

УДК 523. 164. 53. 05

**НАБЛЮДЕНИЕ ПОЛНОГО ЛУННОГО ЗАТМЕНИЯ 9 ЯНВАРЯ  
1982 г. НА ВОЛНЕ 3,2 мм С ПОМОЩЬЮ РАДИОТЕЛЕСКОПА  
РТ-7,5 МВТУ**

*В. Н. Иванов, Т. С. Лебедюк, Б. А. Розанов, Г. Н. Соловьев*

Описана методика и результаты наблюдения 24 участков поверхности Луны на волне 3,2 мм с угловым разрешением 2' во время полного лунного затмения 9 января 1982 г. По результатам наблюдения на основе теории радиоизлучения Луны во время ее затмения определены физические параметры ее поверхностного слоя.

Затменный режим изменения температуры поверхности Луны позволяет исследовать физические параметры ее верхнего покрова толщиной несколько сантиметров [1–4]. Теория радиоизлучения Луны во время ее затмений была разработана В. С. Троицким и получила подтверждение как в результате последующих радионаблюдений полных лунных затмений, так и при анализе образцов лунного грунта, доставленных на Землю [5]. Выведенные в [1] соотношения позволяют дистанционно определять с точностью порядка 10% физические характеристики пород, образующих верхний покров различных участков лунной поверхности, если известны максимальные относительные перепады радиояркостной температуры для этих участков. Радиоастрономические наблюдения в миллиметровом диапазоне волн дают возможность измерять эти перепады.

В данной работе на волне  $\lambda=3,2$  мм измерены максимальные относительные перепады радиояркостных температур для 24 участков лунной поверхности во время полного лунного затмения 9 января 1982 г. Последующая обработка экспериментальных данных с использованием результатов и методик работ [1, 4, 5] позволила получить физические характеристики для обширной области лунного диска. Ранее такие наблюдения проводились либо с низким угловым разрешением, либо для отдельных участков поверхности Луны [1–3].

**1. Экспериментальная аппаратура и методика.** Наблюдение полного лунного затмения 9 января 1982 г. проводилось на западной антенне РТ-7,5 радиотелескопа МВТУ [6]. При диаметре 7,75 м на  $\lambda=3,2$  мм антенна имеет главный лепесток диаграммы направленности шириной 2 угл. мин по уровню —3 дБ. Использовался супергетеродинный радиометр модуляционного типа [7]. Его флюктуационная чувствительность при времени интегрирования 1 с в ходе наблюдений составляла 0,7 К.

Наблюдения проводились на вертикальной поляризации путем сканирования с помощью управляющей ЭВМ прямоугольного кадра, симметричного относительно направления на центр лунного диска. Сканирование производилось в экваториальных координатах. Кадр состоял из четырех строк по прямому восхождению длиной  $L_\alpha=4^m(1^\circ)$ . Расстояние между соседними строками по склонению — 4'24'', время прохождения строки — 2 мин. Параметры кадра обеспечивали прохождение лучом антенны при сканировании областей лунной поверхности (Copernicus, Higelands), наблюдавшихся ранее на близких длинах

волн:  $\lambda=3,1$  мм [2] и  $\lambda=3,4$  мм [3]. Ошибки наведения антенн в процессе наблюдения не превышали 1 угл. мин.

Метеоусловия на период наблюдения даны в табл. 1. Оптическаятолщина атмосферы в зените не превышала при этом 0,08.

