

УДК 523.164.32

## ЯРКОСТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА «СПОКОЙНОГО» СОЛНЦА В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

С. А. Пелюшенко

Представлены результаты перекалибровки имеющихся в литературе данных измерений яркостной температуры Солнца, выполненных сравнением с радиоизлучением Луны, и получен спектр радиоизлучения «спокойного» Солнца в диапазоне 1—20 мм, среднеквадратичный разброс данных в котором не превышает  $\pm(3-4)\%$

Исследования миллиметровой части спектра радиоизлучения Солнца представляют большой интерес при изучении физических параметров нижней хромосферы, при восстановлении высотных профилей электронной концентрации и кинетической температуры электронов, обнаружении линий поглощения или излучения, накладывающихся на непрерывный спектр радиоизлучения Солнца.

В настоящее время в литературе предложено и рассмотрено несколько моделей нижней хромосферы Солнца [1-4]. Однако большой разброс экспериментальных данных не дает возможности однозначно объяснить наблюдаемые особенности в миллиметровом спектре Солнца и отдать предпочтение одной из предложенных моделей.

Трудности в интерпретации экспериментальных данных, полученных разными авторами, возникают в результате возможных систематических погрешностей различных методов, используемых при калибровке усиления антенн, а также погрешностей, вносимых неопределенностью поглощения в атмосфере. Произвольное объединение всех экспериментальных данных для построения спектра «спокойного» Солнца приводит как к искажению относительной зависимости яркостной температуры Солнца  $T_{Ся}$  от длины волны, так и к большому разбросу абсолютных значений яркостных температур. Поэтому очевидна необходимость выработки общего критерия для объединения всех экспериментальных данных, который позволит свести к минимуму систематические ошибки измерений  $T_{Ся}$ .

В работах Ребера [3] и Линского [1] было предложено и обосновано использование Луны как источника сравнения при измерениях радиоизлучения Солнца в миллиметровом диапазоне, а также для перекалибровки  $T_{Ся}$ , полученных из относительных измерений радиоизлучения Солнца и Луны. Но, как было отмечено в работах [1, 8], спектр яркостной температуры «новой» Луны, предложенный Ребером [3] в качестве эталонного в диапазоне 30—300 ГГц, построен по ограниченному числу экспериментальных данных и очень грубо отражает зависимость яркостной температуры «новой» Луны от длины волны. Необходимо отметить также, что спектр постоянной составляющей яркостной температуры Луны, предложенный Линским [1] в качестве первичной эталонной шкалы, был рассчитан им [5] для центральной части диска Луны на основе электрических и тепловых характеристик лунного грунта, которые были получены из измерений инфракрасного излучения Луны и из лабораторных исследований образцов лунного грунта, доставлен-

ных на Землю с локальных участков лунной поверхности во время экспедиции «Аполлон». В работе [2] было показано, что рассчитанный в работе [5] спектр дает завышенные значения яркостной температуры Луны в длинноволновой части миллиметрового диапазона по сравнению со всеми известными данными измерений. Как отмечает и сам автор [1], при расчете спектра радиоизлучения Луны предпочтительнее брать средние по поверхности характеристики лунного грунта, полученные из радиоастрономических наблюдений, так как именно они определяют частотную и временную зависимость яркостной температуры Луны в миллиметровом диапазоне радиоволн. Несовершенство рассчитанной в работе [5] шкалы приводит к существенно большему среднеквадратичному разбросу значений  $T_{с.я}$  в перекалиброванном спектре Солнца, чем погрешность эталонной шкалы, несмотря на значительную предварительную селекцию экспериментальных данных.

В данной работе спектр «спокойного» Солнца в диапазоне длин волн 1—20 мм был получен перекалибровкой данных измерений  $T_{с.я}$  относительно новой шкалы спектров яркостной температуры Луны [8], которая получена на основе всей совокупности данных радиоастрономических измерений радиоизлучения Луны в диапазоне 1—32 мм и позволяет кроме того проводить сравнение измерений, выполненных с различным усреднением по диаграмме. Учет усредняющего действия диаграммы направленности антенны позволяет существенно расширить возможности использования Луны как источника сравнения и перекалибровки данных радиоастрономических наблюдений, в которых используется сравнение с радиоизлучением Луны.

