

## НЕКОТОРЫЕ СРЕДНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЛУНЫ ПО ПОЛЯРИЗАЦИОННЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ НА РАТАН-600

*М. Н. Наугольная, Н. С. Соболева*

Представлены результаты многочастотных (1.38, 2.08, 3.9, 8.2, 13 и 31.3 см) поляризационных измерений радиоизлучения Луны с высоким разрешением. Получена уточненная зависимость диэлектрической проницаемости от длины волны в этом диапазоне волн. Показано, что ее уменьшение при укорочении длины волны не может быть связано с широким рассеянием, а скорее всего, отражает изменения плотности приповерхностного слоя, толщина которого, по нашим данным, составляет 4—6 см, с глубиной. Средние характеристики по диску Луны, полученные по радионаблюдениям, хорошо согласуются с результатами прямых проб («Аполлон-12»). В пределах ошибок не обнаружено изменения диэлектрической проницаемости при колебаниях температуры поверхности от 90 до 360 К.

The results of the high resolution multifrequency (1.38, 2.08, 3.9, 8.2, 13, 31.3 cm) measurements of the polarized radioemission of the Moon are presented. A much more accurate dielectric constant-wavelength dependence in this wavelength range is obtained. It is shown that the broad scattering can not be the cause of such dependence. It is more probable that decreasing of  $\epsilon$  with wavelength reflects the density changes with depth in the thin subsurface layer. The depth of this layer according to our measurements is about 4—6 cm. The mean characteristics of the Moon surface obtained from the radio observations with the help of the RATAN-600 are in good agreement with the Apollo 12 probes. The dielectric constant does not change with the surface temperature in the range from 90 K to 360 K.

Как известно, теоретическое предсказание поляризации собственного радиоизлучения Луны было сделано Троицким еще в 1954 г. [1]. После опубликования результатов первого обнаружения поляризации радиоизлучения Луны на волне 3.2 см в 1961 г. [2] (величины диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и шероховатости лунной поверхности) было выполнено большое число работ по определению этих параметров на разных длинах волн и различными методами. Первоначально предполагалось, что обнаруженное различие диэлектрической проницаемости 1.65 на волне 3.2 см (по собственному излучению) и 2.5—3 на дециметровых волнах (по локационным данным) может быть отнесено на счет различного влияния шероховатости при пассивном и радиолокационном методах определения  $\epsilon$ . Однако постепенное накопление информации показало, что величина  $\epsilon$  действительно уменьшается при укорочении длины волны. Напомним, что поляризация собственного (и отраженного) излучения дает значение  $\epsilon$ , осредненное по глубине  $0.25 \lambda$  на границе раздела [3].

В работе Клегга и Картера (1970) [4], обзорах Хэгфорса (1971) [5] и Крупице (1980) [6] собраны все значения  $\epsilon$ , полученные к тому времени на различных волнах. Однако точность измерений недостаточна, для того чтобы получить истинную зависимость диэлектрической проницаемости от  $\lambda$ .

В 1966 г. Матвеев и др. [7] и в 1970 г. Матвеев [8] рассмотрели неоднородную двухслойную модель лунной поверхности и вычислили коэффициенты отражения и эффективную диэлектрическую проницаемость для модели, в которой в нижнем слое показатель преломления постоянен, а в верхнем слое меняется по экспоненциальному закону. В этих работах было показано, что расчеты можно проводить по обычным формулам Френеля, подставляя туда некоторое эффективное значение  $\epsilon$ . В обзоре Хэгфорса [5] построена зависи-

мость эффективной диэлектрической проницаемости от толщины верхнего слоя по расчетам Матвеева.

В связи с возможностью проведения наблюдений Луны с достаточным угловым разрешением в широком диапазоне длин волн от 1.38 до 31.3 см с помощью телескопа РАТАН-600 мы решили попытаться улучшить качество поляризационных данных по Луне для уточнения свойств ее верхнего покрова. Исследования Луны проводились с помощью северного, восточного и западного секторов, а также перископической системы: южный сектор и плоское зеркало [9]. Наиболее полные ряды наблюдений, охватывающие практически все лунные фазы, получены с помощью северного сектора и перископической системы. Фактически было получено больше материала, чем за всю историю радиоастрономии, на всех волнах с большим разрешением, большей чувствительностью, и, главное, на одном инструменте.

Помимо попытки резко повысить качество и достоверность наземных радиоастрономических данных, полезных для сравнительных исследований, мы попытались точнее разделить влияние эффектов рассеяния и эффектов приповерхностного градиента Луны. Изменяя длину волны от 1.38 до 31.3 см, мы имели возможность непосредственно регистрировать градиенты  $\varepsilon$  (а следовательно, и плотности  $\rho$ ) приповерхностного слоя.

Мы надеялись также, что после сравнения результатов наших наблюдений с результатами прямых проб и исследований грунта Луны космонавтами и после уточнения наших данных наземные поляризационные методы можно будет перенести на другие тела Солнечной системы, используя при этом РАТАН-600 и другие инструменты.

В настоящей работе приводятся результаты поляризационных исследований Луны только с помощью перископической системы: южный сектор и плоский отражатель РАТАН-600.

**Наблюдения и редукция данных.** Режим наблюдений был подобран так, что фокус был расположен между первичными облучателями на волнах 2.08 и 3.9 см (они имели всегда один и тот же поперечный вынос из фокуса [10]: 1.35 и 2.00  $\lambda$  соответственно). На других волнах поперечный вынос составлял: на волне 8.2 — либо 2.83  $\lambda$ , либо 2.54  $\lambda$ , на волне 13 см — либо 2.48  $\lambda$ , либо 2.66  $\lambda$ ; на волне 31.3 см — либо 2.57  $\lambda$ , либо 2.49  $\lambda$ . На самой короткой волне 1.38 см наблюдения проводились только в фокусе (без выноса).

Т А Б Л И Ц А 1

Диаграмма направленности	Длина волны, см					
	1.38	2.08	3.9	8.2	13	31.3
Вертикальная $\varphi_{0.5}$	8.7 *	13.4 *	21.3 *	38	62 **	146 **
Горизонтальная $\varphi_{0.5}$	10'5	24"	43'3	1'2	1'9	4'54

\* Пересчитывалось с  $\lambda = 3.4$  и 8.2 см пропорционально.

\*\* Пересчитывалось с  $\lambda = 8.2$  см с учетом переоблучения.

Диаграмма направленности трехзеркальной перископической системы РАТАН-600 имеет так называемую ножевую форму. При подборе моделей мы использовали экспериментальные горизонтальные диаграммы направленности на всех волнах, полученные по наблюдениям дискретных источников малых угловых размеров (рис. 1), а также вертикальные экспериментальные диаграммы направленности на волнах 3.4 [11] и 8.2 см [12]. Вертикальные диаграммы направленности на всех остальных волнах пересчитывались пропорционально длине волны. Для волн 13 и 31.3 см при расчете вертикальной диаграммы учитывалось переоблучение. Принятые полуширины диаграмм направленности приведены в табл. 1.

Как показано в [1], при ножевой диаграмме направленности радиотелескопа можно определять значение  $\varepsilon$  и шероховатости поверхности по наблюдениям

только двух параметров Стокса ( $Q=I_x-I_y$  и  $I=I_x+I_y$ ), так как значения параметра  $U$  во всех точках одномерного распределения равны нулю [2, 18].

Мы использовали штатную аппаратуру облучателя № 1 (РАТАН-600). На волнах 1.38, 2.08, 3.9, 8.2 см при поляризационных наблюдениях применялись стандартные ферритовые модуляторы [13] в круглых волноводах и скалярные первичные облучатели [14]. На волнах 2.08 и 3.9 см возможны как одновременные наблюдения двух параметров Стокса ( $I$  и  $Q$  или  $I$  и  $U$ ), так и последовательная регистрация этих параметров. На всех других волнах возможен только второй режим наблюдений. На волнах 13 и 31.3 см использовались поляриметры, состоящие из высокочастотного поляризационного тракта с первичным облучателем, разработанным в НИРФИ [15], и штатных радиометров. Внутри первичных облучателей находятся две взаимно перпендикулярные рамки «1» и «2», каждая из которых принимает только линейную поляризацию (работает как диполь). Рамки могут поворачиваться на любой угол,

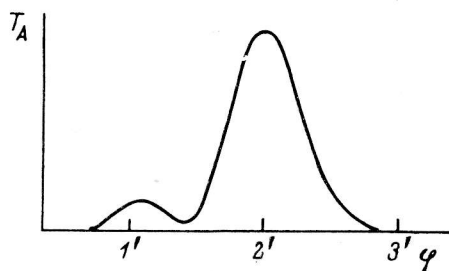


Рис. 1. Экспериментальная горизонтальная диаграмма направленности перископической системы РАТАН-600 на волне 3.9 см при поперечном выносе из фокуса первичного облучателя на  $2.3 \lambda$ .

По оси ординат — антенная температура в произвольных единицах.

оставаясь при этом ортогональными. Поляризационные наблюдения проводились путем переключения рамок «1» и «2»; таким образом осуществлялось сравнение интенсивностей двух ортогональных компонент интенсивности ( $I_x-I_y$ ). Подробное описание конструкции поляризационного тракта на волнах 13 и 31.3 см дано в [15]. На этих волнах возможны также только последовательные измерения параметров Стокса.

При многочастотных одновременных наблюдениях на перископической системе РАТАН-600, без перестановки кругового отражателя (а именно такой режим применялся), в режиме последовательной регистрации параметров Стокса невозможно измерить оба необходимых параметра в один и тот же день. Поэтому проводилась серия наблюдений с чередованием через день каждого из двух параметров ( $I$  и  $Q$ ).