Таблица 1

Дата, моск. время, ч	Температура, °C	Абс. влажность г/м³	Давление, мбар	Облачность	Осадки
9.01 82 г.	19 20	-26,1 -26,6	0,475 0,455	968,4 968,2	высокослоист. высококучев.
	22	-28,5	0,413	967,8	0
	23	-28,9	0,392	967,8	0
10.01. 82 г.	1 2	-29,3 -29,6	0,378 0,371	968,2 968,4	0 0
	3	-28,9	0,392	968,7	0

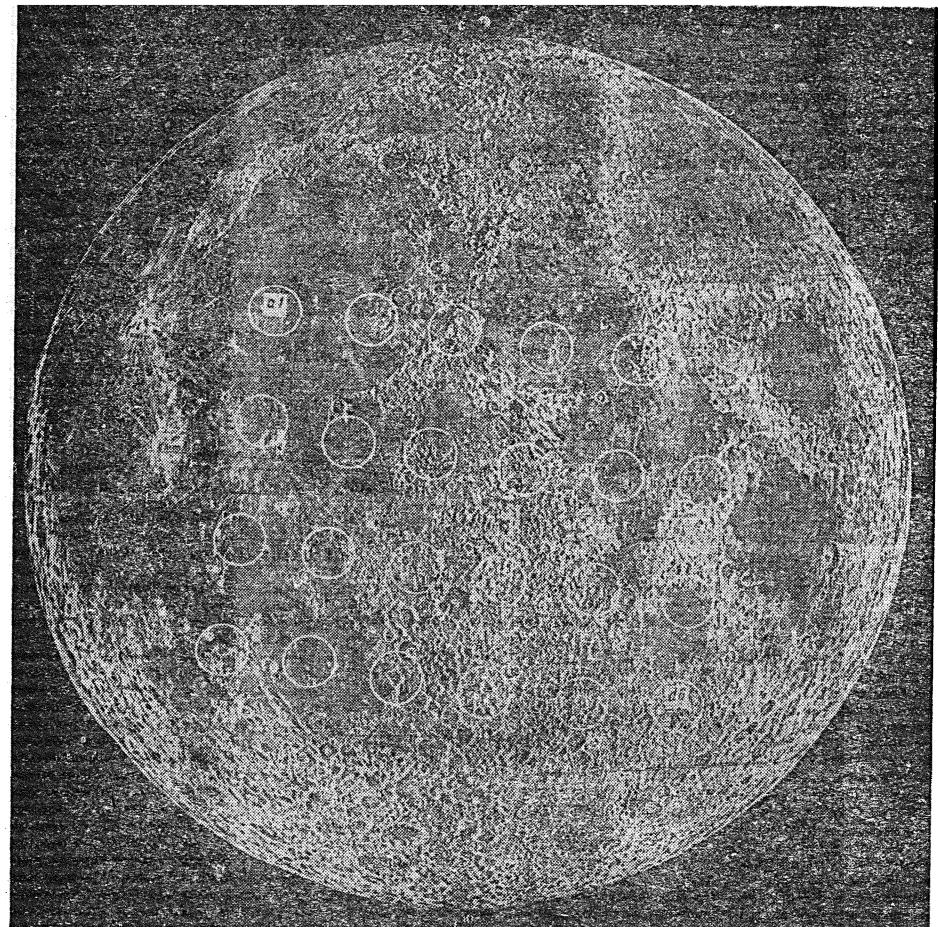


Рис. 1. Карта Луны с сечениями диаграммы направленности антенны по уровню  $-3$  дБ в исследовавшихся точках.

Наблюдения были начаты за 2 часа до вхождения Луны в полутиень и закончены через 3 часа после выхода Луны из полутиени (01<sup>h</sup> по Гринвичу). За это время был получен 51 кадр. Перед началом наблюдений (до 16<sup>h</sup> по Гринвичу), а также в конце каждого последующего часа проводились калибровочные антенные измерения.

Выходной сигнал радиометра регистрировался на магнитной ленте и ленте самописца. Автоматически отмечались моменты прохождения максимума диаграммы направленности антенны через середину каждой строки.

**2. Обработка результатов.** В процессе обработки были определены изменения во времени яркостных температур для 24 участков лунной поверхности (рис. 1). Селенографические координаты центральных точек этих участков даны в табл. 2.

