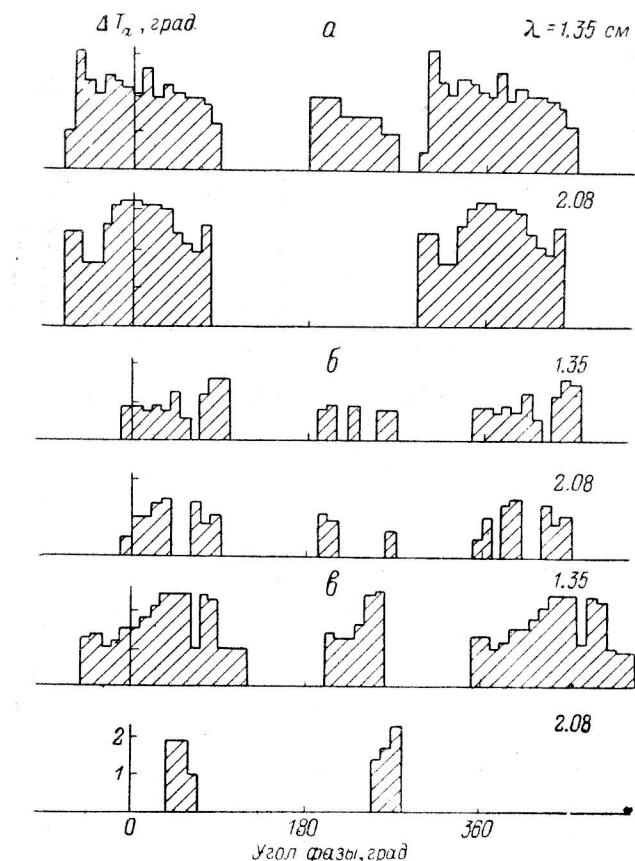


Рис. 16. Величины ΔT_a в зависимости от оптической фазы Луны для каждой из трех неоднородностей.

а — восточная, б — центральная, в — западная.

В табл. 4 приведено значение величины σ , примерно равное $1/3$ от максимального значения погрешности. В скобках приведены величины отклонения в долях σ от эффективных параметров поверхности Луны. В тех случаях, когда значение величины отклонения $\leq 2\sigma$, отличие параметра от эффективного нельзя считать реальным. На рис. 17 для примера приведены кривые изменения температуры Луны в зависимости от условий освещения для $\psi_c = 25^\circ E$ (а) и $\psi_c = 30^\circ W$ (б). Для сравнения на тех же рисунках даны кривые для эффективной Луны.

Из табл. 4 видно, что постоянная часть T_0 Фурье-разложения для всех рассматриваемых областей Луны отличается от T_0 для эффективной Луны не более чем на 2σ , за исключением области в Океане Бурь ($\psi_c = 45^\circ W$). Зато амплитуда и фазы гармоник различаются значительно. Самое большое отличие параметров на волне 1.35 см имеют западные области, расположенные в Океане Бурь. Характеристики материковых участков поверхности близки к эффективным значениям. В табл. 5 приведено отклонение параметров отдельных областей Луны от эффективных параметров в процентах.

ТАБЛИЦА 4

Район Луны	Селенографические координаты	$\text{tg } \Delta/\rho$	T_0
1 Эффективная Л.		0.01409	214.7 \pm 1.2
2 Материковый район VI	5E—10E 10S—10N	0.01437	212.7 (—1.7 σ)*
3	10E 10S—10N	0.01389	216.0 (+1.1 σ)
4 Среднее		0.01413	214.4 (—0.3 σ)
5 Западный район I—III	90W—20W 30N—30S	0.01437	213.9 (—0.7 σ)
6	20W 20N—0	0.01437	216.9 (+1.8 σ)
7	30W 25N—20S	0.01459	216.0 (+1.1 σ)
8	45W 30N—30S	0.01710	209.0 (—4 σ)
9 Среднее		0.01511	214.0 (—0.4 σ)
10 Центральный район IV	20W—20E 10N—15S	0.01350	216.8 (+1.8 σ)
11	0 5N—10S	0.01307	217.2 (+2.1 σ)
12 Среднее		0.01329	217.0 (+2 σ)
13 Восточный район V	10E—90E 20N—20S	0.01437	212.9 (—1.5 σ)
14	25E 10N—15S	0.01482	215.7 (+0.8 σ)
15 Среднее		0.01465	214.3 (—0.3 σ)

* В скобках в долях σ даны отклонения параметров различных областей от эффективных параметров поверхности Луны.

ТАБЛИЦА 4 (продолжение)

1-я гармоника		2-я гармоника				δ
T_1	ψ_1	T_2	ψ_2	M_1	M_2	
27.7 \pm 0.16	41 \pm 0.2	8.7 \pm 0.2	57 \pm 0.7	7.7	24.5	2.8
28.1 (+2 σ)	42.1 (+6 σ)	8.9 (+6 σ)	57.5 (+1 σ)	7.6	24.0	2.7
27.7 (0 σ)	41.7 (+4 σ)	8.4 (—9 σ)	66.1 (+13 σ)	7.8	25.7	2.8
27.9 (+1 σ)	41.9 (+5 σ)	8.6 (—2 σ)	61.8 (+7 σ)	7.7	24.9	
28.1 (+2 σ)	36.1 (—25 σ)	8.9 (+6 σ)	45.8 (—9 σ)	7.6	24.8	2.7
28.6 (+5 σ)	42.9 (+10 σ)	7.4 (—4 σ)	56.0 (—1 σ)	7.6	29.2	2.7
28.7 (+6 σ)	39.7 (—7 σ)	7.5 (—4 σ)	45.9 (—9 σ)	7.5	28.7	2.7
31.8 (+25 σ)	44.9 (+20 σ)	8.9 (+9 σ)	32.0 (+36 σ)	6.6	24.5	1.7
29.0 (+10 σ)	40.9 (—1 σ)	8.2 (—6 σ)	44.9 (—17 σ)	7.3	26.8	
27.1 (—4 σ)	43.3 (+12 σ)	8.4 (—9 σ)	59.2 (+3 σ)	8.0	24.6	2.9
26.4 (—9 σ)	45.2 (+21 σ)	8.0 (—23 σ)	67.8 (+15 σ)	8.2	27.2	3.0
26.8 (—5 σ)	44.3 (+17 σ)	8.2 (—16 σ)	63.5 (+15 σ)	8.1	25.9	
27.8 (+1 σ)	43.8 (+14 σ)	8.7 (—1 σ)	71.4 (+21 σ)	7.6	24.6	2.7
29.1 (+9 σ)	40.4 (—3 σ)	8.8 (—4 σ)	70.8 (+20 σ)	7.4	24.5	2.6
28.5 (+5 σ)	42.1 (+6 σ)	8.8 (—2 σ)	71.1 (+20 σ)	7.6	24.6	

