

УДК 523.947:520.86

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В КОРОНЕ СОЛНЦА ПО НАБЛЮДЕНИЯМ МАКСИМАЛЬНОЙ ФАЗЫ СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 29.03.2006 НА ТЕЛЕСКОПЕ РАТАН-600

© 2011 О. А. Голубчина, А. Н. Коржавин, С. Х. Тохчукова

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург

Поступила в редакцию 24 июля 2011 г.; принята в печать 28 августа 2011 г.

В работе описывается методика и результаты моделирования радиоизлучения Солнца во время максимальной фазы солнечного затмения 29 марта 2006 г. на РАТАН-600. Целью моделирования является уточнение яркостной температуры солнечной короны на расстояниях до двух его радиусов от центра оптического диска Солнца. Получено распределение яркостной температуры в районе корональной дыры над Северным полюсом Солнца на длине волны 13 см. Результаты моделирования показали, что яркостные температуры корональной дыры на расстоянии большем $1.02 R_C$ (R_C — радиус оптического диска Солнца) значительно ниже ожидаемой средней яркостной температуры типичной корональной дыры и спокойного Солнца (< 30000 К) на длине волны 13 см. Использование классической формулы Баумбаха-Аллена для определения электронной концентрации в сферически симметричной короне, даёт согласие модели с результатами наблюдений, начиная с расстояний $(1.4–1.5) R_C$.

Ключевые слова: *Солнце*

1. ВВЕДЕНИЕ

Наблюдение солнечных затмений вызывает большой интерес не только с эстетической точки зрения как редкое и красивое природное явление, но также представляет интерес для исследователей Солнца, в частности, для изучения солнечной короны. В этом случае солнечную корону можно наблюдать благодаря закрытию Луной мешающего мощного фоновых сигнала от Солнца, границы которого в основном определены размерами оптического диска Солнца. Радиоизлучение короны на расстояниях больших $(3–5) R_C$ изучаются методами радиопросвечивания, а на больших расстояниях (десятки радиусов Солнца) используются наблюдения с космических аппаратов. Определение яркостной температуры T_b короны на расстояниях от $1.2 R_C$ до $2 R_C$ представляет определённую трудность. Как правило, для наблюдений солнечных затмений в радиодиапазоне используются радиотелескопы-параболоиды с малыми зеркалами, диаметры которых не превосходят $(0.5–3)$ м. Такие радиотелескопы легко доставить в полосу солнечного затмения. Однако при этом из-за малой отражающей поверхности зеркала телескопа невозможно наблюдать с высокой чувствительностью слабые образования на Солнце. Поэтому можно считать большой удачей, когда крупный радиотелескоп попадает в полосу почти полного солнечного затмения. Именно таким случаем явля-

ется наблюдение максимальной фазы солнечного затмения 29.03.2006 года на РАТАН-600.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдение максимальной фазы солнечного затмения 29 марта 2006 г. было выполнено почти одновременно на Южном и Северо-восточном секторах радиотелескопа РАТАН-600 в диапазоне длин волн от 1 см до 30 см (Рис. 1). Максимальная фаза затмения ($\Phi = 0.998$) приходилась на момент 11:17 UT, при этом открытой оставалось порядка 0.2% оптического диска Солнца.

На Северо-восточном секторе РАТАН-600 наблюдения выполнены в режиме “эстафеты” [1] на длинах волн 1.0, 1.4, 2.7, 3.2, 3.9, 6.2, 13.0, 29.8, 30.7, 48.0 см. В данной работе приводится методика и результаты моделирования радиоизлучения Солнца во время максимальной фазы солнечного затмения. Наблюдения выполнены на Северо-восточном секторе РАТАН-600 на длине волны 13 см. Выбор этой длины волны обусловлен тем, что на этом материале наблюдений можно наиболее наглядно продемонстрировать методику моделирования. Угловые размеры (Ω) диаграммы направленности антенны (ДНА) на длине волны 13 см составляют: $\Omega = 6.2 \times 40.7$ угловых минут. На полюсах Солнца расположены корональные дыры-места открытого магнитного поля. Обстоятельства затмения были таковы, что для наиболее

