

НАБЛЮДЕНИЕ КОЛЬЦЕОБРАЗНОГО ЗАТМЕНИЯ СОЛНЦА

19 АПРЕЛЯ 1958 г.

на волнах 1,63 см, 3,2 см и 10 см

Ду Лен-яо, А. Н. Малахов, В. М. Плечков, В. А. Разин,
В. Л. Рахлин, К. С. Станкевич, К. М. Стрежнева,
Тан Шоу-пэ, В. С. Троицкий, В. В. Хрулев, Н. М. Цейтлин

На основании результатов измерений интенсивности солнечного радиоизлучения на волнах 1,63 см, 3,2 см и 10 см во время кольцеобразного затмения Солнца 19 апреля 1958 г. найдено распределение радиояркости по солнечному диску; в частности, определена величина уярчения на лимбе Солнца. Вычислены спектры отдельных компонент солнечного радиоизлучения (радиоизлучения группы пятен, равномерно излучающего диска и т. д.) в диапазоне 1,63 см ÷ 10 см.

Измерения интенсивности солнечного радиоизлучения во время затмений позволяют, как известно, с помощью сравнительно простых средств обнаруживать некоторые характерные детали в распределении радиояркости по солнечному диску, такие, например, как уярчение вблизи края солнечного диска, а возможно, и в его центре, небольшие, очень яркие участки на поверхности Солнца, связанные с излучением пятен и других локальных источников, и т. п. Наблюдения солнечных затмений на ряде длин волн дают, кроме того, возможность исследовать спектральный состав радиоизлучения Солнца и отдельных активных областей на нем. Такого рода данные, несомненно, существенны для выяснения природы солнечного радиоизлучения.

В статье приведены результаты измерений интенсивности солнечного радиоизлучения на волнах $\lambda = 1,63$ см, 3,2 см и 10 см, выполненных китайско-советской экспедицией в населенном пункте Линшуй ($\varphi = 18^\circ 30' 32''$, $l = 110^\circ 01' 12''$) на острове Хайнань во время кольцеобразного затмения Солнца 19 апреля 1958 г.

1. *Аппаратура.* Приемная аппаратура каждого из радиотелескопов представляла собой модуляционный измеритель, подробно описанный в работе [1]. Флюктуационный порог чувствительности при единичном измерении составлял:

4° на волне 1,63 см	при постоянной времени 16 сек;
5° на волне 3,2 см	" " " " " 4 сек;
4° на волне 10 см	" " " " " 4 сек;

Антенные системы радиотелескопов (параболические рефлекторы диаметром $d = 1$ м на $\lambda = 1,63$ см и $\lambda = 3,2$ см и $d = 1,5$ м на $\lambda = 10$ см) монтировались на двух фермах, допускавших вращение по азимуту (вместе с кабиной, в которой были размещены приемные устройства радиотелескопов) и по углу места. Ширина диаграммы направленности антенн, измеренная по точкам половинной мощности, была равна 1° на $\lambda = 1,63$ см, 2° на $\lambda = 3,2$ см и 4° на $\lambda = 10$ см. Электрические оси антенн устанавливались параллельно друг другу. Точность абсолютных измерений интенсивности солнечного радиоизлучения оценивается в $\pm 15\%$ на $\lambda = 10$ см и $\lambda = 3,2$ см и в 20% — на $\lambda = 1,63$ см, точность относительных измерений была 2 — 3% (с учетом усреднения флюктуаций за 1 мин при построении кривых затмения). Для

обеспечения указанной точности измерений во время наблюдения затмения Солнца несколько раз проверялся „нуль“ радиотелескопов и производилась их калибровка по тепловому эталону.