Из табл. 4 и 5 следует, что все рассмотренные районы Луны различны. Больше всего от эффективной Луны на $\lambda=1.35$ см отличаются западные области (Океан Бурь), затем восточные и центральные. Следует отметить, что в экваториальной области лунной поверхности параметры, близкие к эффективным, имеют лишь небольшие участки, расположенные между отмеченными неоднородностями. Например, материковая область к юго-востоку от Центрального Залива, в районе кратера Декарт (9° S, 15.5° E). Образцы пород из этой области были доставлены «Аполлоном-16» [33]. К сожалению, материковые области у полюсов Луны не были нами исследованы. Поэтому пока нельзя сделать окончательного заключения, что все материковые районы имеют параметры, близкие к эффективным.

ТАБЛИЦА 5

Район Луны	$\left(\frac{T_2 - T_1}{T_2}\right)_0$	$\left(\frac{T_2 - T_1}{T_2}\right)_1$	$\left(\frac{\psi_2 - \psi_1}{\psi_2}\right)_1$	$\left(\frac{T_2 - T_1}{T_2}\right)_2$	$\left(\frac{\psi_2 - \psi_1}{\psi_2}\right)_2$
Западный (I—III)	+0.3	—4.7	+0.3	+5.8	+12.5
Центральный (IV)	—1.1	+3.25	—8.0	0	—11.4
Восточный (V)	+0.2	—2.9	—2.7	—1.2	—24.7
Материковый (VI)	+0.1	—0.1	—2.2	—1.2	—8.4

Мелкомасштабные неоднородности на лунной поверхности. С конца прошлого века астрономы сообщали удивительные факты об изменениях на видимой стороне Луны: росли и сокращались темные пятна, появлялась красная окраска, менялся блеск участков размером в несколько километров, иногда и целые «моря» «затуманивались». Сотни случаев быстротечных событий в различных районах видимого полушария Луны не вызывают сомнения. Они собраны Флоренским и Черновым в СССР [34] и Мидлхарст в США и проанализированы Шингаревой [30]. Большинство из этих феноменов связано с кратерами, которые, по мнению геологов, имеют вулканическое происхождение. Одним из таких районов является кратер Альфонс. Здесь впервые Альтер в 1957 г. наблюдал появление вуализующей детали дымки. В ноябре 1958 г. пулковский астроном Козырев выделил в спектре кратера Альфонс линию углерода C_2 [35],

возможно означающую истечение газов. Наблюдения повторились почти через год, в октябре 1959 г. [36]. Температура красной детали (вероятно, лавы), по оценкам Козырева, порядка 1200 К. Через пять лет во время затмения Луны американские астрономы зафиксировали повышение температуры в 80-км кратере Тихо на $100^\circ C$ по сравнению с окружающей местностью. Подобные эффекты наблюдались в кратерах с лучевыми системами: Аристарх, Кеплер, Коперник, Прокл.

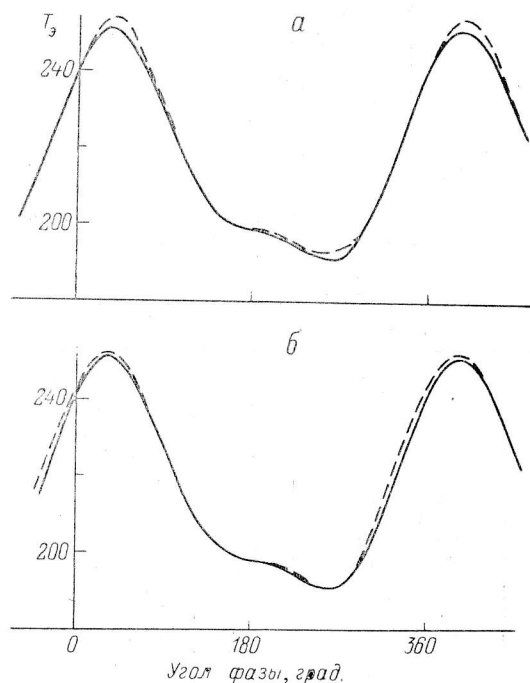


Рис. 17. Изменения яркостной температуры в зависимости от условий освещения.

a — восточная область Луны, район Моря Спокойствия, $\varphi_{\odot} = 25^\circ$; *b* — западная область Луны, район Океана Бурь, $\varphi_{\odot} = -30^\circ$. Для сравнения на обоих рисунках приведена кривая для эффективной Луны (сплошная линия).

По результатам сейсмических наблюдений лунных модулей «Аполлон-12, -14, -15, -16» на Луне обнаружены пояса сейсмичности [37, 38]. Они расположены в районах Луны, где наблюдаются различные быстротечные явления. Известно, что на Земле существует определенная связь между расположением вулканов и распределением сейсмических поясов [39].

По инфракрасным наблюдениям во время затмения Луны (Шортхилл и Саари [29]) многие участки Луны остаются теплее, чем поверхность в целом (это молодые кратеры типа Тихо и некоторые моря) (рис. 18).

По наблюдениям на РАТАНе нами выделены участки с характеристиками, отличающимися от характеристик для эффективной Луны. Помимо крупных неоднородностей при более тщательном изучении полученного материала на волнах 1.35 и 2.08 см на поверхности Луны были обнаружены неоднородности меньшего размера ($20''$ — $70''$). (Они отмечены точками с номером на рис. 15). Сравнивая полученное нами распределение по диску Луны участков с иными характеристиками, чем эффективная Луна, и районов, где расположены мелкие неоднородности, с рис. 18, мы видим, что как те, так и другие неоднородности расположены в морских районах, там, где наблюдались какие-либо указанные выше особенности. Селенографические координаты отмеченных мелких неоднородностей определены по [42] и сведены в табл. 6. Для каждой отдельной неоднородности, наблюдаемой в разные даты, приведены средние координаты и средние размеры.