Для более точного определения процента поляризации в качестве калибровочного сигнала использовалось изучение от специальных слабопоглощающих калибровочных пластинок, которые либо вставлялись в волноводный тракт, либо надевались на облучатель (13 и 31.3 см) и излучения от которых регистрировались при измерении обоих параметров Стокса ( $I$  и  $Q$ ). В принципе, при измерении интенсивности нам необходимо наблюдать при двух ортогональных положениях анализатора (для волн  $\leq 8.2$  см) или с помощью «1» и «2» рамок (для волн  $> 8.2$  см), так как параметр Стокса  $I=I_x+I_y$ . Тогда, когда это было возможно, измерения проводились именно таким образом. Однако осуществить такой режим на всех волнах оказалось невозможным. В тех случаях, когда измерения можно было проводить только в одной плоскости, например  $I_x$  (имея в виду, что  $Q=I_x-I_y$ ), для получения параметра Стокса  $I$  приходилось учитывать и поляризационную составляющую, а именно:  $I=2I_x-Q$  или  $I=2I_y+Q$ .

Еще на стадии проектирования РАТАН-600 было предложено использовать протяженные источники для определения качества поверхности радиотелескопа по протяженному фону под источником [16]. Метод был использован при настройке радиотелескопа в 1979 г. [17]. Однако в нашем случае этот эффект является мешающим фактором. Протяженный фон под Луной виден на волнах от 1.38 до 8.2 см включительно (рис. 2). Мы предполагаем, что этот фон слабополяризован или неполяризован вовсе (он практически одинаков при регистра-

ции интенсивности в любых плоскостях). Фон довольно хорошо выделяется на кривых прохождения, так как он много шире Луны. При вычислении процента поляризации величина  $I_x$  отсчитывалась от уровня фона.

Остановимся еще на одном мешающем факторе. При исследовании поляризации практически всегда наблюдается «паразитный» сигнал, пропорциональный интенсивности, чему могут быть разные причины. Мы не будем останавливаться здесь на обсуждении их. Для нас важно только уметь избавиться от этого «паразитного» сигнала. В модуляционном режиме наблюдений метод учета

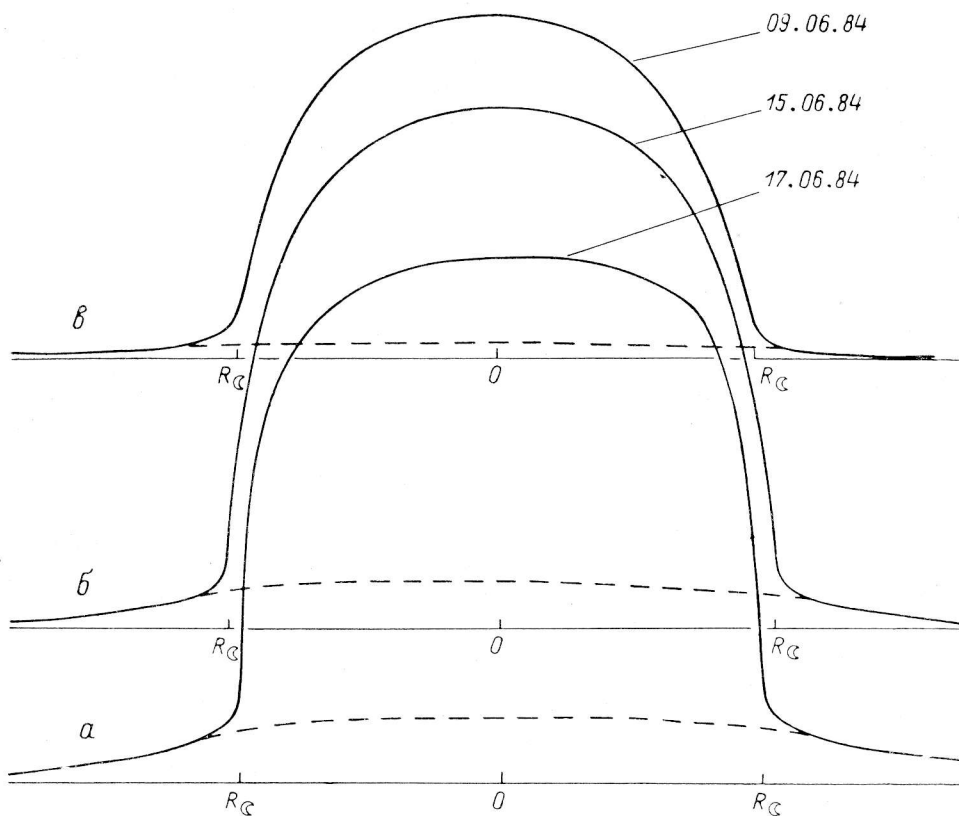


Рис. 2. Примеры кривых прохождения Луны через диаграмму направленности перископической системы РАТАН-600 (параметр  $I$ ) на волнах 1.38 (а), 3.9 (б) и 8.2 (в) см.

Штриховой линией выделен протяженный фон (см. текст).

«паразитного» сигнала, пропорционального интенсивности, для ножевой диаграммы направленности был разработан для Луны в [18]. В немодуляционном режиме наблюдений поляризации (например, на волне 31 см) учет такого паразитного сигнала можно проводить, исходя из следующих соображений. Пусть по каким-то причинам интенсивность в направлении  $x$  ( $I_x$ ) и в направлении  $y$  ( $I_y$ ) принимается неодинаково. Тогда можно считать, что в направлении  $x$  мы измеряем не истинное значение  $I_x$ , а значение  $I_x$ , умноженное на некоторое число  $k$ . Поэтому вместо параметра Стокса  $I = I_x + I_y$  мы будем иметь  $I_{\text{набл}} = I_x k + I_y$ , а вместо параметра Стокса  $Q = I_x - I_y$  параметр  $Q_{\text{набл}} = I_x k - I_y$ , или, заменяя  $k$  на  $1 + k$ , имеем:  $Q_{\text{набл}} = I_x (1 + k) - I_y$ ;  $I_{\text{набл}} = I_x (1 + k) + I_y$  (удобнее вместо этой формулы использовать отношение  $I_x (1 + k) / I_y = \zeta_{\text{набл}}$ ). Поляризованное излучение Луны в основном исходит из малой области вблизи лимба и направлено радиально к центру. Поэтому при «стрип»-интегрировании по ножевой диаграмме направленности на одномерной кривой прохождения имеются две точки, в которых параметр Стокса  $Q$  должен быть равным 0. Причем положение этих точек весьма мало меняется от  $\epsilon$  и шероховатости, а определяется только



шириной вертикальной диаграммы направленности. В таких точках  $i$   $Q_{\text{набл } i} = I_{x_i}(1+k) - I_{y_i}$  и  $I_{x_i}$  должно быть равно  $I_{y_i}$ , следовательно,  $I_{x_i}k = Q_{\text{набл } i}$  и  $k = Q_{\text{набл } i}/I_{x_i} = Q_{\text{набл } i}/I_{y_i}$ . Итак, для определения  $I_x$  и  $I_y$  в любой точке  $j$  одномерного распределения имеем два уравнения

$$I_{x_j}(1 + Q_{\text{набл } i}/I_{y_i}) - I_{y_j} = Q_{\text{набл } j} \quad \text{и}$$

$$I_{x_j}(1 + Q_{\text{набл } i}/I_{y_i})/I_{y_j} = \zeta_{\text{набл } j}.$$

Зная  $I_{x_j}$  и  $I_{y_j}$ , легко получить истинные значения параметров  $Q_j$  и  $I_j$ .

Другой вид «паразитного» сигнала, регистрируемого по дискретным источникам, имеет синусоидальную форму и, скорее всего, связан с переходом круговой «паразитной» поляризации антенны в линейную поляризацию в высокочастотном тракте из-за эллиптичности последнего и невелик (максимален на волне 8.2 см) при наблюдениях с перископической системой РАТАН-600. Для получения интегральных средних характеристик лунной поверхности, его можно исключить в первом приближении, взяв средние значения на кривой прохождения по восточному и западному краям Луны.

Как известно, в радиоизлучении Луны на коротких волнах имеется ощутимая переменная составляющая, связанная с фазой Луны. В принципе, если брать средние кривые прохождения за весь месячный цикл наблюдений, то эффект фазы исключается. Помимо осреднения большого числа кривых при работе на коротких волнах, для определения параметров верхнего покрова Луны выгоднее использовать не кривую процента поляризации, отнесенного к интенсивности в центре диска  $2Q_i/I_{R=0}$  (фактически нормированную кривую

ТАБЛИЦА 2  
 $\lambda = 1.38$  см

$i$	Расстояние от центра Луны в долях радиуса	$(2Q_i/I_{R=0}) \cdot 100\%$
		18.06,84
1	-1.000	1.378
2	-0.975	4.660
3	-0.950	6.498
4	-0.925	6.675
5	-0.900	6.360
6	-0.875	5.985
7	-0.850	5.700
8	-0.825	5.235
9	-0.800	4.520
10	-0.700	2.935
11	-0.600	2.130
12	-0.500	1.420
13	-0.400	0.720
14	-0.300	0.520
15	-0.200	0.350
16	-0.100	0.095
17	0.000	0.000
18	0.100	0.080
19	0.200	0.240
20	0.300	0.590
21	0.400	1.020
22	0.500	1.975
23	0.600	2.830
24	0.700	3.960
25	0.800	5.805
26	0.825	6.195
27	0.850	6.500
28	0.875	6.800
29	0.900	7.190
30	0.925	7.380
31	0.950	7.170
32	0.975	3.416
33	1.000	1.183