2. *Результаты измерений* интенсивности солнечного радиоизлучения на волнах $\lambda = 1,63$ см, 3,2 см и 10 см во время затмения приведены на рис. 1. По осям ординат на этом рисунке отложены интенсивности радиоизлучения затменного Солнца в процентах от интенсивностей незатменного Солнца*, по оси абсцисс—время. Интенсивности радиоизлучения незатменного Солнца отвечают эффективным

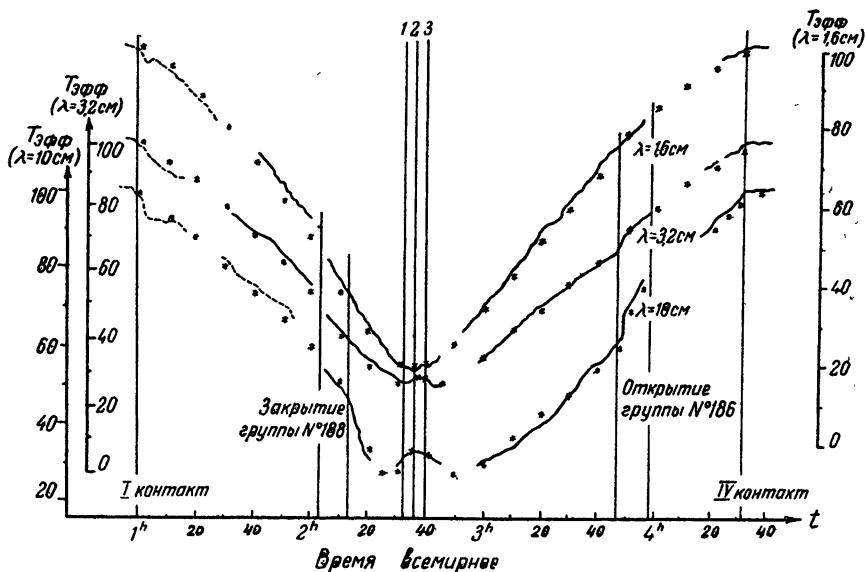


Рис. 1. Кривые затмения Солнца:

1—второй контакт, 3—третий контакт, 2—момент юлгой фазы затмения Солнца.

температурам 9000°K на $\lambda = 1,63$ см, 21000°K на $\lambda = 3,2$ см и 100000°K на $\lambda = 10$ см. Пропуски на кривых затмения в промежутки времени $1^{\text{h}} 10^{\text{m}} \div 1^{\text{h}} 25^{\text{m}}$; $1^{\text{h}} 55^{\text{m}} \div 2^{\text{h}} 0,5^{\text{m}}$; $2^{\text{h}} 45^{\text{m}} \div 2^{\text{h}} 55^{\text{m}}$; $4^{\text{h}} \div 4^{\text{h}} 10^{\text{m}}$ связаны с тем, что в это время производилась проверка „нуля“ радиотелескопов и их калибровка. Части кривых затмения, нанесенные на рис. 1 пунктиром, были искажены из-за нестабильности питающего напряжения и исправлены при обработке результатов измерений на основании технических характеристик радиотелескопов. Вертикальными линиями на рис. 1 отмечены моменты соответствующих контактов и моменты начала закрытия (открытия) и окончания закрытия (открытия) группы пятен № 188 диском Луны.

Из рис. 1 видно, что кривые затмения Солнца обладают рядом особенностей. На всех трех волнах радиозатмение Солнца началось несколько раньше и окончилось несколько позже, чем оптическое затмение. Далее, в течение промежутков времени $2^{\text{h}} 0,3^{\text{m}} \div 2^{\text{h}} 15^{\text{m}}$ и $3^{\text{h}} 47^{\text{m}} \div 3^{\text{h}} 58^{\text{m}}$ все кривые затмения претерпевают характерные изломы: их проводные сильно возрастают по абсолютной величине и затем спадают до прежнего значения. Бросается также в глаза харак-

* При определении интенсивности радиоизлучения Солнца из регистрируемого радиоизлучения вычиталось излучение Луны. Влияние неравномерности диаграммы направленности антенны в пределах телесного угла источника излучения на волне 10 см не учитывалось, поскольку раствор диаграммы направленности антенны этого радиотелескопа был значительно больше угловых размеров Солнца. Однако на $\lambda = 1,63$ см и 3,2 см влияние указанного эффекта было учтено.

терная асимметрия кривых затмения на $\lambda = 3,2$ см и особенно на $\lambda = 10$ см. Наконец, обращает на себя внимание увеличение регистрируемой интенсивности солнечного радиоизлучения в момент полной фазы затмения на волнах 3,2 см и 10 см.

Перейдем к интерпретации перечисленных особенностей „кривых затмения“.

