

УДК 523.164.3

**ОБ ИЗМЕНЕНИЯХ ИНТЕГРАЛЬНОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ
МАРСА ЗА ПЕРИОД МЕЖДУ ПРОТИВОСТОЯНИЯМИ
1971 и 1973 гг.**

В. Д. Кротиков, О. Б. Щуко

К настоящему времени накоплен обширный материал по интегральному радиоизлучению Марса в диапазоне от 0,5 мм до 21 см. Для сопоставления экспериментальных данных, полученных во время различных противостояний, обычно используется их приведение к среднему гелиоцентрическому расстоянию [1-3]. Такое приведение позволяет построить лишь весьма приближенный спектр интегрального радиоизлучения Марса, поскольку при этом учитывается только эллиптичность орбиты Марса. Однако помимо этого фактора необходимо учесть неравномерность скорости орбитального движения, наличие наклона оси вращения, а также изменения фазового угла и склонения Земли на небе Марса. Это обстоятельство отмечено в работе [4] при рассмотрении временных изменений усредненной по видимому диску яркостной температуры Марса на длинных волнах.

В данной работе для различных длин волн ($0,4 \leq M\lambda \leq 51,2$) рассмотрено совместное влияние перечисленных факторов на вариации интегрального радиоизлучения Марса за период с января 1971 г. по декабрь 1973 г.

Интегральная радиотемпература Марса на основании [5] может быть представлена следующим образом:

$$\bar{T}_e(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi d\psi \int_{-\pi/2}^{\pi/2} [1 - R(\varphi, \psi)] T_e(\varphi, \psi; t) \sin^2\psi \cos\varphi d\varphi. \quad (1)$$

В этом соотношении $R(\varphi, \psi)$ — среднеарифметическое из коэффициентов отражения для вертикальной и горизонтальной поляризации излучения, $T_e(\varphi, \psi; t)$ — яркостная температура участка поверхности с координатами (φ, ψ) на видимой с Земли полусфере Марса. Начало отсчета в этой системе координат всегда совпадает с центром видимого диска Марса, т. е. с «подземной» точкой. Узлам координатной сетки (φ_i, ψ_i) (шаг по φ и ψ был выбран равным 5°) соответствуют ареографические координаты (φ_i^*, ψ_i^*) , связанные с полуденным меридианом и плоскостью экватора.

Переход от координат (φ_i, ψ_i) к координатам (φ_i^*, ψ_i^*) осуществляется путем введения вспомогательных прямоугольных ареоцентрических координат (x^*, y^*, z^*) , определяемых преобразованиями

$$x^* = \cos D_3 \cos(A_C - A_3) \cos\varphi_i \sin\psi_i + \sin(A_C - A_3) \sin\varphi_i \sin\psi_i - \sin D_3 \cos(A_C - A_3) \cos\psi_i, \quad (2)$$

$$y^* = -\cos D_3 \sin(A_C - A_3) \cos \varphi_i \sin \psi_i + \cos(A_C - A_3) \sin \varphi_i \sin \psi_i + \sin D_3 \sin(A_C - A_3) \cos \psi_i + \cos D_3 \cos \psi_i,$$

$$z^* = \sin D_3 \cos \varphi_i \sin \psi_i.$$

В соотношениях (2) D_3 — склонение Земли, $(A_C - A_3)$ — разность прямых восхождений Солнца и Земли на небе Марса.

Выражение φ_i^* через x_i^* и y_i^* (и, следовательно, через φ_i и ψ_i) зависит от знака x_i^* и y_i^* и определяется согласно таблице.

Таблица 1

$y_i^* \backslash x_i^*$	> 0	0	< 0
> 0	$\arcsin S_i^*$	$\pi/2$	$\pi - \arcsin S_i^*$
0	0		π
< 0	$2\pi + \arcsin S_i^*$	$3\pi/2$	$\pi - \arcsin S_i^*$

Здесь введено обозначение

$$S_i^* = \frac{y_i^*}{\sqrt{(x_i^*)^2 + (y_i^*)^2}}.$$

Ареографическая широта ψ_i^* выражается только через z_i^* (и, следовательно, через φ_i и ψ_i) следующим образом:

$$\psi_i^* = \arccos z_i^*.$$

В каждом узле координатной сетки (φ_i, ψ_i) для соответствующей ему точки (φ_i^*, ψ_i^*) в ареографической системе координат яркостная температура была найдена как сумма членов гармонического ряда*

$$T_e(\varphi_i, \psi_i; t) = T_{00} + \sum_m \frac{T_{0m} \cos(m\Omega t - \Delta_{0m} - \xi_{0m})}{\sqrt{1 + 2\delta_{0m} \cos \rho'_i + 2\delta_{0m}^2 \cos^2 \rho'_i}} +$$

$$+ \sum_n \frac{T_{n0} \cos(n\omega t - \Delta_{n0} - \xi_{n0})}{\sqrt{1 + 2\delta_{n0} \cos \rho'_i + 2\delta_{n0}^2 \cos^2 \rho'_i}} +$$

$$+ \sum_m \sum_n \frac{T'_{nm} \cos(n\omega t - m\Omega t - \Delta'_{nm} - \xi'_{nm})}{\sqrt{1 + 2\delta'_{nm} \cos \rho'_i + 2(\delta'_{nm} \cos \rho'_i)^2}} +$$

$$+ \sum_m \sum_n \frac{T''_{nm} \cos(n\omega t - m\Omega t - \Delta''_{nm} - \xi''_{nm})}{\sqrt{1 + 2\delta''_{nm} \cos \rho'_i + 2(\delta''_{nm} \cos \rho'_i)^2}}. \quad (3)$$