ТАБЛИЦА 6

Номер	Дата	Начало		Конец		Размеры	
		φ	$\psi_{\text{с}}$	φ	$\psi_{\text{с}}$	сек.	км
1	4.12.79	6N	15E	7N	20E	65	115
	5.12.79						
	1.02.80						
2	20.12.79	5S	8W	4.5S	5W	30	55
	1.02.80						
3	1.02.80	14N	42.5 E	15.5N	49E	26	50
	10.01.80						
4	26.01.80	1S	47E	2S	52.5E	45	80
5	1.02.80	0.5N	5.5W	1.5N	2.5W	37.5	65
6	25.01.80	14.5N	25.5W	12N	20W	45	80
	25.12.79						
7	20.12.79	6.5S	3E	7.5S	6.5E	30	55
8	8.01.80	20S	41W	17S	40W	52.5	95
	9.01.80						
	10.01.80						
	12.01.80						

Рассмотрим более подробно каждую из обнаруженных мелких неоднородностей.

Одной из часто встречающихся мелких неоднородностей является граница между морской областью и областью с эффективными параметрами. Пример не-

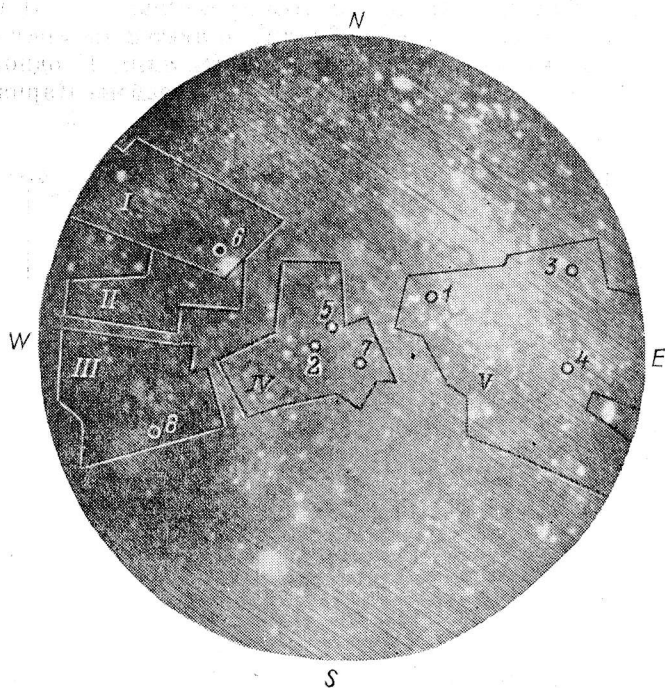


Рис. 18. Светлые пятна, остывающие медленнее остальной поверхности, по инфракрасным изображениям Луны во время затмения [41].

I—V — участки с характеристиками, отличными от эффективной Луны. Точками обозначены мелкие неоднородности по наблюдениям РАТАН-600.

однородности такого типа показан на рис. 19. Неоднородность № 1: 1а (52''5 или 92 км), 1б (90'' или 160 км), 1в (52''5 или 92 км), расположена на границе Море Спокойствия—материк, западнее Моря Паров. Неоднородность № 2 (30'' или 55 км) находится на границе Центрального Залива с материковым районом, малая область № 3: 3а (32'' или 60 км), 3б (20'' или 40 км) — переход от Моря Кризисов к материковой области рядом с Море Спокойствия.

Кроме неоднородностей, имеющих резкий край при переходе от областей с одними свойствами к областям с другими свойствами, на поверхности Луны выделены неоднородности, которые скорее всего связаны со структурой или с физическими свойствами данного участка, и их яркость зависит от фазового угла.

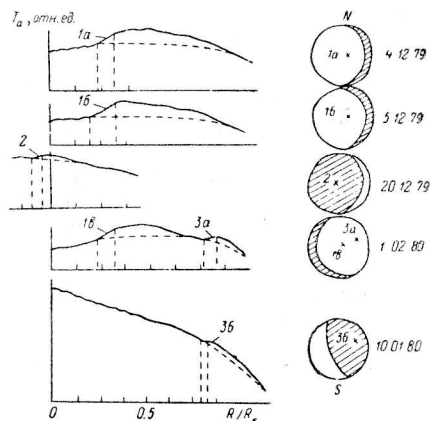


Рис. 19. Резкий край неоднородности при переходе от морских областей к материковым областям по наблюдениям на волне 1.35 см.

Все эти области расположены в кратерных районах Луны (рис. 20). Неоднородность № 4 (45'' или 80 км) — это небольшая кратерная область в Море Изобилия. Неоднородность № 5 (37''5 или 65 км) является материковой областью около Центрального Залива, в районе кратера Местинг. Неоднородность № 6: 6a, 6b (45'' или 80 км) — это кратерная область в районе Карпат и западного

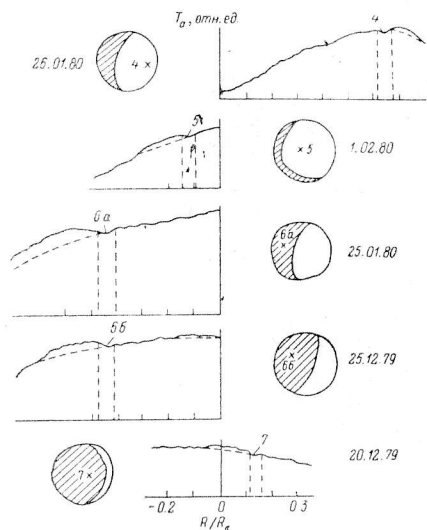


Рис. 20. Мелкие неоднородности по наблюдениям на волне 1.35 см, расположенные в кратерных районах Луны.