Несовпадения моментов радио- и оптических контактов, очевидно, связаны с тем, что радиодиаметр Солнца больше его оптического диаметра. Оценки приводят к следующим отношениям эффективных радиусов Солнца $R_{эфф}$ на радиоволнах к радиусу его оптического диска R_0 : $R_{эфф}/R_0 = 1,05$ на $\lambda = 10$ см, $R_{эфф}/R_0 = 1,05$ на $\lambda = 3,2$ см и $R_{эфф}/R_0 = 1,03$ на $\lambda = 1,63$ см. Эти отношения могут быть найдены из сравнения интенсивности незатменного Солнца и его остаточной интенсивности в момент полной фазы затмения. При этом, однако, необходимо внести поправку на неравномерное распределение радиояркости по солнечному диску. Оценки, основывающиеся на приведенной ниже модели Солнца (см. табл. 1), приводят к отношениям: $R_{эфф}/R_0 = 1,05$; 1,03 и 1,02 соответственно на волнах 10 см, 3,2 см и 1,63 см.

Изломы на кривых рис. 1 могут быть объяснены закрытием ($t = 2^h 0,3^m \div 2^h 15^m$) и открытием ($t = 3^h 47^m \div 3^h 58^m$) группы пятен № 188 на диске Солнца (см. рис. 2). Предполагая, что видимые размеры группы пятен ($3' \times 1'$) совпадают с ее размерами в радиодиапазоне, нетрудно оценить эффективную температуру пятен: $T_{эфф} = 5 \cdot 10^4$ К на $\lambda = 1,63$ см, $T_{эфф} = 3 \cdot 10^5$ К на $\lambda = 3,2$ см и $T_{эфф} = 3 \cdot 10^6$ К на $\lambda = 10$ см.

Рис. 1 позволяет заметить некоторое запаздывание моментов начала затмения (закрытия) и конца затмения (открытия) группы пятен № 188 в радиодиапазоне по отношению к моментам начала соответствующих явлений в оптическом диапазоне. Это обстоятельство может быть объяснено тем, что источники радиоизлучения находятся над источниками оптического излучения. Более или менее надежная оценка высоты источника радиоизлучения над пятном (h) возможна лишь по кривой затмения на $\lambda = 10$ см. На этой волне высота h оказывается равной 0,04 – 0,05 R_0 , т. е. совпадает с разностью между радио- и оптическими радиусами Солнца.

Помимо группы пятен № 188 в день затмения на диске Солнца были еще пятна №№ 186, 193. Однако в моменты их затмения регистрируемая интенсивность солнечного радиоизлучения не претерпела заметных изменений, так что оценить радиоизлучение этих пятен не представляется возможным.

Для облегчения анализа асимметрии кривых рис. 1 из них были вычтены кривые затмения пятен. Асимметрия кривых затмения Солнца связана главным образом с асимметрией распределения радиояркости по его диску*. Чтобы выявить характер этой асимметрии, были рассчитаны кривые затмения Солнца с распределениями яркости по его диску в виде усеченного цилиндра и в виде узкого „клина“, расположенного в экваториальной области Солнца таким образом, что в начале затмения его роль мала. В случае затмения „клина“ результат особенно прост, а именно: если зеркально отразить ветвь кривой затмения, отвечающую закрытию клина, в прямой, проходящей через момент полной фазы затмения параллельно оси ординат, и затем вычесть из отраженной ветви вторую ветвь кривой затмения, то получается парабола $2\eta - \eta^2$, где η — расстояние между центрами Луны и Солнца, выраженное в радиусах Солнца. Прделав такую опера-

* Некоторая асимметрия кривых затмения на всех волнах вызвана неравномерностью движения Луны относительно Солнца. При нахождении асимметрии в распределении радиояркости по диску Солнца влияние этого эффекта было исключено.