* Такое представление сделано на основании проведенных нами расчетов сезонных изменений температурного режима на разных ареографических широтах и известного соотношения для расчета яркостных температур [5].

В этом соотношении коэффициенты T_{00} , T_{0m} , T_{n0} , T'_{nm} и T''_{nm} представляют собой гармонические составляющие изменений температуры поверхности; Δ_{0m} , Δ_{n0} , Δ'_{nm} , Δ''_{nm} — сдвиги по фазе гармоник температуры поверхности по отношению к соответствующим гармоникам падающего светового потока; ξ_{0m} , ξ_{n0} , ξ'_{nm} , ξ''_{nm} — сдвиги по фазе гармоник эффективной температуры по отношению к соответствующим гармоникам изменений температуры поверхности; $\cos \rho_i = 1/\sqrt{\epsilon} \times \sqrt{\epsilon - \sin^2 \rho_i}$, где ρ_i — угол между нормалью в данной точке поверхности (φ_i, ψ_i) и направлением наблюдения; m и n принимают значения от 1 до 4. Время $t = 0$ соответствует моменту местного полдня при прохождении Марсом перигелия 22.10.69 г. Текущее время представлялось как $t = k\tau' + t'$, где k — число суток, прошедшее с момента перигелия, τ' — продолжительность марсианских суток, t' — местное время в рассматриваемой точке (φ_i, ψ_i) . Величины δ_{nm} представляют собой отношения глубины проникания электромагнитной волны l_e к глубине проникания гармонической составляющей температурной волны с номером nm ; δ_{n0} определяются суточными температурными изменениями на Марсе, а δ_{0m} — сезонными.

Поскольку длительность марсианского года τ существенно превышает период суточного вращения Марса ($\tau \approx 670 \tau'$), то величины δ'_{nm} и δ''_{nm} практически совпадают с δ_{n0} . Действительно:

$$\delta_{nm} = \frac{l_e \rho c \gamma \sqrt{n \pm \frac{m}{670}}}{\sqrt{\tau}} \approx \delta_{n0} = \sqrt{n} \delta_{10},$$

m — гармоника сезонной температурной волны проникает в $\sqrt{\frac{\tau}{m\tau'}} \approx \frac{26}{\sqrt{m}}$ раз глубже первой гармонике суточной температурной волны, поэтому δ_{0m} тоже может быть выражено через δ_{10} :

$$\delta_{0m} = \sqrt{m} \delta_{01} = \frac{\sqrt{m}}{-26} \delta_{10}.$$

В узлах выбранной координатной сетки (φ_i, ψ_i) через каждые 20 марсианских суток на оснований преобразования (2) и соотношения (3) рассчитывались значения эффективных температур $T_e(\varphi_i, \psi_i; t)$ для $\gamma = (K\rho c)^{-0.5} = 200$ [6, 7], $\epsilon = 1, 3, 5$ и $\delta_{10} = 0,4; 1,6; 3,2; 6,4; 12,8; 25,6; 51,2$. Затем путем интегрирования по видимой полусфере Марса (1) определялись соответствующие значения $\bar{T}_e(t)$.

Полученные изменения $\bar{T}_e(t)$ для $\epsilon = 1$ представлены на рис. 1. Эти изменения, как показано ранее [8], могут быть приведены к произвольному значению ϵ путем введения среднесферической излучательной способности $1 - R(\epsilon) = (1 - R_{\perp})\alpha(\epsilon)$:

$$\bar{T}_e(t; \epsilon) = (1 - R_{\perp})\alpha(\epsilon) \bar{T}_e(t; \epsilon = 1). \quad (4)$$

Здесь R_{\perp} — коэффициент отражения при нормальном падении; зависимость $\alpha(\epsilon)$ приведена в [9].

На рис. 1 приведены также изменения относительного гелиоцентрического расстояния r_M/\bar{r}_M , разности прямых восхождений Солнца и Земли $A_C - A_3$, характеризующей фазовые изменения $\bar{T}_e(t)$, и разности склонений Солнца и Земли на небе Марса $D_C - D_3$, определяющей влияние наклона его оси вращения.