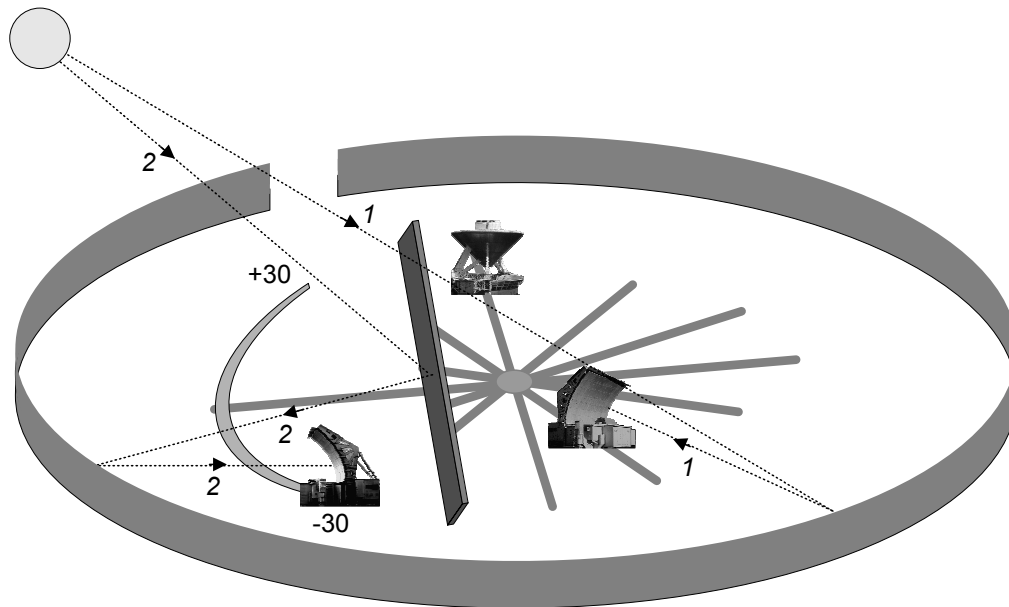


Рис. 1. Схема хода лучей от источника до облучателя на Северо-восточном (1) и Южном (2) секторах РАТАН-600.

эффективного наблюдения центр ДНА был смещён по высоте относительно центра оптического диска Солнца на $+15$ угловых минут (Рис. 2). При этом точки оптического диска Солнца, которые при суточном движении Солнца проектируются непосредственно на суточную параллель (aa'), попадают в центр ДНА при прохождении Солнца через ножевую ДНА. В данном случае в центральную часть ДНА попала корональная дыра над северным полюсом Солнца, что позволило определить распределение яркостной температуры в корональной дыре с расстоянием от центра оптического диска Солнца. В момент максимальной фазы затмения Луна закрывала Солнце, оставляя открытой северо-западную узкую полоску Солнца в несколько секунд дуги. Таким образом, влияние фонового излучения всего Солнца на чувствительность системы радиотелескоп-радиометр было почти исключено, что позволило исследовать атмосферу Солнца на расстояниях больших 1.2 радиуса Солнца. Некоторые результаты анализа полученного материала наблюдений были приведены в работах [2–4]. Данная работа посвящена методике исследования радиоизлучения короны.

На Рис. 2 приведены схема взаимного расположения основных осей на небесной сфере, изображение короны Солнца в белом свете, запись радиоизлучения открытой части Солнца и Луны на длине волны 13 см (сплошная линия внизу) во время максимальной фазы солнечного затмения на РАТАН-600 29.03.2006. Изображение короны Солнца в белом свете получено Miloslav Drukmuller, Peter Aniol [5]. E, W — восточная и западная точки оптического диска Солнца. R_C — радиус оптического диска Солнца. N —

северный полюс Солнца. Проекция на оптический диск Солнца: направления на северный полюс мира — OP , на небесный экватор — QQ' ; суточной параллели — aa' ; диаграммы направленности антенны — oD .

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Как известно, при ножевой ДНА наблюдаемое распределение антенной температуры $T_a(\varphi_0)$ связано с истинным распределением яркостной температуры по наблюдаемому источнику $T_b(\varphi)$ уравнением антенного сглаживания:

$$T_a(\varphi_0) = \int T_b(\varphi) \times F(\varphi - \varphi_0) d\varphi. \quad (1)$$

Здесь $T_a(\varphi_0)$ — измеряемая антенная температура источника, $T_b(\varphi)$ — распределение яркостной температуры по источнику, $F(\varphi - \varphi_0)$ — нормированная диаграмма направленности антенны в зависимости от угла φ , φ_0 — угол отклонения ДНА. При моделировании подбирается такое распределение $T_b(\varphi)$, чтобы при известной диаграмме направленности антенны, результат интегрирования в правой части уравнения (1) максимально совпадал с наблюдаемым распределением $T_a(\varphi_0)$. Для решения этой задачи были разработаны алгоритмы моделирования затмения. Они реализованы в виде пакета программ на IDL.

Алгоритм можно разделить на три основные части:

1. Расчет координат оптического центра Луны и Солнца на заданные моменты времени.

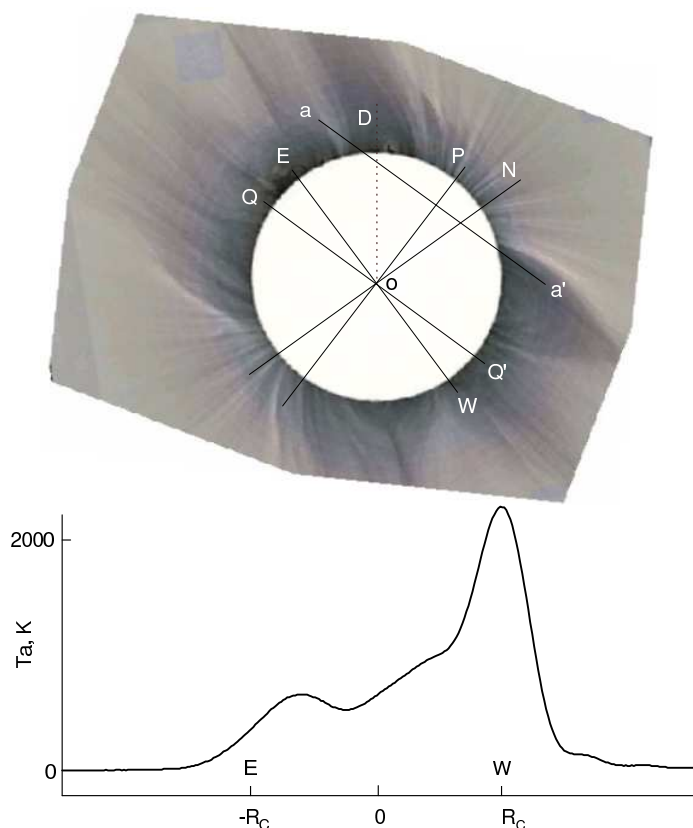


Рис. 2. Сопоставление изображения короны Солнца в белом свете с радиозаписью.