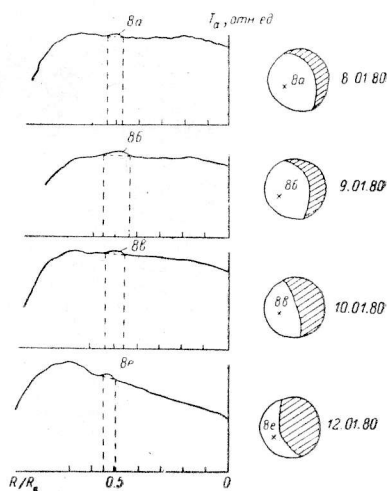


Рис. 21. Неоднородность на поверхности Луны по наблюдениям на волне 1.35 см, расположенная в северной части Моря Влажности, в районе кратера Гассенди.

вала кратера Коперник. Неоднородность № 7 (30'' или 55 км) — это район кратера Гишпарх И Альф Баттани. Неоднородность № 8: 8a (45'' или 80 км), 8b (75'' или 135 км), 8в (52''5 или 95 км) и 8с (37''5 или 70 км) — расположение в районе кратера Гассенди, в Море Влажности. Она наблюдается 8, 9, 10, 12 января 1980 г. (рис. 21).

Обсуждение результатов. Итак, при наблюдении с разрешением выше 1' на уровне 0.2—0.5 % от постоянной составляющей собственного радиоизлучения Луны с чувствительностью выше 50 мК большая часть поверхности Луны оказы-

вается покрытой термическими неоднородностями. Их свойства зависят от условий освещения и селенографических координат. Самые крупные неоднородности $\sim 4'$, в то время как наиболее мелкие — $0,5$.

Как следует из отождествления с оптическими деталями, основные крупные неоднородности в распределении радиояркости связаны с различием радиотемпературного режима материковых и морских участков. Большую часть малых неоднородностей мы относим к границе между ними. В некоторых случаях можно подозревать области вблизи кратеров. Для уверенного отождествления некоторых деталей необходимы дополнительные наблюдения в различных азимутах с повышенной чувствительностью.

Причины различия температурного режима в радиодиапазоне могут быть самые разные. Перечислим основные из них.

1. Чисто геометрические факторы, типа крупных наклонов поверхности смещают моменты максимума инсоляции и вызывают разброс по фазовым сдвигам температурной зависимости в радиодиапазоне.

2. Различие физико-химических свойств участков поверхности. Рассмотрим ряд вариантов:

а) выход близко к поверхности слоев с большой плотностью может резко изменить параметры T_s в различных участках Луны;

б) значительное различие в тепловом потоке из-под поверхностных слоев (вулканизм, радиоактивность) в отдельных областях должно приводить к различиям только в T_0 ;

в) различие в диэлектрической проницаемости может приводить к изменениям T_0 , T_i , ψ_i ;

г) различие химического состава морских и материковых областей также может привести к различиям в T_0 , T_i , ψ_i и т. д.

Кратко рассмотрим возможности и трудности каждой из гипотез, отбрасывая наименее вероятные из них.

Геометрические факторы (вариант 1) приводят только к смещению кривых зависимости температурных изменений от фазы. Наклон площадки на угол α к лунному горизонту вызывает смещение по фазе на тот же угол α , и радиотемпература оказывается такой же, как на селенографической долготе ($\psi_c + \alpha$). Амплитуды T_0 , T_1 , T_2 не меняются. Большие области заведомо не могут быть связаны с этим эффектом, так как это требует неправдоподобно больших перепадов высот, противоречащих прямым стерео-, фотограмметрическим исследованиям с космических аппаратов [22]. Так, например, на рис. 19 при переходе от морских областей к материковым наблюдениям наблюдается резкий край неоднородностей № 1. Перепад яркостной температуры для этой неоднородности составляет примерно 5—7 К. Размеры области по долготе ~ 100 км. Если изменение температуры связано только с наклоном поверхности, то угол наклона составит 20—26°. Это приводит к перепаду высот в 30—50 км. (Максимальные перепады высот на Луне по локационным измерениям составляют ~ 4 км). Однако некоторые детали: края селеносинклиналей (№ 5—7) могут быть объяснены геометрическим эффектом. Например, для детали № 6а (рис. 20) угол наклона поверхности $\sim 4^\circ$ и перепад высот 3—4 км.

В варианте теплового потока из недр (вариант 2б) температурные вариации не должны зависеть от фазы, в то время как корреляция температурных разрезов на исследуемых волнах, снятых при существовании различных фаз, полностью теряется, а большие неоднородности, как было показано ранее, являют четкий фазовый ход. Рассмотрим эту гипотезу для мелких неоднородностей. Оценим яркостную температуру на волне 1.35 см неоднородности № 8 (рис. 21), расположенной в Море Влажности, вблизи кратера Гассенди, где по результатам γ -спектроскопических исследований [43] была обнаружена повышенная радиоактивность. Как известно,

$$T_a = \gamma_\lambda \gamma_1 T_s.$$

Коэффициент γ_λ характеризует потери в антенной системе (переоблучение зеркал, рассеяние на неоднородностях поверхности). Например, на $\lambda = 1.35$ см — $\gamma_{1.35} = 0.415$. Коэффициент γ_1 учитывает соотношение телесных углов источника

и диаграммы направленности антенны. Мы считаем, что размеры детали № 8 по горизонтали и по вертикали одинаковы. Тогда

$$T_a = \eta_\lambda \sqrt{\frac{\varphi_{yi}}{\varphi_{ya}}} T_s.$$

Результаты вычислений T_s для $\lambda = 1.35$ см приведены в табл. 7.

ТАБЛИЦА 7

Область	Дата	Размеры детали	T_a , К	T_s , К
8а	8.01.80	45''	0.48	3.56
8б	9.01.80	75	0.66	3.79
8в	10.01.80	52.5	1.0	6.87
8г	12.01.80	37.5	0.48	3.9

Из этой таблицы следует, что средняя яркостная температура детали № 8 с 8 по 12 января 1980 г. составила $T_s = 4.53 \pm 0.52$.

На рис. 22 приведена кривая изменения яркостной температуры детали № 8 в зависимости от фазы по сравнению с яркостной температурой эффективной Луны на волне 1.35 см.