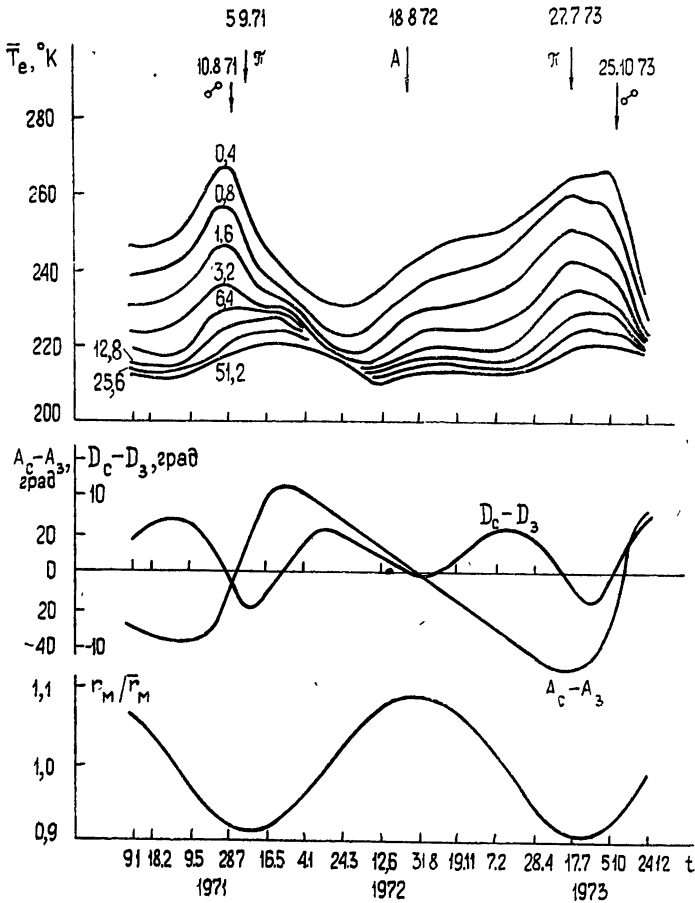


Рис. 1.

Особенности изменений $\bar{T}_e(t)$ для разных δ_{10} определяются совместным влиянием r_M/\bar{r}_M , $A_C - A_3$ и $D_C - D_3$. Около противостояния 1971 г. разности склонений и прямых восхождений близки к нулю, а гелиоцентрическое расстояние — к минимальному. Это приводит к тому, что максимум интегральной температуры для малых значений δ_{10} более резко выражен вблизи противостояния 1971 года, чем вблизи противостояния 1973 г., которое имеет место при больших удалениях Марса от Солнца.

Отмечаемое смещение максимума $\bar{T}_e(t)$ с ростом δ_{10} обусловлено влиянием запаздывания сезонной температурной волны. Особенности поведения кривых в виде уплощений, минимумов и максимумов, имеющих место в интервале между противостояниями, обусловлены доминирующим влиянием на интегральную температуру тех или иных факторов. В частности, до афелия рост температуры обусловлен преобладаю-

щим влиянием уменьшения разностей $A_C - A_3$ и $D_C - D_3$, а после афелия — уменьшением гелиоцентрического расстояния.

Выделить влияние отдельных факторов на изменение интегральной температуры нам не удалось, хотя следует отметить, что для больших δ_{10} ($\delta_{10} > 6,4$) влияние разности $A_C - A_3$ будет пренебрежимо мало, поскольку фазовые изменения яркостной температуры при этом практически отсутствуют.

При интерпретации экспериментальных данных обычно используются зависимости интегрального радиоизлучения от параметра $\delta_{10} = M\lambda$ или от λ при различных значениях M . Эти зависимости могут быть получены из рис. 1 путем снятия точек, соответствующих разным δ_{10} , на моменты наблюдений и пересчета к принятому значению ε по соотношению (4).

В заключение приносим благодарность В. С. Лазаревскому и А. Г. Кунцевич за проведение ряда астрономических расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. E. E. Epstein, *Icarus*, **14**, 214 (1971).
2. В. С. Троицкий, *Астрон. ж.*, **47**, 384 (1970).
3. V. A. Efanov, I. G. Moiseev, A. G. Kislyakov, A. I. Naumov, *Icarus*, **14**, 198 (1971).
4. Ю. Н. Ветухновская, А. Д. Кузьмин, Б. Я. Лосовский, *Астрон. вестн.*, **4**, 231 (1970).
5. В. С. Троицкий, *Астрон. ж.*, **31**, 511 (1954).
6. W. M. Sinton, Y. Strong, *Astrophys. J.*, **131**, 459 (1960).
7. G. Neugebauer, G. Münch, H. Kieffer, S. C. Chase, E. Miner, *Astron. J.*, **76**, 719 (1970).
8. В. Д. Кротиков, О. Б. Щуко, *Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика*, **15**, № 4, 487 (1972).
9. В. Д. Кротиков, В. С. Троицкий, *Астрон. ж.*, **39**, 1089 (1962).

Научно-исследовательский радиофизический институт

Поступила в редакцию
21 мая 1973 г.