2. Задание моделей Солнца и Луны в виде систем концентрических колец (одномерных массивов радиусов и соответствующих им яркостных температур).
3. Вычисление $T_a(\varphi_0)$ по уравнению антенного сглаживания (1). При этом рассчитывается вклад Солнца и Луны в наблюдаемый поток радиоизлучения на каждый момент времени. Эта процедура включает в себя описание диаграммы направленности антенны и анализ видимости Луны или Солнца текущими точками вертикальной диаграммы направленности антенны.

Решение подобных задач проводится, как правило, в рамках некоторой математической модели исследуемого объекта. Солнце и Луна моделировались нами в виде набора концентрических колец с равномерным распределением яркости внутри кольца, центр которого совпадал с центром Солнца, в рамках гипотезы о круговой симметрии. Например, для Луны задаем массив колец с радиусами: $R_1^L, R_2^L, \dots, R_N^L$ и массив соответствующих яркостных температур $T_{b1}^L, T_{b2}^L, \dots, T_{bN}^L$ (здесь N — текущий номер кольца). Для Солнца

задаём набор N колец с радиусами $R_1^C, R_2^C, \dots, R_N^C$ и соответствующими яркостными температурами $T_{b1}^C, T_{b2}^C, \dots, T_{bN}^C$. Радиусы колец задаём в долях радиусов оптических дисков Солнца (Луны).

Степень совпадения моделированного распределения антенной температуры по Солнцу и Луне с реальной записью радиоизлучения Солнца и Луны во время наблюдения затмения является оценкой качества модели.

3.1. Расчет эфемерид центра Луны и Солнца на заданный момент времени

Время прохождения Солнца, как и Луны, через горизонтальную диаграмму направленности антенны РАТАН-600 составляет примерно 2.5 минуты времени. Исходя из размера ДНА, для однозначного восстановления получаемого сигнала достаточно 2–3 отсчетов в секунду. Учитывая также время прохождения Солнца через ближние боковые лепестки ДНА, мы рассчитали координаты на 300 моментов времени. Для моделирования требуется знание координат Луны и Солнца на каждый расчетный момент времени. В этом случае рассчитывать эфемериды на каждую секунду времени с

помощью специальных программ расчета эфемерид (например, “EFRAT”) не эффективно, т.к. это увеличивает время счета, при том, что изменение эфемерид за указанный период времени незначительно. Поэтому по результатам счёта эфемерид программой “EFRAT” были получены интерполяционные формулы (второго порядка), обеспечивающие достаточно высокую точность и упрощающие расчёт азимутов, высот и радиусов оптических дисков Солнца и Луны. Таким образом, были получены функции от времени: $A^{L,C} = f(t)$, $h^{L,C} = f(t)$, $R^{L,C} = f(t)$, которые позволяют на каждую секунду времени наблюдения затмения быстро рассчитать указанные выше эфемериды Солнца и Луны. Например, для текущего момента времени азимут Солнца определяется из уравнения:

$$A^C(t) = A^C(t_0) + \kappa_1 \times (t - t_0) + \kappa_2 \times (t - t_0)^2, \quad (2)$$

где $A^C(t_0)$ — азимут Солнца на опорный момент t_0 , t — текущий момент наблюдения, κ_1 , κ_2 — коэффициенты аппроксимации. Для определения коэффициентов κ_1 и κ_2 необходимо рассчитать эфемериды Солнца и Луны для 3–5 заданных азимутов по стандартной программе “EFRAT”. Их можно задать с шагом 1° . В качестве опорного азимута можно взять азимут светила на момент максимальной фазы затмения, а два других азимута выбираются по обе стороны от опорного. Для опорного момента времени все координаты рассчитываются по программе “EFRAT”. Таким образом, можем написать систему из двух уравнений для каждой из переменных: азимута, высоты и радиуса Солнца и Луны. Например, для Солнца:

$$\begin{aligned} A^C(t_1) &= A^C(t_0) + \kappa_1 \times (t_1 - t_0) + \kappa_2 \times (t_1 - t_0)^2 \\ A^C(t_2) &= A^C(t_0) + \kappa_1 \times (t_2 - t_0) + \kappa_2 \times (t_2 - t_0)^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Из этих уравнений, подставляя найденные по программе “EFRAT” азимуты Солнца $A^C(t_0)$, $A^C(t_1)$, $A^C(t_2)$, а также величины $(t_1 - t_0)$, $(t_2 - t_0)$, находим коэффициенты κ_1 и κ_2 . Для любого другого текущего момента времени затмения, задавая $(t - t_0)$ и найденные коэффициенты κ_1 и κ_2 , вычисляется азимут Солнца. Аналогично рассчитываются высота и радиус Солнца, а также координаты Луны.