ТАБЛИЦА 3  
 $\lambda = 1.38$  см

$i$	Расстояние от центра Луны в долях радиуса	$(2Q_i/I_i) \cdot 100\%$
		18.06,84
1	-1.000	9.920
2	-0.975	11.600
3	-0.950	11.310
4	-0.925	10.150
5	-0.900	9.090
6	-0.875	8.080
7	-0.850	7.350
8	-0.825	6.490
9	-0.800	5.470
10	-0.700	3.350
11	-0.600	2.320
12	-0.500	1.510
13	-0.400	0.740
14	-0.300	0.530
15	-0.200	0.350
16	-0.100	0.100
17	0.000	0.000
18	0.100	0.080
19	0.200	0.240
20	0.300	0.580
21	0.400	1.020
22	0.500	2.000
23	0.600	2.910
24	0.700	4.200
25	0.800	6.680
26	0.825	7.310
27	0.850	7.930
28	0.875	8.770
29	0.900	10.140
30	0.925	11.730
31	0.950	14.050
32	0.975	11.960
33	1.000	13.490

i	Расстояние от центра Луны в долях радиуса	$(2Q_i/R=0) \cdot 100\%$											$(2Q_i/R=0) \cdot 100\%$	σ, %
		13.04.79	15.06.79	17.06.79	20.06.79	21.06.79	24.06.79	25.06.79	28.06.79	01.07.79	01.12.77	20.06.84		
1	-1.000	0.443	3.965	1.409	1.900	3.105	2.204	4.298	1.400	2.145	0.894	1.608	2.125	0.349
2	-0.975	4.285	6.100	5.087	5.466	6.054	6.689	6.460	4.875	5.421	4.126	5.274	5.440	0.239
3	-0.950	6.395	6.983	6.215	7.073	6.469	7.687	6.974	6.447	6.872	5.601	6.387	6.646	0.158
4	-0.925	6.779	6.917	6.426	7.078	6.213	7.400	6.916	6.595	7.387	5.837	6.666	6.747	0.136
5	-0.900	6.792	6.699	6.451	6.433	6.029	7.023	6.614	6.532	7.394	5.714	6.642	6.596	0.136
6	-0.875	6.434	6.264	5.741	6.433	5.763	6.666	6.334	6.285	7.023	5.505	6.210	6.242	0.125
7	-0.850	6.041	5.783	5.445	6.149	5.358	6.369	5.994	5.636	5.810	5.037	6.591	5.837	0.131
8	-0.825	5.592	5.185	5.023	5.697	4.942	6.023	5.594	5.114	6.071	4.657	5.508	5.401	0.130
9	-0.800	5.087	4.741	4.689	5.198	4.600	5.586	5.191	4.878	5.527	4.284	4.998	4.980	0.113
10	-0.775	3.403	3.308	3.037	3.418	3.069	3.718	3.335	3.169	3.752	2.717	3.425	3.305	0.086
11	-0.600	2.441	1.909	1.986	2.181	1.904	2.327	2.024	1.958	2.085	1.796	2.120	2.039	0.043
12	-0.500	1.216	1.164	1.179	1.143	1.010	1.255	1.119	0.975	1.225	1.018	1.160	1.133	0.027
13	-0.400	0.601	0.414	0.544	0.485	0.433	0.522	0.418	0.367	0.464	0.422	0.572	0.477	0.021
14	-0.300	0.070	-0.087	0.040	0.010	-0.061	-0.107	-0.107	-0.045	-0.044	-0.036	0.154	0.031	0.021
15	-0.200	-0.322	-0.439	-0.333	-0.337	-0.335	-0.406	-0.398	-0.339	-0.412	-0.495	-0.222	-0.367	0.021
16	-0.100	-0.545	-0.561	-0.540	-0.618	-0.504	-0.629	-0.631	-0.608	-0.549	-0.683	-0.429	-0.572	0.020
17	0.000	-0.629	-0.681	-0.592	-0.682	-0.593	-0.744	-0.689	-0.654	-0.563	-0.779	-0.593	-0.654	0.020
18	0.100	-0.573	-0.602	-0.515	-0.585	-0.473	-0.668	-0.599	-0.586	-0.459	-0.691	-0.630	-0.580	0.021
19	0.200	-0.378	-0.345	-0.352	-0.367	-0.288	-0.424	-0.351	-0.414	-0.258	-0.372	-0.455	-0.364	0.016
20	0.300	-0.070	0.087	-0.040	-0.010	0.061	0.061	0.108	0.046	0.044	0.036	0.155	0.015	0.022
21	0.400	0.677	0.472	0.555	0.572	0.630	0.664	0.574	0.359	0.489	0.628	0.545	0.545	0.031
22	0.500	1.050	1.617	1.271	1.450	1.508	1.493	1.658	1.417	1.300	1.439	1.320	1.411	0.049
23	0.600	2.114	3.034	2.399	2.741	2.583	2.862	2.946	2.703	2.549	2.705	2.575	2.655	0.074
24	0.700	3.571	4.613	3.937	4.747	4.277	4.806	4.780	4.332	4.272	4.022	4.097	4.314	0.114
25	0.800	5.367	6.356	5.775	6.704	6.588	6.997	7.368	6.371	6.402	5.866	6.005	6.343	0.164
26	0.825	5.705	6.895	6.183	7.421	7.440	8.113	8.239	7.180	6.477	6.942	6.238	6.985	0.229
27	0.850	6.158	7.276	6.528	8.197	7.955	8.690	8.998	8.029	7.698	6.528	6.935	7.545	0.268
28	0.875	6.551	7.756	7.060	8.633	8.324	9.544	9.390	8.591	7.393	8.209	6.871	8.029	0.285
29	0.900	6.779	8.025	7.554	8.849	8.351	9.768	9.307	8.759	8.522	7.004	7.742	8.242	0.267
30	0.925	6.851	7.949	7.832	8.946	8.186	9.722	8.875	8.424	8.460	6.908	8.005	8.196	0.243
31	0.950	6.623	7.262	7.545	8.634	7.425	9.252	7.960	7.015	7.982	6.601	7.585	7.626	0.232
32	0.975	5.848	4.568	6.632	6.350	5.311	7.574	4.197	3.189	5.815	4.412	4.440	5.301	0.368
33	1.000	3.403	2.240	2.812	2.832	1.426	4.308	1.295	1.240	1.932	0.935	1.740	2.106	0.311

i	(2Q <sub>i</sub> /I <sub>i</sub> ) · 100 %												σ, %
	13.06.79	15.06.79	17.06.79	20.06.79	21.06.79	24.06.79	26.06.79	28.06.79	01.07.79	01.12.77	20.06.84	(2Q <sub>i</sub> /I <sub>i</sub> ) · 100 %	
1	8.196	15.515	7.045	7.237	8.461	6.043	71.562	10.245	18.769	4.859	14.230	15.651	5.467
2	13.493	14.262	13.094	11.790	11.648	12.636	25.013	14.269	15.526	11.211	22.150	15.008	1.284
3	12.131	12.828	11.697	12.059	10.790	12.192	15.908	13.481	13.531	12.869	13.410	12.718	0.390
4	10.670	11.420	10.320	10.921	8.872	10.663	12.380	11.416	12.248	10.892	12.070	10.170	0.881
5	9.665	10.049	8.944	9.690	8.013	9.783	10.991	9.831	10.588	9.525	10.460	9.776	0.233
6	8.429	8.876	7.791	8.466	7.302	8.852	9.089	8.966	9.298	8.340	9.130	8.594	0.175
7	7.575	7.707	7.057	7.619	6.489	8.082	8.050	7.726	8.173	7.328	7.960	7.597	0.145
8	6.839	6.715	6.324	6.842	5.812	7.264	7.110	6.536	7.109	6.329	7.240	6.738	0.130
9	6.074	5.969	5.777	6.040	5.295	6.547	6.380	6.019	6.306	5.608	6.310	6.030	0.105
10	3.648	3.817	3.474	3.729	3.345	4.064	3.689	3.543	3.981	3.233	3.950	3.679	0.076
11	2.207	2.402	2.193	2.323	2.009	2.474	2.154	2.087	2.160	2.031	2.300	2.185	0.138
12	1.216	1.240	1.262	1.197	1.051	1.305	1.172	1.026	1.237	1.116	1.250	1.188	0.026
13	0.601	0.431	0.572	0.502	0.447	0.538	0.432	0.384	0.467	0.451	0.590	0.492	0.021
14	0.070	-0.090	0.042	0.010	-0.063	-0.062	-0.109	-0.046	-0.044	-0.038	0.0160	-0.009	0.023
15	-0.322	-0.448	-0.343	-0.341	-0.340	-0.411	-0.403	-0.344	-0.440	-0.509	-0.230	-0.373	0.021
16	-0.545	-0.567	-0.540	-0.640	-0.509	-0.631	-0.635	-0.612	-0.551	-0.691	-0.430	-0.576	0.021
17	-0.629	-0.681	-0.592	-0.682	-0.593	-0.744	-0.689	-0.654	-0.563	-0.779	-0.593	-0.654	0.020
18	-0.573	-0.598	-0.509	-0.579	-0.469	-0.662	-0.595	-0.582	-0.458	-0.688	-0.620	-0.576	0.021
19	-0.378	-0.341	-0.346	-0.361	-0.285	-0.419	-0.348	-0.412	-0.236	-0.373	-0.440	-0.360	0.016
20	-0.070	0.086	-0.090	-0.010	0.060	0.060	0.106	0.046	0.044	0.036	-0.150	0.015	0.022
21	0.381	0.666	0.459	0.534	0.567	0.621	0.658	0.576	0.636	0.499	0.350	0.541	0.031
22	0.500	1.072	1.235	1.388	1.490	1.475	1.658	1.435	1.358	1.486	1.270	1.405	0.048
23	2.203	3.016	2.351	2.637	2.568	2.701	2.990	2.789	2.669	2.840	2.520	2.662	0.071
24	0.700	3.857	3.961	4.628	4.358	4.864	5.134	4.713	4.622	4.352	4.140	4.491	0.143
25	6.408	7.379	6.237	6.939	7.089	7.725	8.761	7.715	7.580	7.051	6.640	7.229	0.205
26	0.825	7.217	6.981	7.859	8.392	9.257	10.200	8.824	8.476	7.723	7.420	8.243	0.273
27	0.850	8.436	7.664	9.000	9.291	10.263	11.886	10.341	9.853	8.499	8.430	9.359	0.338
28	0.875	9.322	8.698	10.032	10.313	12.111	13.137	12.130	11.345	9.647	10.050	10.669	0.390
29	0.900	11.941	9.866	10.999	11.098	13.725	15.049	13.962	12.783	11.076	11.300	12.043	0.465
30	0.925	13.497	11.325	12.131	12.068	15.740	16.605	15.955	14.805	12.517	13.570	13.648	0.531
31	0.950	14.206	12.819	14.048	13.640	18.948	20.083	17.650	18.766	14.733	19.420	16.257	0.777
32	16.328	18.272	13.980	13.697	13.570	21.457	33.278	13.512	24.852	13.130	18.960	18.276	1.800
33	25.506	37.200	11.445	9.748	15.543	66.580	86.247	21.955	27.662	8.990	34.630	31.682	7.030