Наблюдаемая яркостная температура детали № 8 на волне 2.08 см составляет $T_s = 3.01$, что несколько меньше, чем на $\lambda = 1.35$ см. На волне 3.9 деталь № 8,

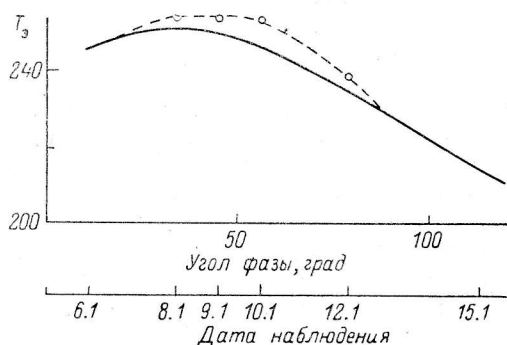


Рис. 22. Изменение яркостной температуры лунного диска в зависимости от оптической фазы с 6.01.80 по 15.01.80 на долготе 30° W. \odot — показано значение яркостной температуры детали № 8 с 8.01.80 по 12.01.80.

расположенную на 30° западнее центра Луны, трудно обнаружить из-за усредняющего действия диаграммы направленности. Указание на изменение температуры с фазой на этой детали (рис. 22), хотя и не исключает полностью, но делает сомнительным правдоподобность варианта 2б. Для выяснения природы этой неоднородности требуются дальнейшие наблюдения указанной выше области в течение всей лунации.

Поднятие границы с основными твердыми породами выше уровня $\tau = 1$ для короткого сантиметрового диапазона (вариант 2а) может дать очень сильный эффект, так как свойства этих пород резко отличаются от верхнего слоя толщиной 3—40 м [9]. При приближении к поверхности Луны эти породы должны проявить себя сначала на длинных волнах, в то время как, по-видимому, во всех случаях на коротких волнах эффекты сильнее. Выход этих пород полностью на открытую поверхность приводил бы к резкому изменению поляризационных свойств и был бы замечен при локационных исследованиях по коэффициенту отражения [22] (эти области должны быть «почти зеркальными»).

Вариант 2в (различие в ϵ) сомнителен по причинам, обсуждавшимся при рассмотрении варианта 2а, тем не менее он требует уточнений при дополнительных наблюдениях.

Наиболее гибкой и правдоподобной является гипотеза различия химсостава или структуры морских и материковых областей Луны (вариант 2г). Следует отметить, что относительные варианты радиотемпературы, вообще говоря, очень малы: они составляют около 3 % по T_a и около 7.5 % по T_s . Так как отличие амплитуды первой гармоники на волне 1.35 см для морской области составляет 6 % от эффективного значения, то достаточно 10 % изменений параметров γ (или k , ρ , c_p) для объяснения эффекта.

Отметим также, что дисперсия в величине γ по данным Луноходов и Аполлонов значительно превышает 10 % [22], откуда следует, что локальные вариации свойств Луны больше, чем средние по областям в 30—300 км. Ниже мы остановимся более подробно на обсуждении различия химического состава морских и материковых областей Луны, а также обсудим данные по оптическим неоднородностям Луны.

Связь полученных результатов с химическим составом лунных пород.

Изучение состава лунных пород основано на сравнении тех или иных характеристик лунных и земных пород. Оптические характеристики дают информацию только о самом верхнем, очень тонком слое на поверхности Луны. Эти сведения (цвет, индикатриса расстояния, поляризация) в значительной степени зависят либо от ничтожного количества примесей, либо от структурных особенностей поверхности, степени изрытости, характера неровностей и т. д.

Для изучения химического состава по радионаблюдениям удобнее сравнивать параметры, которые не зависят от плотности. Для диэлектриков [41] таким параметром является отношение $\text{tg } \Delta/\rho$ [19] (удельный тангенс угла диэлектрических потерь к плотности). Эта величина в основном зависит от химического состава. Значение $\text{tg } \Delta/\rho$ можно получить из соотношения

$$\delta = \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{\epsilon} \text{tg } \Delta l_m}, \quad (42)$$

где

$$\delta = l_s/l_m.$$

Величина δ связана с M_1 соотношением (39). Как отмечалось ранее, по наблюдениям на РАТАН-600 величина $m=1.1$. Определив из эксперимента M_1 , по соотношению (39) найдем δ , а по (42) — $\text{tg } \Delta$.

ТАБЛИЦА 8

λ , см	M_1	δ	δ/λ	ϵ	ρ	$\text{tg } \Delta/\rho$
1.35	7.7	2.76	2.05	1.5	0.6	0.01409
2.08	10.4	3.93	1.89	1.6	0.68	0.01349
3.9	14.0	9.77	2.51	2.2	1.15	0.00601

В табл. 8 приведены значения M_1 , δ , δ/λ , $\text{tg } \Delta/\rho$ для эффективной Луны на волнах сантиметрового диапазона по результатам исследований на РАТАН-600. Значения ρ и ϵ взяты по нашим поляризационным наблюдениям.

В табл. 9 приведены данные по химическому составу лунных пород в местах посадки различных космических кораблей [33], главным образом в районах, близких к наблюдениям на РАТАНе. Полученные результаты по содержанию химических компонентов можно сопоставить с цветовыми различиями [45].

ТАБЛИЦА 9

Окисел	Море Спокойствия		Центральный Залив «Сервейор-6»	О. Бурь «Аполлон-12»	Материковые районы		
	«Сервейор-5»	«Аполлон-11»			«Аполлон-11»	«Аполлон-12»	«Сервейор-7»
SiO ₂	46.4	40.8	46.1	49.1	45.7	61.0	40.0
TiO ₂	7.6	10.5	—	3.5	0.3	1.2	3.7
Al ₂ O ₃	14.4	10.0	22.3	14.7	30.5	12.0	11.2
FeO	12.1	18.8	5.5	12.4	4.5	10.0	21.3
MgO	4.4	7.5	7.0	6.6	4.8	6.0	11.7
CaO	14.6	10.9	18.3	12.9	15.8	6.3	10.7
Na ₂ O	0.6	0.48	0.7	0.8	0.35	0.69	0.45
K ₂ O		0.21				2.0	0.06
MnO		0.22			0.1	0.12	0.26
H ₂ O		0.005					

Места посадки в синеватых морях (Море Спокойствия) содержат в 2—3 раза больше титана, чем места посадки в промежуточных красноватых морях (Центральный Залив и Океан Бурь). Материки гораздо краснее, чем самые красные морские области. Породы в материковом участке у кратера Тихо и анортозитовые обломки в местах посадки «Аполлона-11 и -12», вероятно, как утверждается в [46], принесены с материков и имеют очень низкие концентрации титана.