Анализ экспериментальных данных, опубликованных в [1, 2, 6, 7, 9, 11, 12], показывает, что 85% всех измерений  $T_{с.я}$  в диапазоне 1—20 мм выполнены с одновременным измерением радиоизлучения Луны или с абсолютной калибровкой по «черным» дискам. Это обстоятельство дает возможность перекалибровки большей части экспериментальных данных относительно новой шкалы спектров яркостных температур Луны [8] без какой-либо предварительной селекции.

Не конкретизируя погрешности отдельных совместных измерений радиоизлучения Солнца и Луны, которые используются в дальнейшем для построения спектра Солнца, можно указать на ряд источников большого разброса измеренных значений  $T_{с.я}$ , что приводит к искажению спектральных характеристик радиоизлучения Солнца и к существенным погрешностям в абсолютных величинах  $T_{с.я}$ . Этот разброс данных в миллиметровом диапазоне значительно превышает, как было показано в работе [13], вклад S-компоненты в радиоизлучение Солнца.

Все данные измерений  $T_{с.я}$ , которые используются в данной работе для построения спектра Солнца, можно разделить по методам калибровки на три группы. В первую группу входят измерения, в которых яркостная температура Солнца определяется по отношению к постоянной составляющей яркостной температуры Луны  $T_{л.я_{\infty}}$ , величина которой считается известной. При этом точность определения  $T_{с.я}$  связана с точностью измерения отношения  $T_{с.я}/T_{л.я_{\infty}}$  и погрешностью в величине  $T_{л.я_{\infty}}$ , которая либо измеряется, либо интерполируется по данным измерений других авторов на близких частотах. Вторая группа объединяет данные, полученные при измерениях отношения  $T_{с.я}$  к яркостной температуре Луны в новолуние  $T_{л.я_{н}}$ , когда диски Солнца и Луны находятся на минимальных угловых расстояниях друг от друга. Это позволяет свести к минимуму ошибки измерений, связанные с неопределенностью поглощения на луче зрения источников.

Эти методы измерения  $T_{с.я}$  требуют знания температур Луны  $T_{л.я_{\infty}}$  и  $T_{л.я_{н}}$ , в определении которых во многих работах допускаются существ-

Таблица 1

№	Длина волны, м.м.	Ширина диаграммы, угл. мин.	Т.д.я. — постоянная составляющая		Т.с.я., измерено	Т.с.я., перекалбр.	Литература
			измерено	центр диска   калибр. [8]			
1	0,87	10,5	191	194,7	5350 ± 800	5960	[2]
2	1,0	3,9	229	229,5	5900 ± 500	5600	[2]
3	1,0	7	375*		5910 ± 400	5600	[2]
4	1,06	14	183	189	5750 ± 600	6620	[2]
5	1,2	3	относительно		5600 ± 400	6100	[2]
6	1,24	10	относительно		5600 ± 800	6460	[2]
7	1,26	10	186	190	6000 ± 500	6930	[2]
8	1,3	11	216	220	6700 ± 700	6700	[2]
9	1,3	3	относительно		5900 ± 400	6430	[2]
10	1,45	18,5	194	203,5	6000 ± 700	6500	[2]
11	1,8	9	240	240	6500 ± 1000	6030	[2]
12	1,8	4	203	204	6200 ± 400	6760	[2]
13	2,15	6	относительно		5430 ± 500	6140	[2]
14	2,2	5	относительно		6800 ± 400	7410	[2]
15	2,25	10	200	204	5600 ± 400	6140	[2]
16	2,4	5	относительно		6500 ± 400	7080	[2]
17	2,73	8	относительно		5500 ± 720	6220	[2]
18	2,8	6	относительно		6800 ± 500	7410	[2]
19	3,0	9	196	200	6815 ± 310	7520	[2]
20	3,09	2,5	224	225	7000 ± 350	7160	[2]
21	3,3	2,8	197	198	8000 ± 700	7290	[2]
22	3,4—4,0	31	204	222	7300 ± 200	7470	[2]
23	4,1**	25	230	249	7990 ± 250	7980	[2]
24	4,1	32	204	221	7500 ± 400	8520	[2]
25	6,3**	45	208	226,6	7250 ± 270	7250	[2]
26	8,0	18	197	201,7	8350 ± 150	8310	[2]
27	8,6**	6,6	211	230	10480 ± 300	10480	[2]
28	8,6**	60			9800 ± 300	10330	[2]
29	10,0**	35	215	215	8870 ± 980	99350	[2]
30	11,77	5,9	215	215	10700 ± 500	11260	[2]
31	11,8	6	215	215	11000 ± 500	11560	[2]
32	12,77	6,4	215	215	10800 ± 400	11350	[2]
33	13,51	6,8	215	215	12000 ± 300	12000	[2]
34	14,29	7,1	215	215			[2]
35	15,79	7,9	215	215			[2]
36	18,6**	65					[2]