Т А Б Л И Ц А 6  
λ = 3.9 см

i	Расстояние от центра Луны в долях радиуса	(2Q <sub>i</sub> /I R = 0) · 100 %										$\frac{(2Q_i/I R = 0) \cdot 100 \%}{\sigma, \%}$	σ, %
		12.06.79	14.06.79	16.06.79	18.06.79	19.06.79	22.06.79	27.06.79	15.06.84	17.06.84			
1	-1.000	4.378	4.593	3.428	5.144	2.395	1.382	2.376	3.853	1.530	2.898	0.446	
2	-0.975	4.610	9.238	8.945	9.507	6.815	5.440	6.656	7.930	5.180	7.147	0.581	
3	-0.950	7.464	10.499	10.659	10.709	10.090	9.423	8.915	9.990	9.990	9.691	0.324	
4	-0.925	8.952	10.987	11.255	10.817	10.780	11.768	9.605	10.410	11.250	10.648	0.276	
5	-0.900	9.552	11.008	11.340	10.699	10.806	12.188	9.938	10.840	11.300	10.852	0.243	
6	-0.875	9.602	10.918	10.793	10.417	10.635	12.081	9.916	10.180	10.970	10.613	0.226	
7	-0.850	9.174	10.518	10.159	9.930	10.236	11.674	9.745	9.640	10.480	10.173	0.222	
8	-0.825	8.469	9.648	9.464	9.405	9.704	11.162	9.170	9.030	9.650	9.522	0.229	
9	-0.800	7.746	9.016	8.772	9.042	9.375	10.485	8.364	8.190	8.900	8.877	0.246	
10	-0.700	5.444	6.128	6.293	5.792	3.932	7.263	5.756	4.940	5.660	5.690	0.289	
11	-0.600	2.872	3.376	3.734	3.487	1.738	3.967	3.112	1.850	2.700	2.982	0.245	
12	-0.500	1.068	1.125	1.639	1.430	0.037	1.440	1.079	-0.120	0.360	0.784	0.217	
13	-0.400	-0.454	-0.536	-0.147	-0.289	-0.463	-0.546	-0.426	-1.670	-1.320	-0.650	0.158	
14	-0.300	-1.522	-1.894	-1.627	-1.676	-1.644	-2.081	-1.784	-2.775	-2.440	-2.000	0.132	
15	-0.200	-2.352	-2.960	-2.252	-2.789	-3.053	-3.299	-2.730	-3.658	-3.350	-2.938	0.145	
16	-0.100	-2.805	-3.544	-3.359	-3.125	-2.724	-4.022	-3.416	-3.852	-3.810	-3.409	0.144	
17	0.000	-3.471	-3.859	-3.691	-3.950	-3.085	-4.548	-3.678	-4.045	-4.060	-3.787	0.142	
18	0.100	-3.086	-3.650	-3.619	-3.844	-3.016	-4.421	-3.583	-3.872	-3.830	-3.658	0.133	
19	0.200	-2.685	-3.215	-3.218	-3.303	-2.712	-3.841	-3.077	-3.485	-3.450	-3.221	0.115	
20	0.300	-2.076	-2.342	-2.557	-2.559	-1.872	-2.698	-2.183	-2.755	-2.880	-2.436	0.106	
21	0.400	-1.008	-1.367	-1.401	-1.335	-0.640	-1.390	-1.104	-1.240	-1.930	-1.268	0.110	
22	0.500	0.514	0.548	0.209	0.424	1.083	0.626	0.498	0.120	-0.350	0.407	0.124	
23	0.600	2.304	3.002	2.619	2.794	3.416	4.899	2.655	2.540	1.710	2.883	0.279	
24	0.700	4.550	5.529	5.411	5.927	6.855	9.355	5.290	5.310	4.550	5.864	0.465	
25	0.800	6.953	9.250	8.445	9.212	9.748	11.972	8.542	8.950	7.880	8.995	0.437	
26	0.825	7.668	10.158	9.339	9.969	10.642	9.230	12.484	9.790	9.030	9.812	0.412	
27	0.850	8.356	11.025	9.976	10.554	11.313	12.865	10.071	10.360	10.100	10.513	0.381	
28	0.875	8.576	11.650	10.532	11.038	11.763	12.984	11.090	10.930	10.740	11.034	0.370	
29	0.900	8.698	11.807	10.695	11.367	11.984	13.000	11.419	11.330	10.990	11.254	0.366	
30	0.925	8.603	11.690	10.528	11.297	12.091	12.610	11.572	11.060	10.260	11.090	0.371	
31	0.950	8.010	10.362	9.513	10.661	11.686	11.289	11.190	8.910	8.490	10.012	0.418	
32	0.975	6.957	7.444	6.989	7.070	9.938	6.600	10.000	6.330	3.890	7.246	0.583	
33	1.000	4.447	2.783	3.100	2.691	5.415	1.579	4.959	3.740	1.280	3.383	0.450	

i	(2Q <sub>i</sub> /R = 0) · 100 %													σ, %			
	Дата наблюдения																
	01.06.79	02.06.79	11.06.79	13.06.79	14.06.79	15.06.79	16.06.79	17.06.79	18.06.79	19.06.79	20.06.79	21.06.79	22.06.79		30.06.79	01.07.79	
Расстояние от центра для радиуса														(2Q <sub>i</sub> /R = 0) × 100 %			
1	4.669	3.105	4.180	5.786	3.885	2.823	2.894	4.874	5.415	4.300	5.895	2.812	2.455	3.644	5.602	4.156	0.296
2	0.975	6.460	7.060	9.302	6.031	4.702	5.337	7.857	7.075	7.786	8.741	5.302	4.828	5.231	8.440	6.539	0.388
3	0.950	9.687	9.930	11.241	9.102	8.025	7.624	9.426	9.327	9.665	10.915	7.327	6.988	6.324	9.854	8.901	0.355
4	0.925	10.893	9.210	11.430	11.867	10.408	8.952	10.503	10.328	10.796	11.000	9.643	9.458	7.653	11.252	10.263	0.275
5	0.900	10.860	10.130	12.621	10.990	11.096	9.821	10.971	10.450	10.927	11.086	10.274	10.187	7.690	11.272	10.709	0.280
6	0.875	10.930	11.020	12.247	11.022	11.370	10.058	10.907	10.514	10.802	10.757	10.629	10.558	7.383	11.031	10.796	0.281
7	0.850	10.660	11.730	11.804	10.737	10.944	9.893	10.760	10.125	10.374	10.305	10.460	10.214	6.904	10.351	10.399	0.275
8	0.825	10.040	10.960	11.081	10.142	10.442	9.419	9.875	9.326	9.866	9.817	10.067	9.673	6.399	9.587	9.775	0.262
9	0.800	9.200	9.511	9.880	9.687	9.990	8.818	9.127	8.620	9.215	9.159	9.427	9.185	5.967	8.753	9.061	0.234
10	0.700	5.570	6.010	6.040	5.719	6.681	5.486	6.190	4.860	5.342	6.035	6.044	5.989	3.974	5.656	5.767	0.176
11	0.600	2.050	2.390	2.506	2.868	3.739	2.928	2.910	1.764	2.170	2.988	2.818	2.762	1.474	2.349	2.550	0.139
12	0.500	-0.510	-0.530	-0.809	-0.267	0.475	-0.062	0.107	-0.653	-0.389	0.116	-0.312	-0.155	-0.294	-0.376	-0.269	0.082
13	0.400	-3.835	-3.182	-2.885	-3.011	-2.389	-1.694	-1.904	-2.906	-2.685	-2.582	-2.217	-2.207	-2.034	-2.833	-2.560	0.142
14	0.300	-4.620	-5.050	-4.370	-4.549	-3.606	-3.674	-3.834	-4.660	-4.820	-3.995	-3.826	-3.853	-3.399	-4.670	-4.216	0.126
15	0.200	-5.940	-6.430	-5.700	-5.777	-5.559	-4.915	-5.114	-5.983	-6.049	-5.331	-5.162	-4.961	-4.400	-5.493	-5.493	0.139
16	0.100	-6.630	-7.360	-6.516	-6.648	-5.970	-5.795	-6.091	-6.775	-7.132	-6.210	-5.979	-5.784	-5.044	-6.843	-6.336	0.148
17	0.000	-6.930	-7.581	-6.283	-6.687	-6.294	-6.006	-6.373	-7.020	-7.448	-6.644	-6.287	-6.004	-5.272	-7.132	-6.575	0.150
18	0.100	-6.430	-6.721	-6.317	-6.364	-6.090	-5.815	-6.151	-6.785	-7.193	-6.472	-6.199	-5.895	-4.971	-6.605	-6.254	0.129
19	0.200	-5.550	-5.900	-5.160	-5.431	-5.220	-5.077	-5.352	-5.851	-6.299	-4.904	-5.307	-5.101	-4.242	-5.684	-5.369	0.120
20	0.300	-4.075	-4.345	-3.710	-3.926	-4.145	-3.931	-3.786	-4.440	-4.995	-4.519	-4.095	-4.262	-3.098	-4.347	-4.143	0.107
21	0.400	-2.220	-2.340	-1.730	-1.926	-2.513	-2.178	-2.358	-2.258	-3.002	-2.788	-2.374	-2.438	-1.583	-2.232	-2.232	0.090
22	0.500	-0.530	0.440	0.811	0.269	-0.475	0.062	-0.107	0.653	0.389	-0.115	0.312	0.153	0.296	0.716	0.335	0.088
23	0.600	4.490	3.880	5.036	3.952	3.790	3.390	3.092	3.964	4.009	3.101	3.849	3.868	2.720	3.893	3.826	0.145
24	0.700	7.340	7.680	8.269	8.063	7.524	6.764	7.209	7.852	7.855	6.791	7.672	8.005	5.376	7.450	7.451	0.180
25	0.800	11.140	11.460	11.401	11.406	10.476	10.307	10.171	11.504	11.613	10.562	11.363	11.639	8.342	10.527	10.879	0.217
26	0.825	12.020	12.420	12.380	11.961	11.219	10.753	10.826	12.194	12.533	10.989	11.780	12.635	8.766	11.177	11.572	0.250
27	0.850	12.800	12.680	12.149	12.376	11.382	11.193	11.412	12.468	13.196	11.837	12.169	13.355	9.304	11.917	12.087	0.254
28	0.875	13.160	12.710	12.950	11.608	11.446	11.526	11.665	12.521	13.391	12.077	12.014	13.813	9.485	12.246	12.193	0.258
29	0.900	13.090	12.040	11.396	11.683	11.363	11.645	11.694	12.313	13.424	12.123	11.858	13.832	9.563	12.267	12.074	0.253
30	0.925	12.580	10.360	10.763	11.980	10.942	11.387	11.618	11.376	13.015	12.160	13.307	13.183	9.357	12.129	11.676	0.266
31	0.950	11.850	7.490	8.834	10.313	10.496	9.932	11.185	10.002	12.137	11.877	9.337	11.591	9.033	11.418	10.448	0.336
32	0.975	9.420	4.660	5.706	7.777	8.188	8.289	10.222	6.430	10.445	10.661	7.117	8.487	7.860	9.088	8.170	0.424
33	1.000	6.806	2.340	3.216	5.372	5.108	5.370	7.286	3.359	6.561	6.805	4.231	5.088	4.950	6.695	5.271	0.369