Таблица 2

Строка	# точки в строке					
	1	2	3	4	5	6
a	$\psi = -23^\circ$ $\varphi = 27^\circ$	$-8^\circ$ $26,5^\circ$	$4^\circ$ $25^\circ$	$16,5^\circ$ $22,5^\circ$	$30^\circ$ $20^\circ$	$43^\circ$ $19^\circ$
b	$\psi = -22,5^\circ$ $\varphi = 12^\circ$	$-10^\circ$ $10^\circ$	$1^\circ$ $8,5^\circ$	$13^\circ$ $6,5^\circ$	$25^\circ$ $5^\circ$	$38^\circ$ $3,5^\circ$
c	$\psi = -25^\circ$ $\varphi = -3,5^\circ$	$-12,5^\circ$ $-5^\circ$	$-1^\circ$ $-7^\circ$	$10^\circ$ $-8,5^\circ$	$22^\circ$ $-10^\circ$	$36^\circ$ $-12,5^\circ$
d	$\psi = -30^\circ$ $\varphi = -19^\circ$	$-16,5^\circ$ $-20^\circ$	$-4,5^\circ$ $-22,5^\circ$	$8^\circ$ $-24,5^\circ$	$21,5^\circ$ $-26,5^\circ$	$37,5^\circ$ $-28^\circ$

Яркостная температура определялась с учетом коэффициента связи  $\eta$  диаграммы направленности антенны с источником излучения [8]:

$$T_{\text{я}} = T_{\text{A}}^* / \eta, \quad (1)$$

где  $T_{\text{A}}^*$  — антennaя температура, скорректированная на атмосферное поглощение и потери в антенне.

Для определения  $T_{\text{A}}^*$  использовалось выражение [8, 9]

$$T_{\text{A}}^* = (\Delta T_1 / \Delta T_2) (T_{\text{с.а}} - T_{\text{р.ф}}), \quad (2)$$

где  $T_{\text{р.ф}} \approx 2,8$  К — температура реликтового фона [10],  $T_{\text{с.а}}$  — средняя температура атмосферы,  $\Delta T_1$  — «ступенька» сигнала на выходе радиометра, соответствующая перемещению антенны с источника на свободный участок неба на высоте источника,  $\Delta T_2$  — «ступенька», соответствующая разности некоторой температуры  $T_{\text{п}}$  калибровочного поглотителя на входе приемника и антенны при наведении на участок неба на высоте источника.

Принималось значение  $T_{\text{с.а}} = 0,95 T_0$  ( $T_0$  — абсолютная температура воздуха у земной поверхности), справедливо при условии  $\tau \sec z < 1$  [11] ( $\tau$  — оптическая толщина атмосферы в зените,  $z$  — зенитный угол), выполнявшемся в процессе наблюдений.

Согласно [12] для исключения ошибки выражения (2), связанной с вкладом задних лепестков в antennную температуру неба и отличием  $T_{\text{с.а}}$  от  $T_0$ , при получении калибровочной ступеньки  $\Delta T_2$  следует использовать поглотитель на входе приемника, имеющий температуру  $T_{\text{п}}$ , несколько меньшую  $T_0$ . В нашей методике в ходе эксперимента поглотитель имел температуру  $T_0$ , при которой на выходе радиометра получалась ступенька  $\Delta T_2'$ . Исправление последней до величины  $\Delta T_2$ , соответствующей охлажденному поглотителю, осуществлялось вычитанием расчетной поправки  $\delta T_2 = m T_0 (1 - k)$ , где  $k = T_{\text{п}} / T_0 = 0,96$  — коэффициент охлаждения поглотителя, определенный при предварительной калиб-