Главным проводящим минералом лунных образцов является ильменит ($\text{FeO} + \text{TiO}_2$). Между содержанием ильменита и тангенсом потерь установлена прямая корреляция [47]

$$\text{tg } \Delta/\rho = (0.00053 \pm 0.00056) + (0.00025 \pm 0.00009) C^*, \quad (43)$$

где C^* — содержание $\text{FeO} + \text{TiO}_2$.

Для районов Луны, приведенных в табл. 9, по процентному содержанию ильменита (C^*) найдем величину $\text{tg } \Delta/\rho$ по формуле (43). Результаты приведены в табл. 10. Как видно из этой таблицы, значение величины $\text{tg } \Delta/\rho$ для морских районов в 2 раза больше, чем для материковых районов.

ТАБЛИЦА 10

Район Луны	C^* ($\text{FeO} + \text{TiO}_2$)	$\text{tg } \Delta/\rho$	$\overline{\text{tg } \Delta/\rho}$
Море Спокойствия («Сервейор-5»)	19.7	0.00779	0.00657
(«Аполлон-11»)	29.3	0.01105	
Центральный Залив («Сервейор-6»)	16.0	0.0065	0.00317
Океан Бурь («Аполлон-11»)	25.0	0.00959	
Материковый район («Аполлон-11»)	4.8	0.00163	
(«Аполлон-12»)	11.3	0.00493	
(«Сервейор-7»)	5.5	0.00296	

Сравним результаты, полученные по космическим исследованиям, с нашими экспериментальными данными. По формулам (39) и (42) при $\rho = 0.6 \text{ г/см}^3$ и $\epsilon = 1.5$ вычислим значения удельного тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg } \Delta/\rho$) для исследованных нами районов Луны. Результаты вычислений приведены в табл. 4.

По нашим наблюдениям для морских районов $\overline{\text{tg } \Delta/\rho} = 0.01488$. В районе Океана Бурь содержится ильменита больше, чем в восточных морских районах. Для материковых районов $\text{tg } \Delta/\rho = 0.01364$. Следовательно, для морских районов значение $\text{tg } \Delta/\rho$ всего в 1.1 раза больше, чем для материковых (по космическим исследованиям в 2 раза больше). Различие в процентном содержании ильменита в поверхности морей и материков, как было отмечено выше, объясняется тем, что выборки Аполлонов не определяют средний химический состав.

Таким образом, по космическим исследованиям вещество морей в среднем содержит в 3 раза больше ильменита, чем вещество материков. По нашим результатам морские области содержат ильменита в 1.65 раза больше, чем материковые области.

По оптическим наблюдениям моря и материки имеют различное содержание железа [48], что получается по результатам исследования альbedo морских и материковых областей Луны. Различие в химическом составе морских и материковых областей получается и по оптическим поляризационным наблюдениям, например проведенным Джаниашвили и Король [49].

Остановимся еще на одном интересном факте связи радиоизлучения и оптических свойств поверхности с химическим составом. Как мы уже отмечали, цветовые характеристики деталей Луны могут быть критерием содержания на лунной поверхности тех или иных минералов. В работе [50, 51] была предпринята попытка использовать метод наложения негатива, полученного в синем участке спектра ($\lambda_s = 430 \text{ мкм}$), на позитив, полученный в инфракрасном участке спектра ($\lambda_s = 920 \text{ мкм}$) для увеличения цветового контраста деталей. Более темный фон соответствует большей насыщенности красного цвета. На рис. 23 приведен совмещенный снимок, полученный указанным выше способом. Сравнивая

его с наблюдениями на сантиметровых волнах на РАТАН-600, мы видим, что мелкие неоднородности (№ 5—7) (ранее мы связывали эти вариации № 5—7 с наклонами к поверхности) соответствуют материковым участкам насыщенного красного цвета на совмещенном снимке Луны. Вполне вероятно, что они имеют низкое содержание титана в отличие от участка № 8, расположенного в морской области и являющегося голубым (белым) на совмещенном снимке.

В дальнейшем необходимо исследовать вариации температуры с фазой во внеэкваториальной области, а также более подробно исследовать отдельные мелкие детали.

Хотя толщина поверхностного покрова, от которого зависят наблюдаемые характеристики Луны, не превышает несколько миллиметров, инфракрасное излучение 10—30 мк доставляет сведения о слое до глубины порядка 10 см, а короткие сантиметровые волны несут информацию о физических свойствах

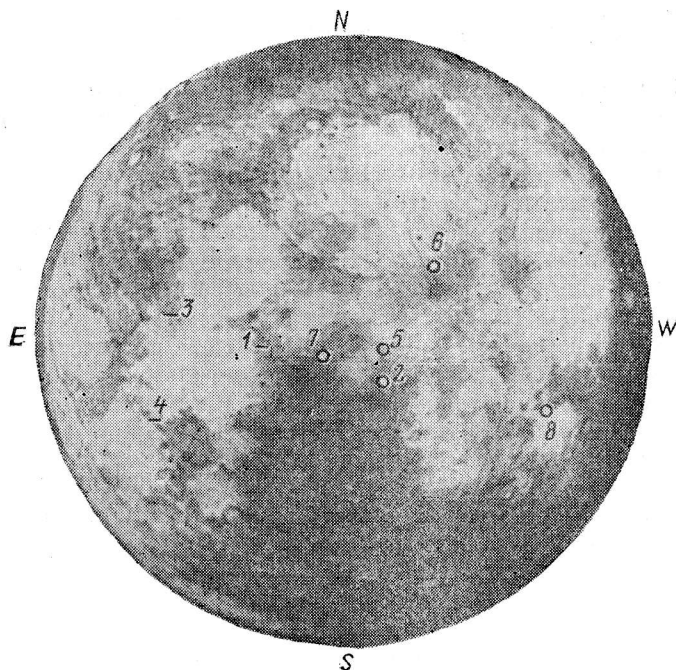


Рис. 23. Мелкие неоднородности на совмещенном снимке Луны.

Неоднородности № 5, 6, 7 соответствуют материковым участкам насыщенного красного цвета. Неоднородность № 8 расположена в морской области и является голубой.