3.2. Описание вертикальной диаграммы направленности антенны и анализ видимости Луны или Солнца текущими точками этой ДНА

Для вычисления антенных температур радиоизлучения Солнца и Луны на текущий момент наблюдения необходимо выполнить нормировку сигнала радиоизлучения по вертикальной ДНА. Для этого необходимо вычисление интеграла по вертикальной ДНА ($\int F(r)dr$). На этом шаге моделирования

для простоты полагаем, что вертикальная диаграмма направленности антенны представляет собой очень узкий нож. В этом случае ДНА описывается формулой:

$$F(r) = e^{-2.773 \times (r^2/B^2)} \quad (4)$$

Здесь r — расстояние от центра ДНА до любой точки ножевой ДНА. Размер ДНА по уровню 0.5 мощности:

$$B(\text{угл.сек.}) = k \times (\lambda/H) \times 206265. \quad (5)$$

Здесь k — коэффициент распределения поля по антенне [6], зависит от длины волны и задается в программе как константа; H — эффективная высота отражающего элемента, которая также зависит от длины волны и задается как константа для каждой волны. При наблюдении на длине волны 13 см коэффициент $k = 0.88$. $F(r) = 1$ в точке максимума ДНА. Уровень амплитуды ДНА от её центра к краям меняется по закону Гаусса.

Из уравнения (4) определяется верхний предел интегрирования по вертикальной ДНА, т.е. начальная точка $r = r_d$, от которой с заданным шагом по вертикальной ДНА необходимо вести расчет интеграла от $F(r)$. При этом считаем, что начальная точка интегрирования r_d соответствует уровню ДНА: $F(r) = 0.01$, т.е. однопроцентному уровню от максимума ДНА. Логарифмируя выражение (4) и полагая, что $F(r) = 0.01$, получим уравнение

$$\ln(0.01) = -2.773 \times (r^2/B^2), \quad (6)$$

из которого определяются значения для $+r_d$, $-r_d$, что даёт возможность вычислить $\int F(r)dr$ для заданной длины волны.

Вокруг точки центра ДНА участок считаем плоским, а систему координат прямоугольной. Прямоугольные координаты X, Y должны быть выражены в угловых секундах. U_d, X_d — прямоугольные координаты текущей точки ножевой ДНА. Тогда, соответственно:

$$X_d = r \times \cos q, \quad Y_d = r \times \sin q \quad (7)$$

Здесь q — угол между суточной параллелью и горизонтальной осью (x) равен параллактическому углу.

Для анализа видимости Луны и Солнца текущими точками вертикальной ДНА необходимо вычислить расстояние $\rho_{L,C}$ от текущей точки ДНА до центров Луны и Солнца на момент времени наблюдения. Вычисление $\rho_{L,C}$ выполняется последовательным перебором точек вдоль вертикальной ДНА от $+r_d$ до $-r_d$ с заданным шагом:

$$\rho_{L,C} = [(X_d - X_{L,C})^2 + (Y_d - Y_{L,C})^2]^{1/2}. \quad (8)$$

По формуле (7) определяются прямоугольные координаты текущей точки вертикальной ДНА: X_d ,

Уд. Прямоугольные координаты центров Луны и Солнца, соответственно, равны:

$$\begin{aligned} X_{Л,С} &= A \times \cos h - A_0 \times \cos h_0, \\ U_{Л,С} &= (h - h_0) \end{aligned} \quad (9)$$

h_0 , A_0 — высота и азимут наведения центра ДНА. h , A — соответственно, текущие координаты центров оптических дисков Солнца и Луны.

При наблюдении на Северо-восточном секторе вторичный отражатель устанавливался вблизи центра круга. Его ориентация по азимуту задавалась равной 240° . Как было отмечено выше, наблюдения были выполнены со смещением центра ДНА по высоте на $+15$ угловых минут относительно центра оптического диска Солнца. Координаты центра ДНА были равны: $h_0 = 42^\circ 07.2'$ и $A_0 = 41^\circ 30.6'$. При моделировании эти величины вводятся в программу вычисления и могут меняться в зависимости от точности установки вторичного зеркала антенны.

При анализе видимости Луны или Солнца текущими точками вертикальной диаграммы направленности антенны примем следующую терминологию. Если в текущую точку ДНА попадает Солнце (Луна), то считаем, что эта точка ДНА видит Солнце (Луну). При этом необходимо принять во внимание, что если $\rho_{Л} > R_{Л}^I$, то точка ДНА Луну не видит и $T_{bN}^I = 0$. Если наоборот, то T_{bN}^I приравнивается заданному табличному значению T_{bN}^I для соответствующего R_N^I . Для определения T_{aN}^I в каждой точке ДНА необходимо учесть значение ДНА умножением полученного значения T_{bN}^I на соответствующее значение амплитуды ДНА в текущей точке g . Если точка не видит Луну, а видит Солнце, то берется заданная яркостная температура соответствующего кольца Солнца и т.д. Процедура повторяется, но уже для Солнца. При этом надо иметь в виду, что если в зону видимости попадает Луна, то Солнце закрыто и $T_a^C = 0$. Таким образом, необходимо учитывать взаимное положение Луны и Солнца.