ТАБЛИЦА 8  
λ = 13.0 см

i	$(2Q_i/I R = 0) \cdot 1 (\%)$					$(2Q_i/I R = \tau) \cdot 100 (\%)$	σ, %
	08. 6.84	10. 6.84	15.06.84	16. 6.84	20.06.84		
1	5.280	4.400	5.900	5.940	4.250	5.154	0.359
2	6.170	5.920	7.450	7.620	5.260	6.484	0.455
3	7.800	7.440	8.230	8.720	6.450	7.728	0.385
4	8.270	7.950	9.220	9.240	6.860	8.308	0.443
5	8.750	8.050	9.410	9.600	6.880	8.538	0.496
6	8.450	7.790	9.500	9.130	6.670	8.308	0.503
7	8.150	7.530	9.000	9.020	6.300	8.010	0.514
8	7.650	6.980	8.800	8.520	5.980	7.586	0.515
9	7.120	6.600	8.020	8.050	5.440	7.046	0.487
10	5.260	4.690	5.340	5.300	3.870	4.892	0.282
11	2.190	1.870	2.390	2.250	1.850	2.110	0.107
12	0.190	-0.084	-0.147	-0.527	-0.169	-0.223	0.078
13	-1.735	-1.805	-2.160	-2.360	-1.730	-1.958	0.128
14	-3.440	-3.330	-3.780	-3.760	-3.110	-3.484	0.128
15	-4.720	-4.370	-4.880	-5.300	-4.050	-4.664	0.214
16	-5.160	-5.080	-5.600	-6.100	-4.370	-5.262	0.288
17	-5.600	-5.100	-4.970	-6.470	-4.820	-5.392	0.300
18	-4.980	-4.760	-5.800	-6.120	-4.520	-5.236	0.309
19	-4.750	-4.080	-5.250	-5.000	-3.780	-4.578	0.278
20	-3.4600	-2.720	-4.170	-4.010	-2.880	-3.448	0.291
21	-2.150	-1.655	-2.210	-2.120	-1.660	-1.961	0.123
22	0.180	0.074	0.147	0.515	0.158	0.215	0.077
23	2.600	2.345	3.060	3.145	2.820	2.894	0.147
24	5.600	5.000	6.350	6.940	4.950	5.770	0.386
25	8.800	7.400	9.260	9.600	7.130	8.268	0.485
26	8.880	7.620	9.680	10.050	7.200	8.680	0.558
27	9.200	7.750	9.500	10.200	7.020	8.694	0.604
28	8.720	7.400	9.250	9.800	6.870	8.408	0.553
29	8.500	6.260	9.060	9.100	6.400	7.864	0.636
30	6.950	5.070	7.200	7.100	5.720	6.408	0.428
31	5.550	3.230	5.450	5.220	4.130	4.716	0.449
32	3.680	1.890	4.150	3.340	3.070	3.226	0.380
33	2.380	1.150	2.420	2.220	2.100	2.054	0.233

ТАБЛИЦА 9  
λ = 31.3 см

i	Расстояние от центра Луны в долях радиуса	$(2Q_i/I R = 0) \cdot 100 (\%)$	
		1985 г.	июнь, ср.
1	-1.000	5.952	5.952
2	-0.975	7.698	7.698
3	-0.950	7.531	7.531
4	-0.925	7.917	7.917
5	-0.900	8.669	8.669
6	-0.875	8.467	8.467
7	-0.850	9.459	9.459
8	-0.825	8.547	8.547
9	-0.800	8.331	8.331
10	-0.700	5.971	5.971
11	-0.600	1.821	1.821
12	-0.500	-1.322	-1.322
13	-0.400	-3.404	-3.404
14	-0.300	-4.799	-4.799
15	-0.200	-6.249	-6.249
16	-0.100	-6.563	-6.563
17	0.000	-6.550	-6.550
18	0.100	-6.093	-6.093
19	0.200	-4.517	-4.517
20	0.300	-3.077	-3.077
21	0.400	-1.053	-1.053
22	0.500	0.590	0.590
23	0.600	3.578	3.578
24	0.700	6.734	6.734
25	0.800	9.900	9.900
26	0.825	10.028	10.028
27	0.850	9.859	9.859
28	0.875	8.646	8.646
29	0.900	8.359	8.359
30	0.925	8.285	8.285
31	0.950	7.878	7.878
32	0.975	7.351	7.351
33	1.000	6.591	6.591



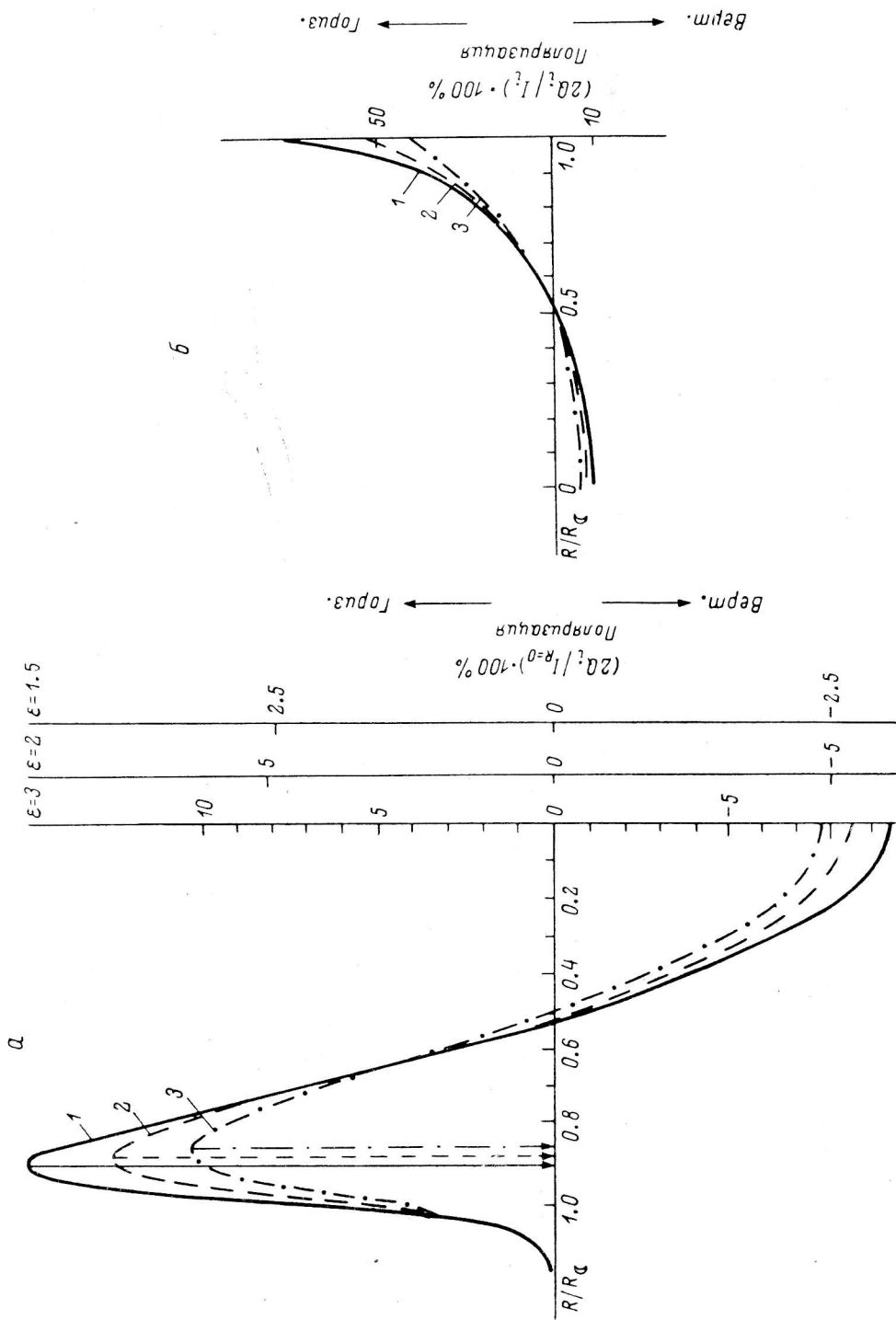


Рис. 3. Ожидаемое одномерное распределение параметров по диску Луны на волне 8.2 см.  
 а — параметр  $2Q_i/I_{R=0}$  для различных значений диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ . Масштаб по оси ординат для значений  $\epsilon=1.5, 2, 3$  показан справа. По оси абсцисс — расстояние до центра диска в единицах радиуса Луны. 1 — отсутствие рассеяния ( $\theta=0$ ); 2 —  $\theta=20^\circ$ ; 3 —  $\theta=30^\circ$ . Вертикальными стрелками отмечено положение максимумов горизонтальной поляризации на соответствующих кривых; б — параметр  $2Q_i/I_i$  для  $\epsilon=3$ .