поверхностного слоя толщиной порядка 1 м, тем не менее по наблюдениям на волнах сантиметрового диапазона полученные нами результаты не противоречат ни оптическим, ни инфракрасным наблюдениям, а для отдельных районов Луны хорошо согласуются с ними [45, 49, 51, 52].

Резюме. Таким образом, по наблюдениям на волнах сантиметрового диапазона на РАТАН-600 с большой чувствительностью и высоким одномерным разрешением исследована зависимость радиотемпературы экваториальной области Луны от условий освещения.

1. Разработана методика привязки антенной температуры в различные дни наблюдений.

2. Наблюдения на волнах 1.35, 2.08, 3.9 см довольно хорошо аппроксимируются первыми тремя членами ряда Фурье.

3. Впервые на сантиметровых волнах надежно зарегистрирована частотная зависимость параметров первой гармоники.

4. Полученные результаты для параметров первой гармоники хорошо согласуются с экспериментальными данными других авторов [45, 47].

5. Вторая гармоника затухает несколько медленнее, чем это следует из теории, что говорит об устойчивости стратификации лунной поверхности.

6. Результаты наших исследований Луны сравнительно хорошо ложатся на теоретическую кривую для двухслойной модели лунной поверхности с тонким слоем пыли, для которой $m=1.1$ и $\psi_s=5^\circ$. Этот результат не противоречит нашим выводам из поляризационных исследований [53—55] о наличии на Луне тонкого приповерхностного слоя толщиной 4—6 см, плотность которого растет от 0.4 до 1.6 г/см³.

7. Материковые участки экваториальной области Луны имеют параметры, близкие к эффективным (например, материковый район к юго-востоку от Центрального Залива).

8. Выделено пять площадок, расположенных в морях, имеющих иные параметры, чем эффективная Луна. Скорее всего, материковые и морские области лунной поверхности отличаются либо структурой, либо химическим составом, либо тем и другим вместе, что подтверждают результаты исследования лунных образцов [56].

9. На волне 1.35 см выделено восемь мелких неоднородностей размером $20''-67''5$.

10. Резкий край неоднородностей № 1—3 при переходе от морских областей к материковым связан не только с перепадом высот, но и с различным химическим составом морей и материков.

11. Некоторые мелкие детали — края селеносинклиналий (№ 5—7) можно объяснить геометрическим эффектом.

12. Вычислено значение $\text{tg } \Delta/\rho$ для морских и материковых участков. Оно различается в 1.1 раза, по исследованию космических образцов — в 2 раза. Вещество морей по нашим наблюдениям содержит в 1.65 раза больше ильменита, чем вещество материков (по космическим исследованиям — в 3 раза больше).

13. Западные и восточные моря Луны имеют разные параметры Фурье-разложения, что связано с различными их свойствами. Западные морские области (Океан Бурь) по исследованиям на РАТАНе содержат больше ильменита, чем восточные. Различие западных и восточных морских районов Луны подтверждают и результаты γ -спектроскопических исследований, и изучение лунных образцов.

14. Результаты по химическому составу лунной поверхности, полученные нами, хорошо согласуются с оптическими наблюдениями.

Литература

1. Железняков В. В. Радиоизлучение Солнца и планет. М.: Наука, 1964. С. 241—252, 528—540.
2. Троицкий В. С. К теории радиоизлучения Луны // Астрон. журн. 1954. 31, № 6. С. 511—528.
3. Кротиков В. Д. Некоторые электрические характеристики земных пород и их сравнение с характеристиками поверхностного слоя Луны // Изв. вузов. Радиофизика. 1962. 5, № 6. С. 1057—1061.
4. Piddington J. H., Minne H. C. Microwave thermal radiation from the Moon // Austral. J. Sci. Res. 1949. A2. P. 63—77.
5. Троицкий В. С. Радиоизлучение Луны, физическое состояние и природа ее поверхности // Новое о Луне. М.; Л., 1963. С. 354—366.
6. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. М.: Наука, 1964. 567 с.
7. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. С. 357—400.
8. Кайдановский Н. Л. Исследование Луны при помощи радиометодов // Луна: Сб. М., 1960. С. 203—240.
9. Кротиков В. Д., Троицкий В. С. Обнаружение потока тепла из недр Луны // Астрон. журн. 1963. 40, № 6. С. 1076—1082.
10. Троицкий В. С. Радиоизлучение затменной Луны // Астрон. журн. 1969. 42, № 6. С. 1296—1309.
11. Наугольная М. Н. Уточнение некоторых характеристик лунной поверхности по наблюдениям на РАТАН-600 // Астрон. циркуляр. В печати.
12. Исследование точности отражающей поверхности главного зеркала РАТАН-600 (северный сектор) / С. Я. Голосова, Н. А. Есепкина, Ю. К. Зверев и др. // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1982. 15. С. 132—150.
13. Использование космических источников радиоизлучения для исследования характеристик радиотелескопа РАТАН-600 / Б. В. Брауде, Н. А. Есепкина, Ю. К. Зверев и др. // Радиотехника и электроника. 1981. 26, № 7. С. 1530—1544.