дию с реальными кривыми затмения, нетрудно заметить, что „разностные“ кривые довольно хорошо аппроксимируются параболой и значительно хуже — „разностной“ кривой, полученной из кривой затмения усеченного цилиндра. Следовательно, асимметрию кривых затмения Солнца на волнах 3,2 см и 10 см можно объяснить наличием в его экваториальной области сравнительно узкой полосы, яркость которой возрастает при смещении по солнечному диску в восточном направлении. На синоптических картах Солнца, снятых 18 и 20 апреля [2], видны две полосы факельных полей, простирающихся на широтах $+35^\circ \pm -30^\circ$ с запада на восток. Возможно, что с ними и связана асимметрия в распределении яркости по солнечному диску. Из „разностных“ кривых нетрудно оценить радиоизлучение, приходящееся на долю яркого „клина“: на $\lambda = 10$ см она составляет 25% от интенсивности радиоизлучения незатменного Солнца; на $\lambda = 3,2$ см — 10%; на $\lambda = 1,63$ см „разностная“ кривая дает величины, не превышающие относительных ошибок измерения ($\sim 3\%$).

Увеличение регистрируемой интенсивности солнечного радиоизлу-

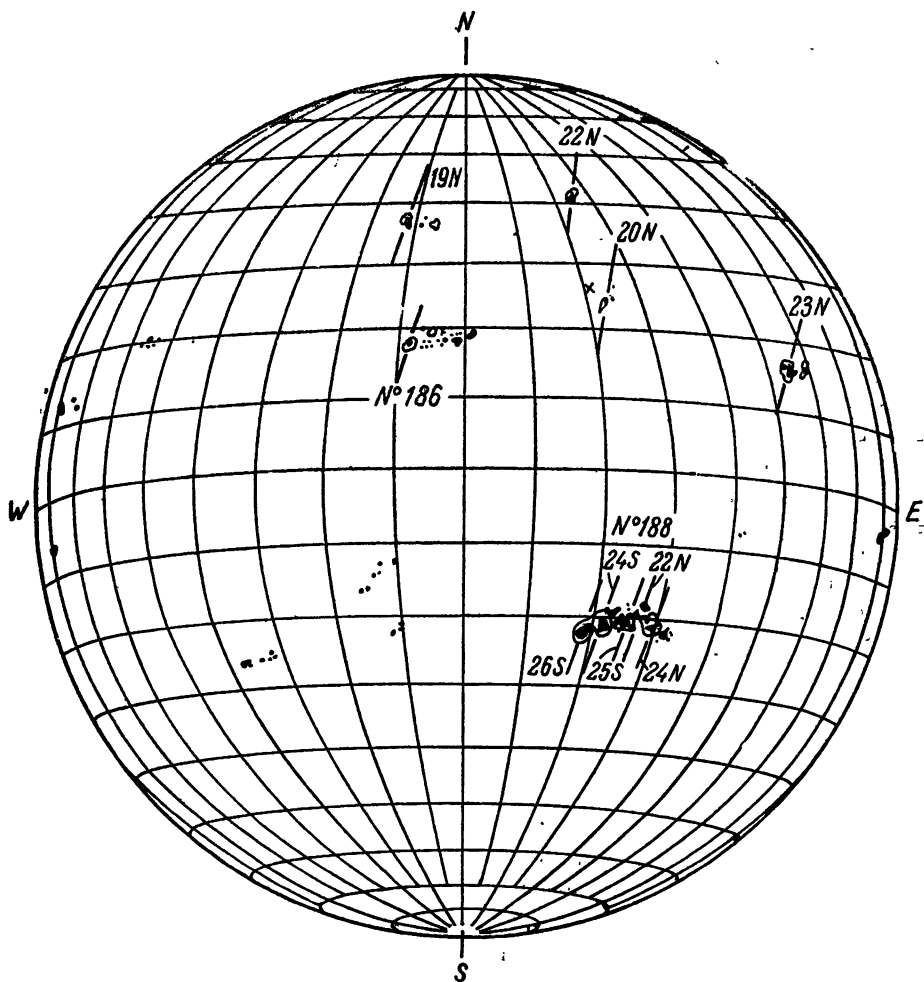


Рис. 2. Синоптическая карта Солнца, снятая 19 апреля 1958 г. [2].