Как было сказано выше, все расчеты выполняются отдельно для каждой длины волны наблюдения на каждую из 300 секунд времени. Поэтому в конечном итоге для каждой длины волны должны быть организованы одномерные массивы для Луны и Солнца: $T_a^I(t)$, $T_a^C(t)$, где $\Delta t = 1$ сек, $t = (1, 2, \dots, 300)$. Максимальное количество точек по времени равно 300. Суммирование $T_a^I(t)$ и $T_a^C(t)$ по ДНА и выполнение нормировки по ДНА позволяет определить $T_a^{Л,С}(t)$:

$$T_a^{Л,С}(t) = \sum T_a^{Л,С}(t) \quad / \quad \int_{-r}^{+r} F(r) dr. \quad (10)$$

3.3. Задание одномерных массивов радиусов колец Луны и Солнца, соответствующих яркостных температур и алгоритм построения модели

Как было сказано выше, Солнце (Луна) задавалось в виде набора концентрических колец с равномерным распределением яркости внутри кольца в рамках гипотезы о круговой симметрии. Центры колец совпадают с центром Солнца (Луны). Заметим, что Луна может быть неравномерно светящимся диском и для Луны почти нет зависимости T_b от длины волны. Луну можно задать набором N колец: R_N^I , T_{bN}^I . Однако поскольку в данной работе рассматривается модель для наблюдения на волне 13 см, на которой лунация не проявляется, то Луна задавалась равномерно светящимся диском с яркостной температурой $T_{b1}^I = 220\text{K}$ [7].

Для Солнца задаём набор N колец с радиусами $R_1^C, R_2^C, \dots, R_N^C$ (здесь радиусы колец даны в долях радиуса оптического диска Солнца). Например: $R_1^C = 1.0$, т.е. этот радиус равен расстоянию от центра Солнца до его лимба и, следовательно, равен радиусу оптического диска Солнца. R_2^C — радиус второго кольца и т.д. При моделировании яркостные температуры T_b соответствующих колец Солнца можно задавать либо согласно литературным данным, либо подбором, либо расчётным методом, либо с использованием комбинации всех перечисленных способов. Мы задавали расстояния от центра Солнца и соответствующие им яркостные температуры до некоторого выбранного нами расстояния от центра Солнца подбором, а далее использовали расчётный метод. В окончательном варианте моделирования, начиная с расстояния $R^C = 1.4 - 1.5$, яркостные температуры Солнца рассчитывались, используя формулу Баумбаха-Аллена для определения электронной концентрации.

Итак, расчёт яркостной температуры в точке короны сводится к следующему. Яркостная корональная температура на расстоянии R от центра оптического диска Солнца для каждого элемента пути L по лучу зрения определялась по формуле:

$$T_b(R) = T_e \times \mu(R) \times \Delta L \quad (11)$$

где $\mu(R)$ — коэффициент поглощения, L — элемент оптического пути по лучу зрения, T_e — средняя электронная температура короны Солнца, R — расстояние от центра оптического диска Солнца до расчётной точки его короны [8].

При моделировании на длине волны 13 см полагаем шаг по лучу зрения $L = (7 \times 10^9)$ см. Средняя электронная температура для короны Солнца известна и равна: $T_e = (1.4 \times 10^6)$ К. В соответствии с формулой, приведенной в [8], рассчитывается коэффициент поглощения $\mu(R)$ в области

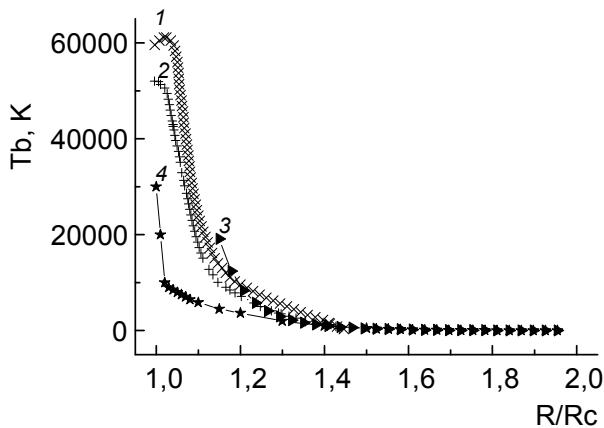


Рис. 3. Изменение яркостной температуры радиоизлучения короны Солнца с расстоянием от лимба Солнца.

радиочастот:

$$\mu(R) = 10^{-21} \times 0.19 \times n_e^2(R) \times T_e^{-3/2} \times \lambda^2 \quad (12)$$

Электронная концентрация $n_e(R)$ определяется согласно формуле Баумбаха-Аллена [8]:

$$n_e(R) = 10^8 \times [1.55 \times (R/R_C)^{-6} + 2.99 \times (R/R_C)^{-16}] \quad (13)$$

“Сшивку” заданных яркостных температур и полученных T_b из расчёта показала значительный разрыв яркостных температур в точке $R^C = 1.15$ при сравнении соответствующих значений на кривых 3 и 4 (Рис. 3).

На Рис. 3 приведены яркостные температуры: 1 — для спокойного Солнца на длине волны 11.7 см при позиционном угле Солнца $P = 0^\circ$; 2 — то же при $P = 26^\circ$ [10]; 3 — расчётные T_b , полученные при использовании формулы Баумбаха-Аллена; 4 — результаты моделирования в данной работе на длине волны 13 см, когда на расстояниях до $1.5 R_C$ яркостные температуры Солнца задавались, а далее рассчитывались с использованием формулы Баумбаха-Аллена. Все эти данные были опробованы нами при построении модели.

Построение моделей подтвердило тот факт, что, если рассчитывать яркостные температуры, начиная с расстояний $R^C = 1.15$, то они оказываются слишком высокими для модели, что свидетельствует о неправомерности использования классической формулы Баумбаха-Аллена при расчёте яркостных температур, по крайней мере, на расстояниях вплоть до $R^C = 1.4$ от центра Солнца. Поэтому в дальнейшем, яркостные температуры задавались до расстояний $R^C = 1.4 - 1.5$, а затем расчёт выполнялся с использованием формулы Баумбаха-Аллена.