14. Парийский Ю. Н., Корольков Д. В. Эксперимент «Холод»: Первый глубокий обзор неба с помощью радиотелескопа РАТАН-600 // Итоги науки и техники. Сер. Астрономия. 1986. 31. С. 73—197.
15. Планеты и спутники / Под ред. Дольфюса. М.: Мир, 1974. С. 207—266, 458—578.
16. Nagfors T. Microwave studies of thermal emission from the Moon // Adv. in Astron. and Astrophys. 1971. 8. P. 1—28.
17. Muhleman D. O. Microwave emission from the Moon // Owens Valley Radio Observatory. 1971. Nr 14. P. 1—31.
18. Троицкий В. С. О природе вещества лунных морей и материков // Изв. вузов. Радиофизика. 1963. 6, № 3. С. 631—633.
19. Кротиков В. Д., Троицкий В. С. Радиоизлучение и природа Луны // УФН. 1963. 81, вып. 4. С. 589—639.
20. Кротиков В. Д., Пелюшенко С. А. К вопросу использования Луны в качестве источника с эталонной интенсивностью в диапазоне длин волн 0.1—30 см // Астрон. журн. 1987. 64, вып. 2. С. 417—423.
21. Федосеев Л. И., Лубяко Л. В., Кунин Л. М. Радиоизлучение Луны в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах волн // Физика Луны и планет. М., 1972. С. 111—113.
22. Крупенко Н. Н. Радиоисследования Луны и планет земной группы // Итоги науки и техники. Сер. Астрономия / ВИНТИ. 1980. 16. С. 3—116.
23. Coates R. J. Lunar brightness variations with phase at 4.3-mm wave length // Astrophys. J. 1961. 133, Nr 2. P. 723—725.
24. Саломонович А. Е. Некоторые результаты исследований, выполненных на радиотелескопе РТ-22 // Тр. ФИАН. 1962. 17. С. 74—81.
25. Кисляков А. Г., Лосовский Б. Я., Саломонович А. Е. Радиоизлучение «морей» и «материков» Луны в миллиметровом диапазоне длин волн // Изв. вузов. Радиофизика. 1963. 6, № 1. С. 192—193.
26. Кисляков А. Е., Саломонович А. Е. Радиоизлучение экваториальной области Луны в 4-мм диапазоне волн // Изв. вузов. Радиофизика. 1963. 6, № 3. С. 431—436.
27. Лосовский Б. Я., Саломонович А. Е. О радиоизлучении и различии верхнего покрова морских и материковых областей Луны // Астрон. журн. 1965. 17, № 2. С. 390—397.
28. Саломонович А. Е., Лосовский Б. Я. Наблюдение распределения радиояркости по диску Луны на волне 0.8 см // Астрон. журн. 1962. 39, № 6. С. 1074—1082.
29. Saari J. M. Schorthill infrared isothermal mapping of certain crater areas of the Moon // Astron. J. 1961. 66, Nr 2. P. 52.
30. Schingareva K. B. Compiling a serie of charts of physical properties of lunar surface on common mathematical basis // All. Vermess.-Nachr. 1977. 81, Nr 10.
31. Марков А. В. Описание Лунной поверхности // Луна: Сб. М., 1960. Гл. 3. С. 78—101.
32. Гальперсон С. Атлас Луны. Петроград: Науч. книгоизд-во, 1918. 32 с.
33. Виноградов А. П. Дифференциация вещества Луны // Труды Сов.-Амер. конфер. по космохимии Луны и планет. М., 1975. С. 5—28.
34. Флоренский П. В., Чернов В. М. Наблюдения нестационарных явлений на Луне // Астрон. вестн. 1973. 7, № 1. С. 38—44; 1975. 9, № 3. С. 194—198; 1978. 12, № 1. С. 57—63; 1979. 13, № 1. С. 62—64; 1982. 16, № 1. С. 60—62.
35. Козырев Н. А. О существовании вулканической деятельности на Луне // Вопросы вулканизма: Тр. I Всесоюз. вулканолог. совещ., 23.9—2.10.59. М., 1962. С. 72—73.
36. Kozurev N. A. Observation of a volcanic process on the Moon / Sky and Telescope. 1959. 18. P. 184—186.
37. Результаты пассивного сейсмического эксперимента по программе «Аполлон» / Г. Латем, И. Накамура, Дж. Дорман и др. // Космохимия Луны и планет. М.: Наука, 1975. С. 299—310.
38. Tyler G. L., Howard H. T. Dual frequency bistatic radar investigations of the Moon with Appolos 14 and 15 // J. Geophys. Res. 1971. 76. Nr 11. P. 2790—2795.
39. Хайн В. Е. Общая геотектоника. М., 1973.
40. Галкин И. Н. Геофизика Луны. М.: Наука, 1978. 176 с.
41. Уипл Ф. Л. Семья Солнца. М.: Мир, 1984. С. 98—164.
42. Фотокарта видимого полушария Луны / Сост. ГАИШ и Топогеофиз. служба СССР. М.: Наука, 1967.
43. Элементарный состав лунной поверхности по данным измерений гамма- и рентгеновского излучения на космических кораблях «Аполлон-15» и «Аполлон-16» / Дж. Тромбка, Дж. Р. Арнольд, И. Адлер и др. // Космохимия Луны и планет. М., 1975. С. 128—152.
44. Сканава Г. И. Физика диэлектриков. М.: Гостехиздат, 1949.
45. Луна / Под ред. С. Ранкорна, Г. Юри. М.: Мир, 1975. С. 71—104.
46. Виноградов А. П. Предварительные данные о лунном грунте, доставленном автоматической станцией «Луна-16» // Лунный грунт из Моря Изобилия. М.: Наука, 1974. С. 7—18.
47. Стренгвей Д. В., Пирс Г. В., Олхофт Г. Р. Магнитные и диэлектрические свойства лунных образцов // Космохимия Луны и планет. М.: 1975. С. 712—728.
48. Jaffe L. D. Lunar surface material spacecraft measurements on density and strength // Science. 1969. 164, Nr 3887. P. 1514—1516.

49. Джапиашвили В. П., Король А. Н. Поляриметрический атлас Луны. Тбилиси: Мецниереба, 1982. 24 с., 21 л. карт.
50. Наугольная М. Н. Методика и результаты наблюдений Луны в инфракрасной области спектра // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1970. 2. С. 94—120.
51. Наугольная М. Н. Некоторые результаты изучения Луны в инфракрасной области спектра // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1971. 3. С. 116—123.
52. Койпер Дж. От «Рейнджера-7» до «Рейнджера-9». Результаты исследования лунной поверхности // Фигура Луны и проблемы лунной топографии: Сб. ст. М.: Наука, 1968. С. 235—256.
53. Наугольная М. Н., Соболева Н. С. Многочастотные поляризационные наблюдения Луны на РАТАН-600 // Письма в Астрон. журн. 1986. 12, № 3. С. 247—252.
54. Наугольная М. Н., Соболева Н. С. Некоторые средние характеристики приповерхностного слоя Луны по поляризационным наблюдениям на РАТАН-600 // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1986. 23. С. 19—36.
55. Naugol'na ja M. N., Soboleva N. S. The polarization Observations of Moon with RATAN-600 // Prepr. SAO. 1985. Nr 26 L. P. 3—11.
56. Сурков Ю. А. Космохимические исследования планет и спутников. М.: Наука, 1985. С. 68—80, 140—154, 223—256, 277—286.

Поступила в редакцию 15 декабря 1987 г.