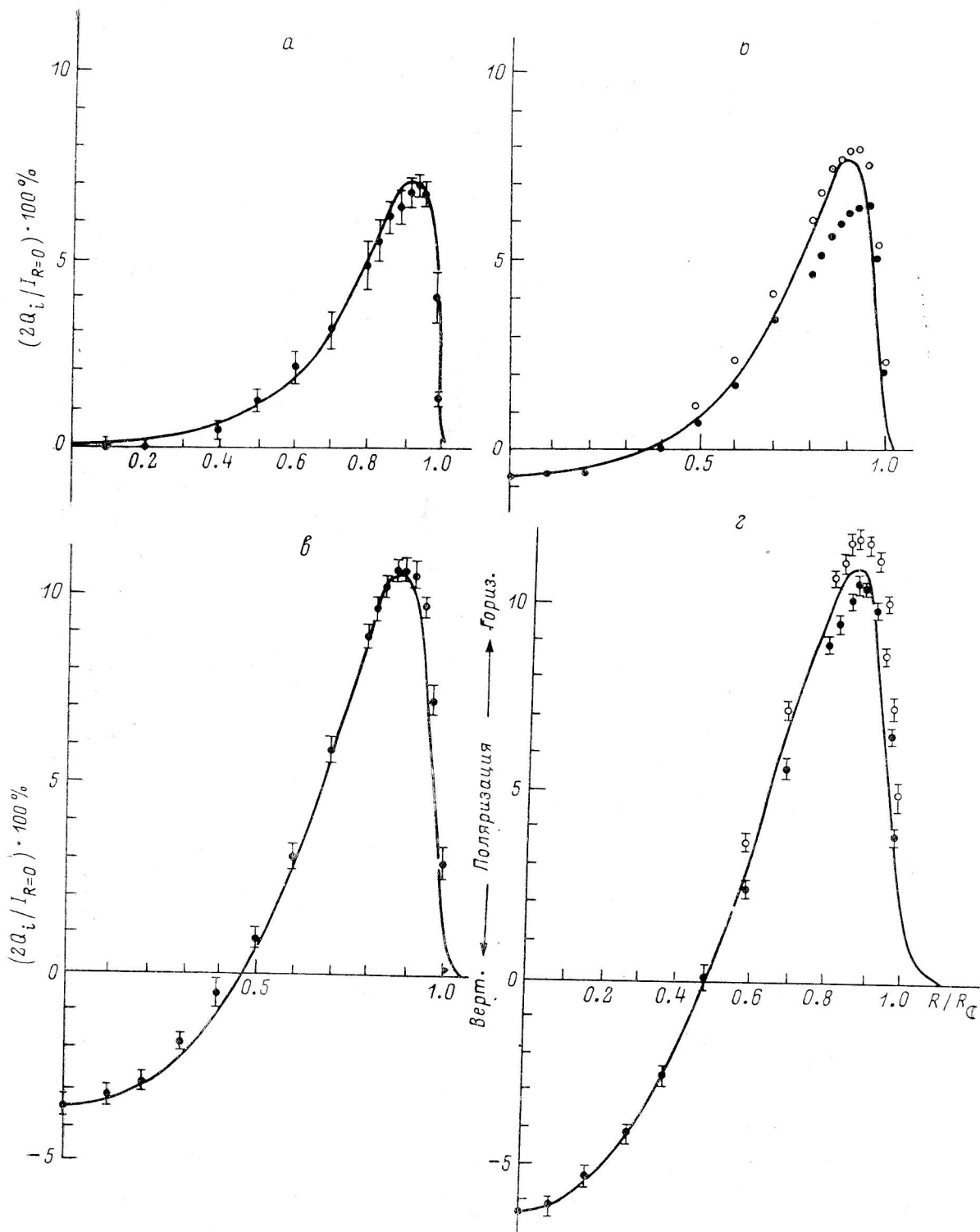


Рис. 4 (см. продолжение).

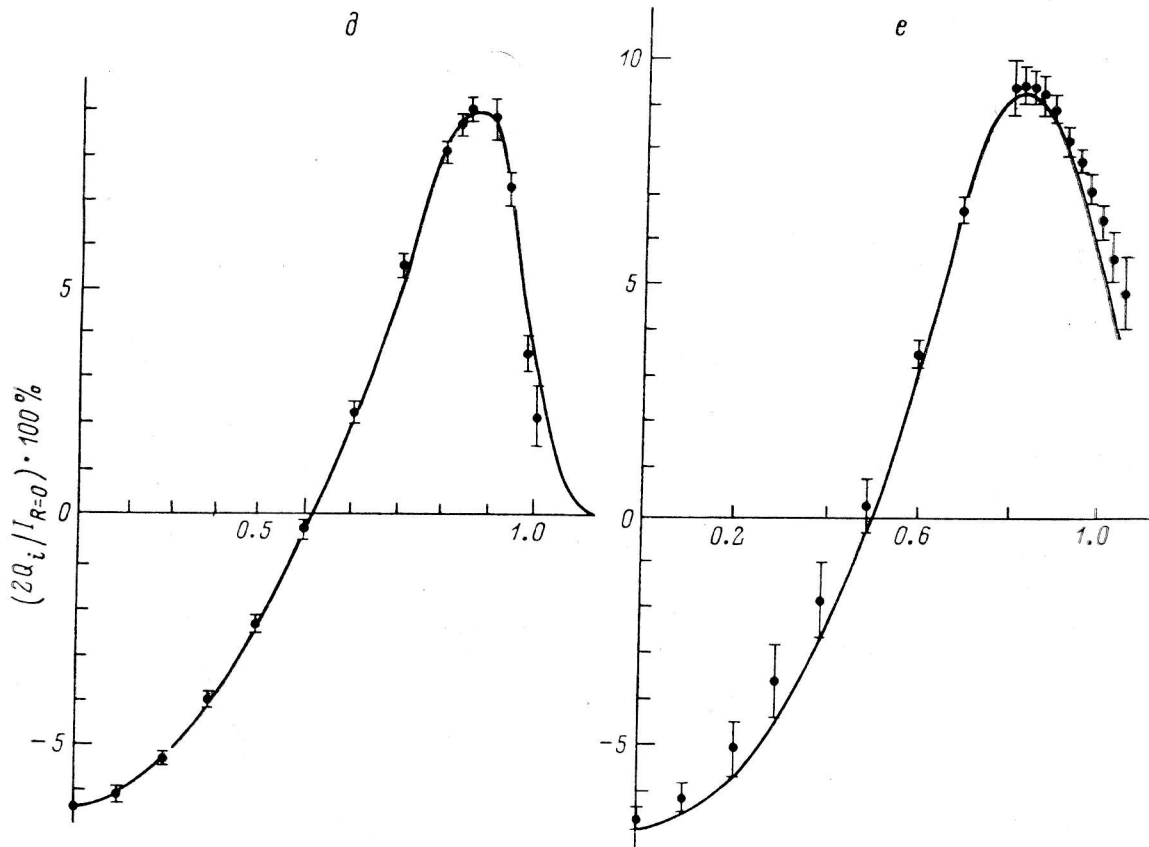


Рис. 4. Расчетное одномерное распределение параметра  $2Q_i/I_{R=0}$  по диску Луны на различных длинах волн, наилучшим образом совпадающее с экспериментальными данными (• — экспериментальные данные, средние по западному и восточному краям Луны). По оси абсцисс — расстояние от центра диска в единицах радиуса Луны.

а —  $\lambda=1.38$  см,  $\epsilon=1.5$ , угол рассеяния  $25^\circ$ ; б —  $\lambda=2.08$  см,  $\epsilon=1.6$ , угол рассеяния  $20^\circ$  (• — экспериментальные данные по западному и ○ — по восточному краю Луны); в —  $\lambda=3.9$  см,  $\epsilon=2.2$ , угол рассеяния  $20^\circ$ ; г —  $\lambda=8.2$  см,  $\epsilon=2.6$  с учетом потемнения к полюсам по закону  $\cos^{1/4} \varphi$  (где  $\varphi$  — широта места на Луне), угол рассеяния  $20^\circ$  (• — экспериментальные данные по западному и ○ — по восточному краю Луны); д —  $\lambda=13$  см,  $\epsilon=2.45$  с учетом потемнения к полюсам по закону  $\cos^{1/4} \varphi$ , угол рассеяния  $20^\circ$ ; е —  $\lambda=31.3$  см,  $\epsilon=3.1$  с учетом потемнения к полюсам по закону  $\cos^{1/4} \varphi$ , угол рассеяния  $20^\circ$ .