чения в момент полной фазы затмения естественно объясняется наличием уярчения на краю диска Солнца. Чтобы найти параметры яркого кольца, из кривых затмения Солнца были вычтены кривые за-

тмения пятен и яркой полосы в его экваториальной области. На основании анализа остаточных симметричных кривых можно придти к выводу, что параметры яркого кольца следующие:

а) на $\lambda = 1,63$ см внутренний радиус кольца $r_1 = 1,0 R_{\odot}$, наружный радиус кольца $r_2 = 1,03 R_{\odot}$, интенсивность радиоизлучения кольца составляет $p = 4,5\%$ от интенсивности радиоизлучения незатменного Солнца;

б) на $\lambda = 3,2$ см $r_1 = 1,0 R_{\odot}$; $r_2 = 1,05 R_{\odot}$, $p = 14\%$;

в) на $\lambda = 10$ см $r_1 = 1,0 R_{\odot}$; $r_2 = 1,05 R_{\odot}$, $p = 23,0\%$.

На рис. 1 звездочками нанесены контуры кривых затмения, вычисленных на основе найденной выше модели Солнца: равномерно излучающий диск + яркое кольцо + „клин“ + пятна. Как видно из рисунка 1, совпадение вычисленных и реальных кривых затмения вполне удовлетворительное*. Для удобства данные о модели Солнца суммированы в таблице 1.

Таблица 1

Длина волны	$\lambda = 1,63$ см	$\lambda = 3,2$ см	$\lambda = 10$ см
Эффективная температура незатменного Солнца T_{\odot} (°K)	$9 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^4$	10^5
Эффективный радиус Солнца в радиодиапазоне	$1,03 R_{\odot}$	$1,05 R_{\odot}$	$1,05 R_{\odot}$
Радиоизлучение равномерно излучающего диска (в % от T_{\odot})	91	72	42
Радиоизлучение яркого кольца (в % от T_{\odot})	5	14	23
Внутренний радиус кольца	$1,0 R_{\odot}$	$1,0 R_{\odot}$	$1,0 R_{\odot}$
Наружный радиус кольца	$1,03 R_{\odot}$	$1,05 R_{\odot}$	$1,05 R_{\odot}$
Радиоизлучение „клина“ (в % от T_{\odot})	≤ 3	10	25
Радиоизлучение пятен (в % от T_{\odot})	4	4	10
Эффективная температура пятен $T_{\text{эфф}}$ (°K)	$5 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^6$

Приведенные в таблице 1 данные позволяют найти спектры отдельных компонент радиоизлучения Солнца в диапазоне $1,63$ см ÷ 10 см. Эффективная температура равномерно излучающего диска, приведенная к диску Солнца, равна $T_{\text{эфф}} = 4,6 \cdot 10^3 \cdot \lambda$ (см) град., а соответствующая температура яркого кольца и полосы в экваториальной области $-2 \cdot 10^2 \cdot \lambda^{2,1}$ (см) град. Эффективная температура пятен изменяется по закону $T_{\text{эфф}} = 2 \cdot 10^4 \cdot \lambda^{2,2}$ (см) град.

В заключение мы хотим сердечно поблагодарить за неоценимую помощь в работе экспедиции заместителя начальника отдела внешних отношений АН КНР тов. Джуан Ли-синя, переводчиков Сюй Кююяня, Ли Чжи-вения и всех китайских товарищей, которые окружали нас постоянным вниманием. Мы благодарны также начальнику экспедиции АН СССР А. П. Молчанову, выбравшему для нашей экспедиции место наблюдения, и участвовавшим в экспедиции т. т. Б. М. Будкину, П. П. Луговенко и А. А. Мельникову.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. С. Троицкий, В. Л. Рахлин, А. М. Стародубцев, В. Т. Бобрин, Труды 5-го совещания по вопросам космогонии, изд. АН СССР, М., 1956.
2. Бюллетень „Солнечные данные“, № 4, ГАО, Л., 1958.

Исследовательский радиопизический институт
при Горьковском университете

Поступила в редакцию
9 декабря 1958 г.

* Анализ производных от „кривых затмения“ позволяет предполагать существование некоторого уярчения в центре диска Солнца ($\sim 2\%$ от средней яркости незатменного Солнца на $\lambda = 10$ см, $\sim 3\%$ на $\lambda = 3,2$ см и $\sim 4\%$ на $\lambda = 1,63$ см).

Сделать, однако, определенное заключение на этот счет, опираясь на кривые рис. 1, затруднительно.