ровке антенны по методике [12],  $m$  — масштаб представления температур в выходном сигнале радиометра, определявшийся в ходе эксперимента по сигналу шумовой газоразрядной трубы, предварительно калиброванному по азотной нагрузке. Выбранная методика позволила исключить усложнение радиометра, связанное с охлаждением опорной нагрузки до температуры  $T_{\text{п}}$ . В то же время она не предъявляет высоких требований к точности определения абсолютного масштаба температур  $m$ , поскольку последний входит лишь в поправку, составляющую 4% от  $T_0$ . Таким образом, скорректированная на атмосферное поглощение антенная температура

$$\Delta T_A^* = \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2' - mT_0(1-k)} (0,95 T_0 - T_{\text{п.ф}}).$$

Входящее в (1) значение  $\eta=0,59$  было найдено из солнечных измерений. Поскольку при сканировании кадра для всех исследовавшихся точек главные боковые лепестки диаграммы направленности антенны не выходили за пределы лунного диска, это значение полагалось постоянным.

При определении зависимости  $T_{\text{я}}$  от времени в ходе наблюдения затмения пришлось учитывать снижение КПД антенны из-за обмерзания ее рабочей поверхности. Коррекция величины  $\eta$  на обмерзание делалась путем вычитания из начального значения  $\eta=0,59$  линейно увеличивающейся во времени поправки. Значение поправки на момент окончания наблюдений (спустя три часа после окончания затмения) вычислялось на основании предположения, что яркостная температура Луны вернулась к дозатменному значению [2, 3]. После соответствующей корректировки значений яркостных температур были построены кривые охлаждения — нагрева 24 участков лунной поверхности. Две из них — для точек *b1-Copernicus* и *c4-Higelands* — показаны на рис. 2.

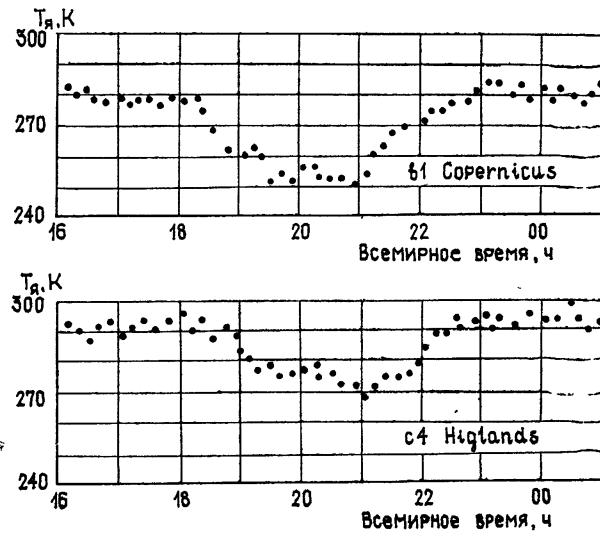


Рис. 2.

Полученные в результате эксперимента кривые охлаждения — нагрева участков лунной поверхности были аппроксимированы по методу наименьших квадратов кусочно-ломаной линией. Это позволило определить для каждого участка начальное значение яркостной температуры  $T_{\text{я}0}$ , падение яркостной температуры в результате затмения  $\Delta T_{\text{я}}$  и относительное снижение яркостной температуры  $\Delta T_{\text{я}}/T_{\text{я}0}$ . Эти данные для участков *b1* и *c4* в табл. 3 сопоставляются с результатами работ [2, 3].

Таблица 3

Величина	b1 - Copernicus			c4 - Highlands		
	9.01. 1982 г. РТ-7,5	10.02. 1971 г. 2	24. 03. 1978 г. 3	9. 01 1982 г. РТ-7,5	10. 02. 1971 г. 2	24. 03. 1978 г. 3
$\lambda, \text{мм}$	3,2	3,1	3,4	3,2	3,1	3,4
$T_{\text{яо}}, \text{К}$	278	280	260	293	310	281
$\Delta T_{\text{я}}, \text{К}$	$23 \pm 2,5$	$18 \pm 1,5$	$18,5 \pm 1,0$	$24 \pm 1,1$	$25 \pm 2,0$	$19 \pm 0,9$
$\Delta T_{\text{я}}/T_{\text{яо}}, \%$	8,3	6,1	7,1	8,2	8,1	6,8