\* Перекалировка относительно яркостной температуры полной Луны;

\*\* — абсолютные измерения; \*\*\* — с учетом усреднения по диаграмме.

венные погрешности. Эти погрешности связаны с тем, что при определении  $T_{Ля}$  используются значения яркостных температур Луны, которые получены интерполяцией данных измерений на близких длинах волн, которые в свою очередь измерены с систематическими погрешностями  $\sim (10 \div 15) \%$  и с различным усреднением по диску Луны, что, как правило, не учитывается при интерполяции. Это приводит к дополнительному разбросу данных несмотря на высокую точность измерения отношения  $T_{Ся}/T_{Ля}$ .

Третья группа данных объединяет измерения, проведенные с абсолютной калибровкой по «черным» дискам (метод «искусственной» Луны). Этот метод позволяет провести измерения с очень высокой точностью  $\sim (2 \div 3) \%$ , но при этом измеряются характеристики интегрального радиоизлучения Солнца, что не исключает вклад  $S$ -компоненты и приводит к искажению уровня излучения, который принимается за уровень «спокойного» Солнца.

С увеличением длины волны вклад  $S$ -компоненты в радиоизлучение Солнца возрастает, поэтому объединение всех данных измерений  $T_{Ся}$  без учета этого эффекта может стать причиной дополнительного разброса данных в длинноволновой части миллиметрового диапазона, а также привести к некоторому искажению как спектральных характеристик радиоизлучения Солнца, так и абсолютных значений температур  $T_{Ся}$ .

Таблица 2

Длина волн, мм	Ширина диаграммы, угл. мин	$T_{Ся}$		$T_{Ля}$ , «новая» Луна [8]	$T_{Ся}$ перекалибров.	Литература
		$T_{Ля}$ , «новая» Луна, измерено				
1,3	0,7	46,6±0,4		129	6011±240	[6]
1,5	5	57,7±5,0		117	6750±640	[10]
3,17	7	37,9±2,8		170	6410±540	[6]
3,3	7	36,1±2,9		172	6210±560	[6]
3,32	2,9	41,17±0,1		173	7010±280	[6]
3,32	2,9	41,61±0,1		173	7110±280	[6]
3,32	2,9	42,38±0,12		173	7240±290	[6]
5,5	4,2	39,8±1,4		183	7290±390	[6]
5,62	4,2	39,84±1,4		183,8	7320±390	[3]
5,62	4,2	35,02±1,4		183,8	6440±360	[6]
5,62	4,2	37,32±1,4		188,8	6860±380	[3]
5,73	4,3	39,72±0,8		184	7330±330	[3]
5,74	4,3	39,45±0,8		184	7280±320	[6]
5,83	4,4	40,47±0,91		184,5	7470±340	[6]
6,0	4,5	41,06±0,52		185	7600±320	[6]
6,0	4,5	40,42±0,61		185	7480±320	[6]
7,95	14,0	4,12±1,5		187	7720±410	[6]
8,1	1,6	43,44±0,5		193	8380±350	[6]
8,33	14,0	43,1±1,2		188	8100±390	[2]
8,85	15,5	45,5±1,0		189	8600±390	[6]
13,2135	2,5	50,40±0,7		205	10330±440	[6]
13,516	2,5	44,02±1,0		205	9020±420	[2]
16,6	3,1	59,04±0,7		205	12100±500	[2]
19,0	1,0	47,3±1,5		211	9980±350	[11]
19,0	1,0	47,4±1,5		211	10000±320	[12]
19,0	1,0	48,0±1,5		211	10130±320	[12]
19,0	1,0	44,3±1,5		211	9350±320	[12]
20,0	2,0	48,12±3,2		212	10200±790	[1]