В окончательной модели, с учётом вышесказанного, были заданы подбором следующие яркостные

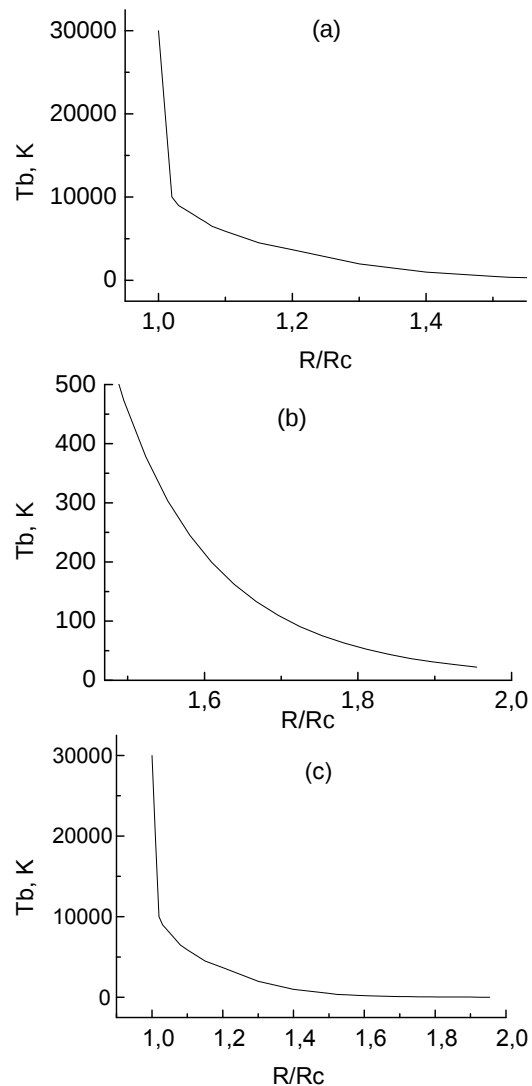


Рис. 4. Распределение яркостной температуры короны Солнца в области корональной дыры Северного полюса Солнца на длине волны 13 см. (а) — распределение яркостных температур, заданных подбором для участка $(1.0-1.5) R_C$; (б) — распределение яркостных температур, вычисленных с использованием формулы Баумбаха-Аллена; (с) — общий график распределения яркостных температур для участка $(1.0-1.8) R_C$.

температуры и соответствующие радиусы колец Солнца: $T_{bN}^C = 10^3 \times (30.0, 20.0, 10.0, 9.0, 8.5, 8.0, 7.5, 7.0, 6.5, 5.9, 4.5, 3.7, 2.0, 1.0, 0.5) \text{ K}$; $R_N^C = (1.0, 1.01, 1.02, 1.03, 1.04, 1.05, 1.06, 1.07, 1.08, 1.1, 1.15, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5)$. Далее на расстояниях больших, чем $1.5 R_C$, яркостные температуры рассчитаны с шагом, равным $2 \times 10^9 \text{ см}$ по радиусу Солнца с использованием формулы Баумбаха-Аллена. Используемые яркостные температуры для построения окончательной модели более подробно приведены на Рис. 4.

При сравнении промоделированного и реально-

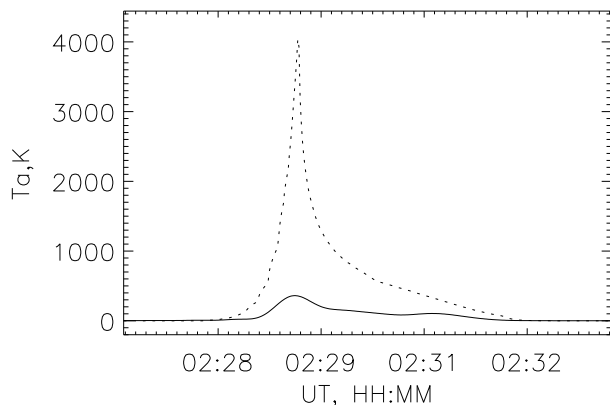


Рис. 5. Модельная кривая радиоизлучения Солнца и Луны (пунктирная линия) и реальная запись сигнала от открытой части Солнца и Луны (сплошная линия) во время максимальной фазы затмения на длине волны 13 см.

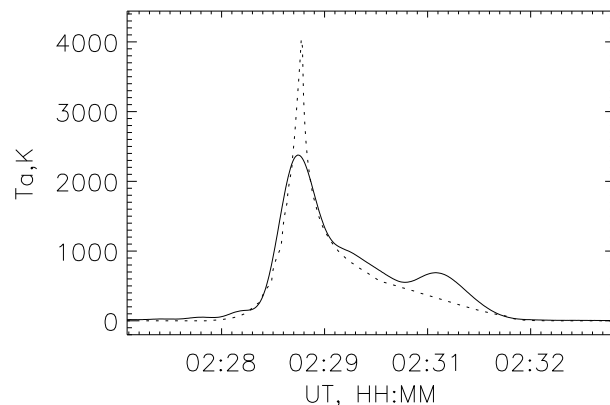


Рис. 6. Модельная (пунктирная линия) и реальная (сплошная линия) затменные кривые радиоизлучения Солнца и Луны после учета переоблучения главного зеркала антенны. Реальный сигнал записи увеличен в $m = 6.6$ раза.