3. Определение электрических и тепловых свойств верхнего покрова Луны. Согласно теории радиоизлучения Луны во время затмения максимальное относительное падение радиояркостной температуры к моменту окончания теневой фазы  $t_3$  определяется выражением [1]

$$\frac{\Delta T_s}{T_{s0}} = - \frac{1-R}{T_{s0}} \frac{8V\pi}{3c\lambda} \frac{bV\varepsilon}{\gamma^2} [\alpha_1(t_3-t_1)^{3/2} + (\alpha_2-\alpha_1)(t_3-t_2)^{3/2}] + \\ + \frac{1-R}{T_{s0}} \frac{2\pi^2}{c^2\lambda^2} \frac{b^3\varepsilon}{\gamma^2} [\alpha_1(t_3-t_1)^2 + (\alpha_2-\alpha_1)(t_3-t_2)^2]. \quad (3)$$

Здесь  $t_1$  — момент начала затмения,  $t_2$  — конец полутеневой и начало теневой фазы,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — коэффициенты наклона аппроксимирующей ломаной для изменения поверхностной инфракрасной температуры во время затмения (согласно [1]  $\alpha_1 = -1,14 \cdot 10^{-4} T_i \text{ град/с}$ ,  $\alpha_2 = -0,05 \times 10^{-4} T_i \text{ град/с}$ ,  $T_i$  — инфракрасная температура рассматриваемой точки поверхности Луны к началу затмения),  $R$  — коэффициент отражения радиоволн от поверхности,  $\varepsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость грунта лунной поверхности,  $b = \lg \delta/\rho$  — нормированный на плотность  $\rho$  лунного грунта тангенс угла диэлектрических потерь,  $\gamma = (k\rho c)^{-1/2}$  — параметр тепловой инерции верхних слоев лунного грунта ( $k$  — теплопроводность,  $c \approx 0,2 \text{ кал/г}$  — удельная теплоемкость).

Используя (3) и значения относительных падений радиояркостной температуры для наблюдавшихся точек лунной поверхности, можно определить в этих точках отношение тепловых параметров грунта к электрическим  $\gamma/bV\varepsilon$ . При этом необходимо учитывать зависимость  $T_i$  и  $R$  от сelenографических координат.

В [4] со ссылкой на другие работы дается аппроксимирующее выражение для распределения инфракрасной температуры  $T_i$  по освещенному лунному диску с учетом шероховатости поверхности:

$$T_i = T_{i0} (\cos \psi)^{1/6}, \quad (4)$$

где  $T_{i0}$  — температура подсолнечной точки (в полнолунии — центр диска),  $\psi$  — селенографическая долгота. На основании измерений достаточно точно установлено, что  $T_{i0} = 395 \text{ К}$  ([1, 4] и более ранние работы). Значения  $T_i$  для каждой из 24 точек, определенные по формуле (4), даны в табл. 4.

Коэффициент отражения радиоволн от лунной поверхности  $R$  выражается формулами Френеля

$$R(\theta) = R_{\parallel}(\theta) \cos^2 p + R_{\perp}(\theta) \sin^2 p,$$

где  $\theta$  — угол между нормалью к поверхности и направлением на наблюдателя,  $p$  — поляризационный угол излучения лунной поверхности,

определенный из геометрических соотношений при приеме радиотелескопом некоторой линейной (в нашем случае вертикальной) поляризации,

$$R_{\parallel}(\theta) = \left( \frac{\epsilon \cos \theta - V\epsilon - \sin^2 \theta}{\epsilon \cos \theta + V\epsilon - \sin^2 \theta} \right)^2, \quad R_{\perp}(\theta) = \left( \frac{\cos \theta - V\epsilon - \sin^2 \theta}{\cos \theta + V\epsilon - \sin^2 \theta} \right)^2.$$

Вследствие малой эффективной толщины излучающего слоя зависимость  $\epsilon$  от глубины можно пренебречь. Для расчета  $R$  нами принято значение  $\epsilon=2,5$ , определенное из исследований образцов лунного грунта [5]. Рассчитанные с учетом сделанных допущений значения  $R$ , а также соответствующие углы  $\theta$  приведены в табл. 4.