Можно ожидать, что использование новой шкалы спектров яркостной температуры Луны с учетом усредняющего действия диаграммы направленности антенны в качестве общего критерия при перекалибровке и объединении всех трех групп данных при построении спектра «спокойного» Солнца позволит уменьшить неконтролируемые систематиче-

ские погрешности отдельных измерений  $T_{Cя}$  и соответственно уменьшить разброс температур в перекалиброванном спектре Солнца. Результаты перекалибровки данных измерений  $T_{Cя}$  сведены в табл. 1, 2.

В табл. 1 приведены результаты перекалибровки данных измерений, которые выполнены совместно с измерениями постоянной составляющей яркостной температуры Луны  $T_{Ля_н}$ , и данные абсолютных измерений по методу «искусственной» Луны. Перекалиброванные значения  $T_{Cя}$  были получены домножением измеренных значений  $T_{Cя}$  на отношение яркостной температуры Луны  $T_{Ля_н}$ , полученной из эталонного спектра [8], к температуре Луны  $T_{Ля_н}$ , принятой при измерениях. В ряде случаев, которые включены в табл. 1 под номерами 5, 6, 9, 13, 14, 16—18, при одновременных измерениях яркостной температуры Солнца на нескольких длинах волн с единой методикой калибровки усиления антенны радиоизлучение Луны измерялось только на одной из длин волн. Тогда для перекалибровки  $T_{Cя}$  на длинах волн, на которых отсутствуют измерения радиоизлучения Луны, брался перекалибровочный коэффициент на одной из длин волн, на которой проводились одновременные измерения радиоизлучения Солнца и Луны.

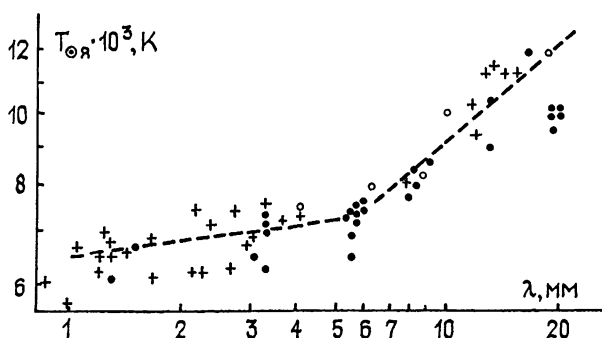


Рис 1. Перекалиброванный спектр «спокойного» Солнца; крестики — данные измерений  $T_{Cя}$  относительно постоянной составляющей яркостной температуры Луны, темные точки — данные измерений  $T_{Cя}$  относительно «новой» Луны, светлые точки — абсолютные измерения радиоизлучения Солнца, штриховая кривая — кусочно-линейная аппроксимация спектра «спокойного» Солнца.

В табл. 2 приведены результаты перекалибровки измерений  $T_{Cя}$ , которые выполнены с калибровкой относительно «новой» Луны. В этой группе измерений перекалиброванные значения  $T_{Cя}$  были получены домножением измеренных отношений  $T_{Cя}/T_{Ля_н}$  на значения яркостных температур Луны, которые были получены из эталонного спектра [8] с учетом реликтового излучения и усредняющего действия диаграммы направленности.