го солнечного радиоизлучения на момент наблюдения максимальной фазы затмения необходимо учесть сильное переоблучение антенны в горизонтальном направлении. Такое переоблучение происходит потому, что наблюдения в режиме “эстафеты” выполняются с укороченной апертурой. В силу конструктивных особенностей телескопа, при наблюдении методом “эстафеты” используются всего 33 отражающих элемента главного зеркала антенны [1]. Вторичный отражатель, рассчитан для наблюдений в “штатном” режиме всем сектором, состоящем из 225 элементов главного зеркала антенны. Последнее приводит к сильному переоблучению антенны в горизонтальном направлении. Поэтому при сравнении модельной и реальной кривых затмения в зарегистрированный сигнал необходимо вводить коэффициент, учитывающий переоблучение антенны. Этот коэффициент, как было показано в работах [11, 12], для протяжённого источника в первом приближении равен $m = n_1/n_2$, где n_1, n_2 — количество отражающих элементов, участвующих в построении отражающей поверхности главного зеркала антенны, при наблюдениях в “штатном” и “эстафетном” режимах. В нашем случае $m = (6.4–6.6)$ (Рис. 5, 6).

Радиоизлучение источника при его прохождении через ДНА испытывает также антенное сглаживание горизонтальной ДНА, что необходимо учесть при моделировании. Как было отмечено выше, при наблюдении методом “эстафеты” использовалась малая часть отражающей поверхности главного зеркала антенны. Фактически мы имеем систему подобную дифракции на щели в оптике. В этом случае горизонтальная диаграмма направленности по полю описывается функцией $(\sin u)/u$, где $u = \pi \times D \times \sin(\varphi)/\lambda$, D — апертура антенны в горизонтальном направлении, λ — длина

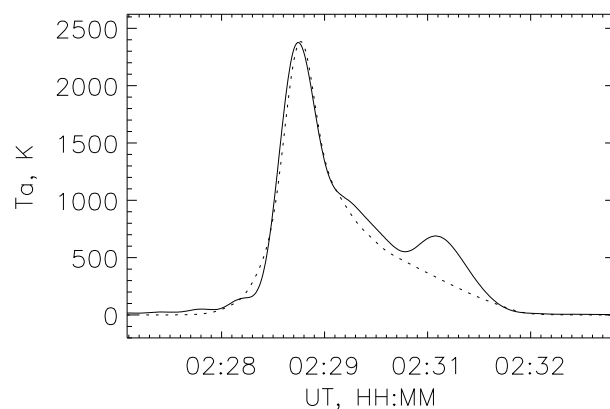


Рис. 7. Модельная (пунктирная линия) и реальная (сплошная линия) затменные кривые радиоизлучения Солнца и Луны после выполнения всех необходимых процедур обработки данных.

волны, $\sin(\varphi) = p \times \lambda/D$, p — количество лепестков диаграммы направленности антенны, которое при расчете модели задаётся в программе. Сглаживание моделируемого сигнала горизонтальной диаграммой антенны по мощности осуществляется функцией $F(\varphi) = [(\sin u)/u]^2$ (Рис. 7), [6].

Повышенное радиоизлучение реальной записи в правой части Рис. 7 связано с восходящим источником радиоизлучения на востоке Солнца. Как видно из Рис. 7, после выполнения при моделировании всех рассмотренных процедур обработки данных достигнуто хорошее согласие модельной кривой с реальной записью радиоизлучения Солнца и Луны, полученной во время наблюдения максимальной фазы солнечного затмения 29.03.2006 на РАТАН-600.

4. ДИСКУССИЯ

Как было сказано выше, при наблюдении на Северо-восточном секторе РАТАН-600, центр ДНА был смещён относительно центра оптического диска Солнца на 15 угловых минут к северному полюсу Солнца. Взаимная ориентация Солнца и ДНА была таковой, что при вхождении Солнца в ДНА открытая часть Солнца, расположенная вблизи его северного полюса, попадала в центр ДНА (Рис. 2). Необходимо напомнить, что в районах северного и южного полюсов Солнца существуют корональные дыры. Таким образом, в центральную часть ДНА попадала корональная дыра северного полюса Солнца, что очень важно иметь в виду при моделировании кривой затмения. На Рис. 7 приведены модельная и реальная кривые радиоизлучения Солнца и Луны на длине волны 13 см во время наблюдения максимальной фазы солнечного затмения на РАТАН-600. Рис. 7 демонстрирует хорошее совпадение этих кривых.

В том случае, когда при моделировании яркостные температуры Солнца от лимба Солнца до расстояний $1.15 R_C$ задавались, а на расстояниях больших $1.15 R_C$ определялись с использованием формулы Баумбаха-Аллена результаты моделирования оказались неудовлетворительными. Расчёты показали, что яркостные температуры, рассчитанные для участка $(1.15 - 1.4) R_C$, превышают значения, необходимые для согласования модели с реальной записью затмения. Вероятной причиной этого может быть влияние корональной дыры северного полюса Солнца, для которой яркостные температуры оказались значительно меньше, чем ожидалось. Попытка использовать распределения яркостных температур для радиоизлучения спокойного Солнца, приведенные в работах [9, 10], также оказалась неудачной: яркостные температуры были слишком высокими, что хорошо демонстрирует Рис. 3. Подобранный нами ряд яркостных температур, который хорошо удовлетворяет наблюдательным данным, имеет значение яркостной температуры $T_b = 3 \times 10^4$ К на расстоянии $1.0 R_C$ от центра оптического диска Солнца. Это значение яркостной температуры согласуется со средней яркостной температурой корональных дыр, наблюдавшихся на длине волны 11.7 см [9, 10]. Однако уже на расстоянии, равном $1.02 R_C$ от центра оптического диска Солнца яркостная температура резко падает до $T_b = 10^4$ К. Как видно из Рис. 3, распределение яркостных температур модели, которая максимально близка к реальной записи наблюдения, значительно отличается от распределений T_b спокойного Солнца и от распределения T_b , вычисленного для участка $(1.15 - 1.4) R_C$ с использованием формулы Баумбаха-Аллена.