Таблица 4

№ точки	$T_{\text{я0}}, \text{К}$	$\Delta T_{\text{я}}/T_{\text{я0}}, \%$	$\theta, \text{град}$	$R$	$T_{\text{lo}}, \text{К}$	$(\gamma/b\sqrt{\epsilon}) \cdot 10^{-4}$	Тип ландшафта
<i>a</i>	257	$7,8 \pm 1,3$	34	0,04	390	$10,2 \pm 1,7$	море
	272	$7,4 \pm 1,3$	27	0,05	394	$10,3 \pm 1,2$	море
	283	$7,1 \pm 1,3$	25	0,04	395	$10,3 \pm 1,2$	горы
	290	$7,0 \pm 1,3$	26	0,04	392	$10,3 \pm 1,2$	море
	289	$8,0 \pm 1,4$	33	0,04	386	$8,9 \pm 1,1$	горы
	275	$8,3 \pm 1,5$	44	0,04	375	$8,7 \pm 1,2$	горы
<i>b</i>	278	$8,3 \pm 1,1$	23	0,04	390	$9,0 \pm 0,9$	горы
	285	$7,7 \pm 1,0$	12	0,05	394	$9,4 \pm 0,9$	горы
	293	$8,1 \pm 0,9$	9	0,05	395	$9,0 \pm 0,8$	горы
	300	$8,3 \pm 0,8$	12	0,05	393	$8,4 \pm 0,6$	горы
	296	$8,1 \pm 1,2$	23	0,04	389	$8,7 \pm 1,0$	море
	283	$8,1 \pm 1,7$	35	0,03	380	$8,9 \pm 1,4$	море
<i>c</i>	272	$8,0 \pm 0,9$	22	0,04	389	$9,4 \pm 1,0$	море
	282	$7,8 \pm 0,5$	11	0,05	393	$9,4 \pm 0,6$	море
	288	$8,0 \pm 0,3$	7	0,06	392	$9,0 \pm 0,4$	горы
	293	$8,2 \pm 0,2$	11	0,05	394	$9,1 \pm 0,4$	горы
	288	$7,3 \pm 0,8$	22	0,04	390	$9,9 \pm 0,7$	горы
	280	$7,1 \pm 1,3$	35	0,03	381	$10,2 \pm 1,2$	море
<i>d</i>	262	$8,4 \pm 1,6$	33	0,04	386	$9,4 \pm 1,4$	море
	273	$7,7 \pm 1,2$	24	0,04	392	$9,9 \pm 1,2$	море
	280	$7,5 \pm 1,0$	23	0,04	395	$10,0 \pm 0,9$	горы
	283	$8,1 \pm 1,0$	25	0,04	394	$9,2 \pm 0,7$	горы
	278	$7,6 \pm 1,2$	32	0,04	390	$9,9 \pm 1,1$	горы
	270	$7,4 \pm 1,3$	44	0,03	390	$10,2 \pm 1,2$	горы

Временные интервалы  $t_3-t_1$  и  $t_3-t_2$  определены для каждой точки графически по схеме прохождения лунного диска через земную тень.

Найденные из решения уравнения (3) значения  $\gamma/b\sqrt{\epsilon}$  для 24 точек лунной поверхности приведены в табл. 4. Там же дана краткая характеристика преобладающего ландшафта наблюдавшихся участков. Приведенные абсолютные погрешности соответствуют вероятности 0,95 попадания в доверительный интервал.