На основе перекалиброванных значений  $T_{Cя}$  был построен спектр «спокойного» Солнца (см. рис. 1). На рис. 1 отдельно обозначены  $T_{Cя}$ , полученные по каждой из трех групп измерений. Анализ перекалиброванного спектра «спокойного» Солнца показывает, что в интервалах длин волн (1 ÷ 6) мм и (7 ÷ 20) мм спектральные характеристики радиоизлучения Солнца существенно различны и все три группы данных имеют хорошую внутреннюю сходимость. При аппроксимации перекалиброванных значений  $T_{Cя}$  кусочно-линейной зависимостью по методу наименьших квадратов спектр «спокойного» Солнца имеет вид:

$$T_{Cя} = (6150 \pm 70) \lambda^{0,1 \pm 0,01} [\text{мм}] \text{ К} \quad (1)$$

в интервале длин волн  $(1 \div 6)$  мм и

$$T_{c,\lambda} = (3470 \pm 80) \lambda^{0,42 \pm 0,01} [\text{мм}] \text{ К} \quad (2)$$

в интервале длин волн  $(7 \div 20)$  мм.

Среднеквадратичный разброс перекалиброванных температур  $T_{c,\lambda}$  относительно аппроксимирующей зависимости составляет  $\pm 3\%$  в интервале длин волн  $(1 \div 6)$  мм и  $\pm 4\%$  в интервале  $(7 \div 20)$  мм. Такой разброс согласуется с погрешностью  $\pm 4\%$ , предложенной нами в работе [8] новой шкалы спектров яркостной температуры Луны, и этим снимается одно из существенных внутренних противоречий в перекалиброванном Линским [1] спектре «спокойного» Солнца, в котором среднеквадратичный разброс перекалиброванных температур  $T_{c,\lambda}$  составляет  $\pm 9\%$  и превышает погрешность эталонной шкалы [5].

Полученные в этой работе спектральные характеристики радиоизлучения «спокойного» Солнца в миллиметровом диапазоне указывают на уплощение спектра в интервале длин волн  $(1 \div 6)$  мм и, учитывая сравнительно небольшой разброс температур в перекалиброванном спектре, позволяют сделать выбор в пользу той или иной модели нижней хромосферы Солнца.

Автор весьма признателен А. Г. Кислякову и В. Д. Кротикову за внимание к работе, полезные замечания и дискуссию.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Linsky J. L — Solar Phys., 1973, 28, № 2, p. 409.
2. Кисляков А. Г., Кузнецов Н. А. — Солнечные данные, 1977, № 8, с. 71.
3. Reber E. E. — Solar Phys., 1971, 16, № 1, p. 75.
4. Noyes R. W., Beckers J. M., Low F. J. — Solar Phys., 1968, 3, № 1, p. 36.
5. Linsky J. L. — Astrophys. J. Suppl. Ser., 1973, 25, № 16, p. 163.
6. Kuesky R. A., Swanson P. N. — Solar Phys., 1976, 48, № 1, p. 41.
7. Shimabucuro F. J., Stacey J. M. — Astrophys. J., 1968, 15, p. 977.
8. Кротиков В. Д., Пелюшенко С. А. — Тезисы XIII Всесоюзной конференции по радиоастрономическим исследованиям солнечной системы. — Киев: Наукова думка, 1981.
9. Пелюшенко С. А. — Тезисы XIII Всесоюзной конференции по радиоастрономическим исследованиям солнечной системы. — Киев: Наукова думка, 1981.
10. Sinton W. M. — J. Opt. Soc. America, 1955, 45, № 11, p. 975.
11. Бачурин А. Ф., Ерюшев Н. Н. — Изв. КРАО, 1976, 54, с. 41.
12. Бачурин А. Ф., Ерюшев Н. Н., Цветков Л. И. — Изв. КРАО, 1974, 50, с. 180.
13. Wrixon G. T., Hogg D. C. — Astron. and Astrophys., 1971, 10, № 1, p. 193.

Научно-исследовательский  
радиофизический институт

Поступила в редакцию  
4 августа 1981 г.

#### BRIGHTNESS TEMPERATURE OF THE «QUIET» SUN IN THE MILLIMETER WAVELENGTH

S. A. Pelyushenko

Results are presented of recalibration of the data available for measurements of the solar brightness temperature made by comparison with the lunar radiation and a spectrum has been obtained of the «quite» Sun radio emission in the range of 1–20 mm, the rms spread of data does not exceed  $\pm (3 \div 4)\%$ .