$Q_i$ ), а кривую процента поляризации, отнесенную к интенсивности в каждой точке кривой прохождения  $2Q_i/I_i$ . В этом случае можно пользоваться и оди-  
 ночным наблюдением при любой фазе Луны. После устранения перечисленных  
 выше эффектов, мы считаем, наши данные отягощены только случайными по-  
 грешностями. Окончательные результаты наблюдений сведены в табл. 2—9.  
 Там же приведены значения среднего процента поляризации, полученного

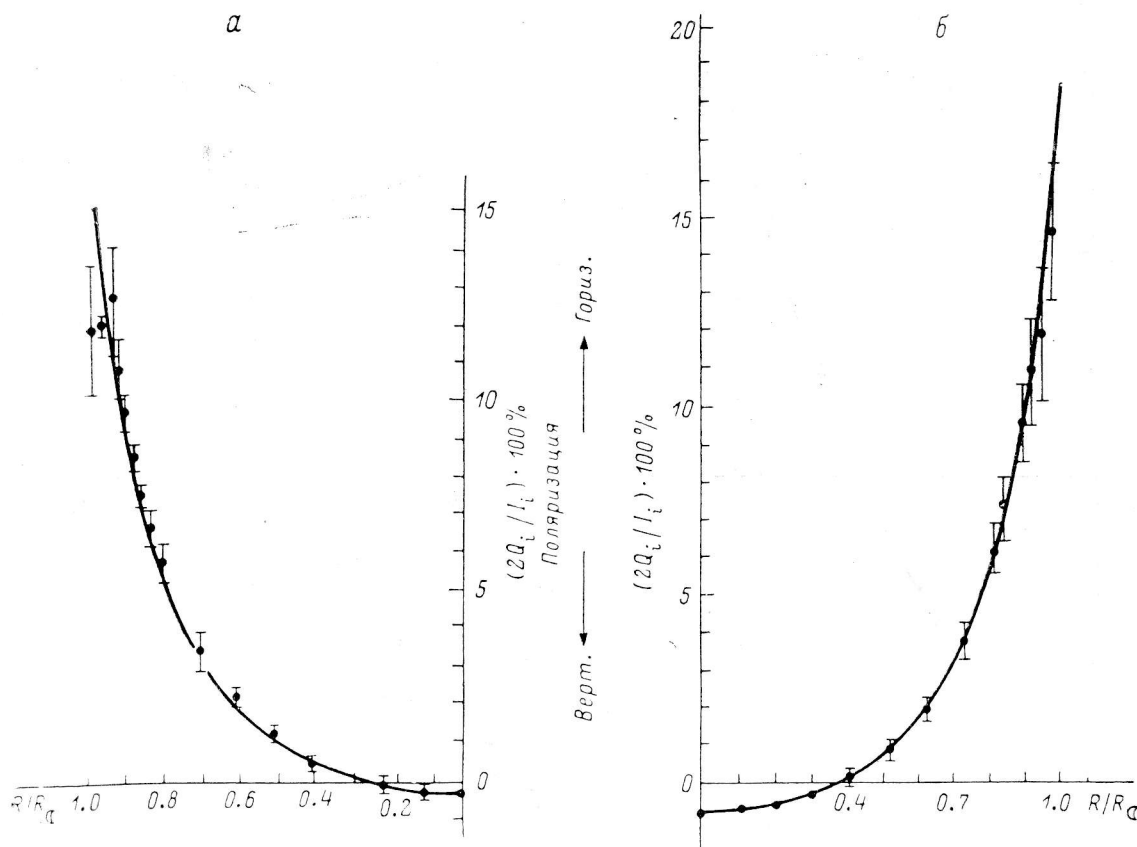


Рис. 5. Расчетное одномерное распределение параметра  $(2Q_i/I_i) \cdot 100\%$  по диску Луны, наилучшим образом совпадающее с экспериментальными данными.

Точками показаны экспериментальные данные, средние по западному и восточному краям Луны. По оси абсцисс — расстояние от центра диска в единицах радиуса Луны. а —  $\lambda=1.38$  см,  $\epsilon=1.5$ , угол рассеяния  $25^\circ$ ; б —  $\lambda=2.08$  см,  $\epsilon=1.6$ , угол рассеяния  $20^\circ$ .

в каждой точке кривой прохождения Луны и среднеквадратические погрешности в определении среднего  $\sigma$ .

Для определения значения диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и степени неоднородности из наблюдений для каждой волны подбиралось ожидаемое распределение поляризованного излучения с учетом  $\epsilon$ , неоднородности поверхности и диаграммы направленности. Мы считаем, следуя Троицкому [4], что неоднородность определяется отклонением нормали данного участка поверхности от нормали к гладкой сфере и коэффициент отражения зависит только от  $\epsilon$  и угла между нормалью к поверхности и направлением на наблюдателя, причем нормаль к участку поверхности может равновероятно отклоняться от нормали к гладкой сфере на любой угол меньше некоторого максимального угла  $\theta$ .

Подробно метод расчета такой модели рассмотрен в [18]. Вычисления проводились на настольном микрокалькуляторе HP9825. На рис. 3 приведены результаты таких вычислений для волны 8.2 см. Из общих соображений следует, что потемнение к полюсам должно приводить к тому же эффекту, что и сужение вертикальной диаграммы направленности, т. е. к уменьшению про-

цента поляризации в центре кривой прохождения. Изменение (уменьшение) величины  $\epsilon$ , так же как и увеличение степени шероховатости (неоднородности) поверхности, т. е. увеличение  $\theta$ , приводит к уменьшению процента поляризации как на краях кривой прохождения (горизонтальная поляризация), так и в центре (вертикальная поляризация). Однако при изменении степени шероховатости максимумы горизонтальной поляризации по краям кривой смещаются: при увеличении  $\theta$  — к центру, а при уменьшении  $\theta$  — к краю.

На рис. 4 приведены расчетные одномерные распределения параметра  $2Q_i/I_{R=0}$  по диску Луны на различных длинах волн.

На рис. 5 представлены расчетные одномерные распределения параметра  $2Q_i/I_i$  ( $i$  — номер точки одномерного распределения радиоизлучения по диску Луны). На те же рисунки нанесены экспериментальные данные со среднеквадратической погрешностью. Значения величин  $\epsilon$  и  $\theta$ , полученные из сравнения расчетных и экспериментальных данных для каждой волны, приведены в табл. 10.

**Обсуждение результатов.** Из приведенной табл. 10 и рис. 4 прежде всего видно, что из наземных наблюдений не следует зависимость эффективного угла рассеяния (наклона нормалей  $\theta$ ) от длины волны. Поэтому нет оснований приписывать изменение эффективного значения  $\epsilon$  от длины волны эффекту широкого рассеяния. Мы считаем, что наши многочастотные наблюдения и модельные расчеты достаточно однозначно говорят о реальных изменениях свойств приповерхностного слоя с глубиной. Даже на волне 1.38 см увеличение  $\theta$  трудно считать реальным. Косвенным подтверждением вывода малой частотной зависимости рассеяния от  $\lambda$  является наличие ощутимой поляризации на волне 1.2 мм [4], которая должна была бы исчезнуть при широком рассеянии на приповерхностных неоднородностях.

Следуя Зоммерфельду [3], мы считаем, что формулы Френеля дают эффективное значение  $\epsilon$ , осредненное по глубине  $\sim 0.25\lambda$ . Поэтому, учитывая слабую (или отсутствие таковой) зависимость рассеяния от  $\lambda$ , мы полагаем, что рис. 6 отражает зависимость  $\epsilon$  от глубины в интервале глубин от  $\sim 3$  мм до  $\sim 6$  см.

Как показали многочисленные наземные и космические эксперименты [19, 20], диэлектрическая проницаемость в широком интервале плотностей пропорциональна плотности грунта  $\rho$ :

$$\epsilon = (1.93 \pm 0.07)\rho.$$

Таким образом, из наших измерений мы имеем сведения о средней по Луне зависимости плотности грунта от глубины в приповерхностном слое (рис. 7). На этот рисунок мы нанесли данные, полученные на РАТАН-600, и данные прямых проб («Аполлоны»), а также значения плотности грунта, полученные по анализу изменений верхнего покрова Луны под действием механизмов и конструкций аппаратов «Луны-13», луноходов, «Сервейеров» и «Аполлонов» (незаполненные кружки) (данные взяты из обзора Крупенио [6]). Прежде всего бросается в глаза существование резкой границы на глубине  $(4 \pm 1)$  см, ниже которой плотность почти постоянна (как следует из прямых измерений до глубины более 2 м [6]). И наоборот, в верхнем слое, до 4 см, плотность быстро меняется. Хотя точность наших измерений недостаточна для установления закона изменения плотности, мы не видим противоречия ни с моделями Матвеева и др. [7, 8], ни с прямыми измерениями зависимости плотности  $\rho$  от глубины. Согласие между данными РАТАН-600 и данными «проб» с «Аполлонов» и других космических аппаратов (прямых измерений 2, косвенных — 6) в приповерхностном слое (рис. 7) прекрасное. Измеренная командой «Аполлона-12» плотность грунта на глубине 5 см в пределах 10 % совпадает со средней плотностью лунного грунта на этой глубине по данным дециметровых наблюдений на РАТАН-600. Вторая точка («проба с поверхности» [6]) дает на 30 % большее

ТАБЛИЦА 10

Длина волны, см	$\epsilon$	$\theta$
1.38	$1.5 \pm 0.05$	20—30°
2.08	$1.6 \pm 0.05$	20
3.9	$2.2 \pm 0.1$	20
8.2	$2.6 \pm 0.1$	20
13	$2.45 \pm 0.15$	20
31.3	$3.0 \pm 0.1$	20

значение, чем наши наблюдения на глубине 3—5 мм. Возможно, это связано с неопределенностью термина «поверхность» в публикациях по программе «Аполлон», а не с реальным отклонением локальных данных от средних.