**4. Обсуждение результатов.** Данная работа может рассматриваться как попытка дистанционного картографирования участка видимой поверхности Луны по параметру  $\gamma/b\sqrt{\epsilon}$ . Как и в ранее выполненных наблюдениях, заметна некоторая разница «морских» и «горных» ландшафтов по значению параметра  $\gamma/b\sqrt{\epsilon}$ . В среднем для «морей» этот параметр равен  $9,68 \cdot 10^4$ , для гор —  $9,35 \cdot 10^4$ . Однако наблюдаются значительные изменения оценок параметра  $\gamma/b\sqrt{\epsilon}$  от участка к участку. Желательна большая точность эксперимента, чтобы повысить надежность оценок этого параметра для различных участков.

Результаты, полученные в данной работе на основе теории радиоизлучения затменной Луны [1], удовлетворительно согласуются с данными исследований образцов лунного грунта [5]. Действительно, используя достаточно надежно известное из инфракрасных измерений [1, 4] значение величины  $\gamma = (kpc)^{-1/2}$ , в среднем равное  $10^3$ , и значение диэлектрической проницаемости  $\epsilon = 2,5$ , для средних значений параметра  $\gamma/b\sqrt{\epsilon}$  «морских» и «горных» участков можно рассчитать значения удельного тангенса диэлектрических потерь  $b = tg\delta/\rho$ , соответственно равные  $6,5 \cdot 10^{-3}$  и  $6,8 \cdot 10^{-3}$ . Для исследованных образцов лунного грунта, по данным [5],  $b = 6,2 \cdot 10^{-3} \pm 20\%$ .

Авторы выражают благодарность А. А. Парщикову и Н. А. Жарковой за помощь в подготовке наблюдения затмения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Троицкий В. С.— Астрон. журн., 1965, 42, № 6, с. 1296.
2. Ulich B. L., Cogdell J. R., Davis J. H.— The Moon, 1974, 10, p. 163.
3. Yasuo Fucui, Shigeru Hata, Takeshi Miya j— Icarus, 1979, 40, p. 309.
4. Троицкий В. С., Тихонова Т. В.— Изв. вузов — Радиофизика, 1970, 13, № 9, с. 1274.
5. Крупенин Н. Н.— Космические исследования, 1980, 18, № 2, с. 301.
6. Розанов Б. А.— Изв. вузов — Радиоэлектроника, 1981, 24, № 3, с. 3.
7. Жаркова Н. А., Розанов Б. А.— В кн.: Радиоастрономическая аппаратура, антенны и методы. XIV Всесоюзная радиоастрономическая конференция.— Ереван: 1982, с. 128.
8. Ulich B. L.— Astrophys. J. Supplement Series, 1976, 30, p. 247.
9. Penzias A. A., Burrus C. A. Annual Rev. Astron. and Astrophys./Goldberg L. Ed., Palo Alto, Calif., 1973, 11, p. 51.
10. Вебстер А.— УФН, 1976, 119, с. 343.
11. Кисляков А. Г.— Изв. вузов — Радиофизика, 1966, 9, с. 451.
12. Ulich B. L.— Astrophys. Lett., 1980, 21, p. 21.

Московское высшее техническое училище  
им. Н. Э. Баумана

Поступила в редакцию  
3 мая 1983 года,  
после доработки  
11 октября 1983 г.

## THE $\lambda=3,2$ mm OBSERVATIONS OF THE TOTAL LUNAR ECLIPSE ON JANUARY 9.1982 BY THE RADIOTELESCOPE RT-7.5 MHTS\*

V. N. Ivanov, T. S. Lebeduyk, B. A. Rozanov, G. N. Solov'ev

Methods and observational results obtained at 3.2 mm with the angular resolution 2' during the total lunar eclipse on january 9.1982 are described. Physical parameters of the lunar surface layer are defined using Troitskij method.

---

\*MHTS — Moscow Higher Technical School.