Размер вертикальной ДНА на длине волны 13 см равен сорока угловым минутам. При вхождении Солнца в ДНА в центральную часть ДНА в основном попала корональная дыра северного полюса Солнца. Поэтому мы вправе считать, что полученный результат моделирования распределения яркостной температуры в короне на длине волны 13 см обусловлен влиянием корональной дыры над северным полюсом Солнца.

5. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработана методика построения модели радиоизлучения открытой части Солнца и Луны во время наблюдений максимальной фазы ($\Phi = 0.98$) солнечного затмения на длине волны 13 см на РАТАН-600.
2. Математическая модель Солнца и Луны задана в виде набора концентрических колец с равномерным распределением яркости внутри них в предположении гипотезы о круговой симметрии. Хорошее совпадение модели и реальной записи радиоизлучения Солнца на волне 13 см во время наблюдения максимальной фазы солнечного затмения достигается при следующих яркостных температурах солнечной короны: $T_{bN}^C = 10^3 \times (30.0, 20.0, 10.0, 9.0, 8.5, 8.0, 7.5, 7.0, 6.5, 5.9, 4.5, 3.7, 2.0, 1.0, 0.5)$ К и соответствующих значениях расстояний от центра оптического диска Солнца: $R_N^C = (1.0, 1.01, 1.02, 1.03, 1.04, 1.05, 1.06, 1.07, 1.08, 1.1, 1.15, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5)$.
3. Выявлено резкое падение яркостной температуры с $T_b = 3 \times 10^4$ К на лимбе Солнца до $T_b = 10^4$ К в корональной дыре на расстоянии 1.02 радиуса Солнца.
4. Формула Баумбаха-Аллена, использованная нами при определении яркостных температур короны на расстояниях вплоть до $1.4 R_C$ от центра оптического диска Солнца, не даёт согласия модели с реальным наблюдением.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты РФФИ (08-02-00378а, 11-02-00072) и программами ПАН-16 и ОФН-15.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О. А. Голубчина и Г. С. Голубчин, *Известия САО* **14**, 125 (1981).
2. В. М. Богод, *Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца*, 7–12 июля 2008 г., (Санкт-Петербург, Россия, 2008), стр. 63.
3. О. А. Голубчина, В. М. Богод, А. Н. Коржавин и др., *Астрофизический бюллетень* **63**, 36 (2008).
4. В. М. Богод, О. А. Голубчина, Г. Н. Жеканис и др., *Астрофизический бюллетень* **62**, 379 (2007).
5. Nelson L. Reginald, O. C. St. Cyr, Joseph M. Davila, et al., *Sol. Phys.* **260**, 347 (2009).
6. Г. З. Айзенберг, В. Г. Ямпольский, О. Н. Терёшин, *Антенны УКВ*, М.: Связь, 1977.
7. В. В. Железняков, *Радиоизлучение Солнца и планет*, М.: Наука, 1964.
8. В. В. Соболев, *Курс теоретической астрофизики*, М.: Наука, 1967.
9. В. Н. Боровик, М. Ш. Курбанов, М. А. Лифшиц и Б. И. Рябов, *Астрон. ж.* **67**, 1038 (1990).
10. V. N. Borovik, *Lectures Notes in Physics*, **432**, 185 (1994).
11. О. А. Голубчина, *Известия САО* **21**, 75 (1986).
12. О. А. Голубчина, *Известия САО* **21**, 85 (1986).

BRIGHTNESS TEMPERATURE DISTRIBUTION IN SOLAR CORONA BASED ON RATAN-600 OBSERVATIONS OF THE MAXIMUM PHASE OF THE MARCH 29, 2006 SOLAR ECLIPSE

O. A. Golubchina, A. N. Korzhavin, S. Kh. Tokhchukova

We describe the technique and results of modelling the solar radio emission during the maximum phase of the solar eclipse of March 29, 2006 on the RATAN-600. The aim of modelling is to refine the brightness temperature of the solar corona at the distances up to two solar radii from the center of the optical disk of the Sun. We obtained the distribution of brightness temperature in the vicinity of the coronal hole above the solar North Pole at the wavelength of 13 cm. The results of modelling showed that brightness temperatures of the coronal hole at the distances greater than $1.02 R_C$ (here R_C is the radius of the optical disk of the Sun) is substantially lower than the expected average brightness temperature of a typical coronal hole, and that of the quiescent Sun (below 30000 K) at the wavelength of 13 cm. The classical Baumbach–Allen formula for electron density in a spherically symmetric corona agrees with the results of observations starting at distances of $(1.4–1.5) R_C$.

Key words: *Sun: corona—radio lines: stars*