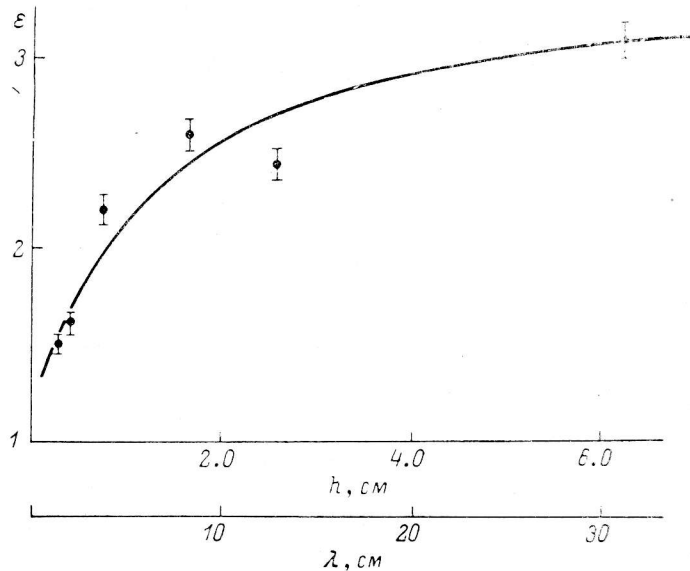


Рис. 6. Экспериментальная зависимость диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  от длины волны  $\lambda$  или от глубины  $h$  приповерхностного слоя Луны.

По оси абсцисс — длина волн  $\lambda$  и шкала глубин в предположении, что определяемые величины  $\epsilon$  являются эффективными значениями для слоя толщиной  $\sim 0.25\lambda$ .

В табл. 11 мы привели значения процентов поляризации  $(2Q_i/I_i) \cdot 100\%$  на волне 2.08 см для некоторого участка Луны, близкого к краю диска, и для различных значений температуры на поверхности Луны (вследствие различной

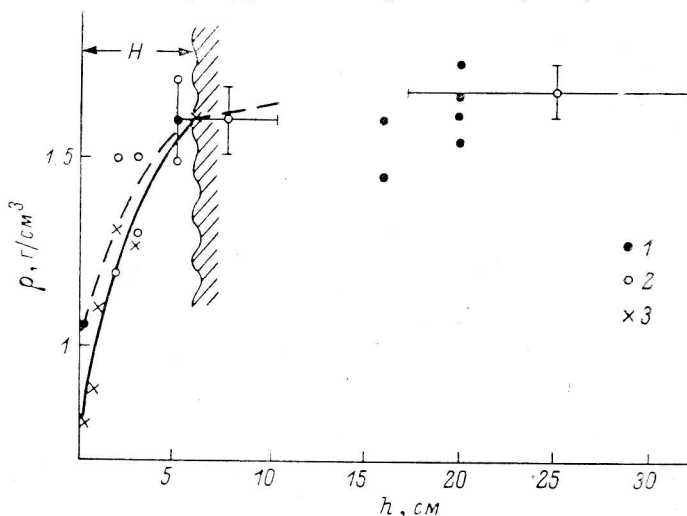


Рис. 7. Зависимость плотности приповерхностного слоя Луны  $\rho$  от глубины  $h$ .

По оси абсцисс — глубина, по оси ординат — плотность; 1 — прямые измерения («Аполлоны»); 2 — измерения по деформации грунта под тяжестью космических аппаратов; 3 — значения по наблюдениям на РАТАН-600;  $H$  — глубина приповерхностного слоя, где  $\epsilon$  и  $\rho$  быстро меняются с глубиной.

фазы Луны), а также ожидаемые проценты поляризации этого участка для различных  $\epsilon$ . Как видно из этой таблицы, в пределах ошибок зависимости значения от температуры поверхности не обнаружено, как и следовало ожидать по работам [21].



**Заключение.** Кратко сформируем полученные результаты.

1. Показано, что наблюдаемая зависимость процента поляризации собственного излучения Луны от длины волны определяется реальным изменением диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  в тонком приповерхностном слое.

2. В среднем на обращенной к нам поверхности Луны толщина приповерхностного слоя составляет 4—6 см, что находится в хорошем согласии с прямыми измерениями в отдельных точках.

3. Среднее значение плотности на этой глубине в пределах 10 % совпадает с данными «Аполлона-12».

4. Величина  $\epsilon$  в приповерхностном слое не меняется в пределах ошибок при колебаниях температуры поверхности от 90 К до 360 К.

ТАБЛИЦА 11

Наблюдения		Расчет	
$T, K,$ поверх- ности	$(2Q_i/I_i) \cdot 100 \%$	$\epsilon$	$(2Q_i/I_i) \cdot 100 \%$
90	9.950		
95	9.861	1.5	9.5
100	9.364	1.6	11.7
105	12.833	1.7	14.0
110	11.076		
115	10.049		
120	9.525		
130	10.830		
140	9.665		
180	9.831		
320	10.588		
360	12.783		
Среднее $10.910 \pm 0.461$			

Следует отметить, что измерение поляризации собственного радиоизлучения планет и их спутников как с помощью крупных наземных радиотелескопов, так и с борта космического корабля в широком диапазоне волн позволяет очень надежно определить среднюю глубину приповерхностного слоя и его свойства, что очень важно для оценки упругих свойств почвы при посадке космических аппаратов.

В дальнейшем мы предполагаем с помощью поляризационного картографирования Луны уточнить сведения о приповерхностном слое различных геологических образований.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность Н. Е. Гольневой за большой объем вычислений на НР9825, Ю. Н. Парийскому за полезные обсуждения, С. И. Абаневу, А. Б. Берлину, Н. А. Нижельскому за разработку специальных калибровочных устройств для поляризационных измерений.

#### Литература

1. Т р о и ц к и й В. С. К теории радиоизлучения Луны. — Астрон. журн., 1954, 31, вып. 6, с. 511—528.
2. С о б о л е в а Н. С. Измерение поляризации радиоизлучения Луны с помощью Большого пулковского радиотелескопа. — Астрон. журн., 1962, 39, вып. 6, с. 1124—1126.
3. З о м м е р ф е л ь д А. Отражение и преломление света. — В кн.: Оптика. М.: ИЛ, 1953, с. 17—85.
4. S l e g g P. E., C a r t e r B. S. Measurements of Lunar radiation in the wavelength range centered at 1.2 mm. — M. N., 1970, 148, N 3, p. 261—274.
5. N a g i o r s T. Microwave studies of thermal emission from the Moon. — Advances in Astronomy and Astrophysics, 1971, 8, p. 1—28.
6. К р у п е н и о Н. Н. Радиоисследования Луны и планет земной группы. — В кн.: Итоги науки и техники. М.: ВИНТИ, 1980, 16, с. 3—184.
7. М а т в е е в Ю. Г., С у ч к и н Г. Л., Т р о и ц к и й В. С. Об изменении плотности лунита в глубину в приповерхностном слое. — Астрон. журн., 1965, 42, вып. 4, с. 810—816.

8. М а т в е е в Ю. Г. Структура верхнего отражающего слоя Луны. — Астрон. журн., 1970, 47, № 4, с. 885—889.
9. Радиотелескоп РАТАН-600/С. Э. Хайкин, Н. Л. Кайдановский, Ю. Н. Парийский, Н. А. Есепкина. — Изв. ГАО, 1972, № 188, с. 3—12.
10. О п р е д е л е н и е поляризационных характеристик радиотелескопа РАТАН-600 с учетом абберраций при наблюдении на горизонте / Н. А. Есепкина, Н. С. Бахвалов, Б. А. Васильев и др. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1982, 15, с. 151—160.
11. Б о р о в и к В. Н. Радиохарактеристики спокойного Солнца в диапазоне 2—4 см по наблюдениям на РАТАН-600. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1981, 13, с. 17—29.
12. Т е м и р о в а А. В. Экспериментальное исследование диаграммы направленности южного сектора с перископическим зеркалом РАТАН-600. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1985, 19, с. 56—70.
13. К о р о л ь к о в Д. В., С о б о л е в а Н. С., Г е л ь ф р е й х Г. Б. Исследование локальных областей радиоизлучения Солнца по поляризационным наблюдениям в сантиметровом диапазоне волн. — Изв. ГАО, 1960, 21, № 164, вып. 5, с. 81—113.
14. M i p p e t Н. С., T h o m a s В., M a s А. A method of synthesizing a radiation pattern with axial symmetry. — IEEE Trans. Antennas Propagat., 1966, vol. AP-14, p. 654—656.
15. А б р а м о в В. И., Б е л о в И. Ф. Излучатель с переключением поляризации. Авт. свидетельство СССР № 1023982. — Бюл. изобретений, 1984, № 20, 210.
16. П а р и й с к и й Ю. Н. Контроль параметров антенны по радиоастрономическим наблюдениям. — Изв. ГАО, 1972, № 188, с. 149—151.
17. И с с л е д о в а н и е 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.
18. С о б о л е в а Н. С. Поляризация теплового радиоизлучения Луны и планет. — Изв. ГАО, 1967, 24, № 182, вып. 6, с. 206—208.
19. К р о т и к о в В. Д. Некоторые электрические характеристики земных пород и их сравнение с характеристиками поверхностного слоя Луны. — Изв. вузов. Радиофизика, 1962, 5, № 6, с. 1057—1061.
20. O l h o e f t G. R., S t r a n g w a y D. W. Dielectric properties of the first 100 meters of the Moon. — Earth. a. Planet. Sci. Letters, 1975, 24, p. 394—404.
21. E l e c t r i c a l properties of lunar soil-dependence of frequency, temperature and moisture / D. W. Strangway, G. R. Olhoeft, W. B. Chapman et al. — Earth. a. Planet. Sci. Letters, 1976, 16, N 2, p. 275—281.

Поступила в редакцию 14.03.85