

УДК 523.98

Структура радиоисточников на волнах 10.5 и 12.0 см по наблюдениям солнечного затмения 29 марта 2006 г.

Ю.Ф. Юровский

НИИ “Крымская Астрофизическая Обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 20 июля 2006 г.

Аннотация. Наблюдения затмения проводились в Лаборатории радиоастрономии НИИ “КрАО” в п. Кацивели на стационарной аппаратуре Службы Солнца на волнах 10.5 и 12.0 см. По полученным данным определена яркостная температура невозмущенных участков диска Солнца в эпоху минимума солнечной активности между 23-м и 24-м 11-летними циклами, оказавшаяся равной на волне 10.5 см $T_{d10.5} = (43.7 \pm 0.5)10^3$ К и на волне 12.0 см – $T_{d12.0} = (51.8 \pm 0.5)10^3$ К. Вычислено распределение радиояркостности над лимбовой группой пятен NOAA 0866, показавшее, что источник на обеих волнах состоял из компактного яркого ядра размерами около $50 \cdot 10^3$ км с температурой $T_{b10.5} = 0.94 \cdot 10^6$ К и $T_{b12.0} = 2.15 \cdot 10^6$ К, расположенного на высоте, соответственно, $h_{10.5} = 33.5 \cdot 10^3$ км и $h_{12.0} = 43.3 \cdot 10^3$ км над пятном, и протяженного гало с температурой $T_b = (230 - 300)10^3$ К, простиравшегося до высоты $157 \cdot 10^3$ км над фотосферой. Выявленная пространственная структура локального источника соответствует общепринятому предположению о том, что излучение яркой части источника генерируется электронами в магнитном поле пятен на второй-третьей гармонике циклотронной частоты, а гало является тормозным излучением тепловых электронов в корональной конденсации, образующей активную область. По результатам затмения электронная концентрация вблизи верхней границы конденсации была равна $N_e \approx 2.3 \cdot 10^8$ см⁻³, а оптическая толщина составляла около $\tau \approx 0.1$ при кинетической температуре $T_e \approx 10^6$ К. Таким образом, наблюдения затмения 29 марта 2006 г. позволили экспериментально определить протяженность корональной конденсации по высоте в эпоху минимума солнечной активности и оценить физические параметры плазмы вблизи ее верхней границы.

STRUCTURE OF RADIO SOURCES AT WAVELENGTH 10.5 AND 12.0 CM ON THE BASIS OF OBSERVATIONS OF SOLAR ECLIPSE ON MARCH 29, 2006, by *Yu.F. Yurovsky*. The observations of eclipse were carried out at Laboratory of radio astronomy of SRI CrAO in Katsiveli by means of stationary equipment of Solar Service at wavelengths 10.5 and 12.0 cm. On the base of obtained data the brightness temperature of undisturbed parts of solar disk was determined in epoch of solar activity minimum between 23 and 24 11-year's cycles. At wavelength 10.5 cm the temperature was equal to $T_{d10.5} = (43.7 \pm 0.5)10^3$ K and at wavelength 12.0 cm $T_{d12.0} = (51.8 \pm 0.5)10^3$ K. The distribution of radio brightness above the group of spots NOAA 0866 was calculated. It is shown that at both wavelengths the source consists of a compact bright nucleus about $50 \cdot 10^3$ km in size with temperature $T_{b10.5} = 0.94 \cdot 10^6$ K and $T_{b12.0} = 2.15 \cdot 10^6$ K, which is located at heights $h_{10.5} = 33.5 \cdot 10^3$ km and $h_{12.0} = 43.3 \cdot 10^3$ km above the spot, and an extended halo with temperature $T_b = (230 - 300)10^3$ K, reached up a height of $157 \cdot 10^3$ km above photosphere. The revealed structure of a local source corresponds to the standard assumption that the radiation of the bright part of source is generated by electrons in the magnetic fields of spots on the second - third harmonic of cyclotron frequency, and the halo is a free-free radiation of thermal electrons in coronal condensation forming an active region. According to

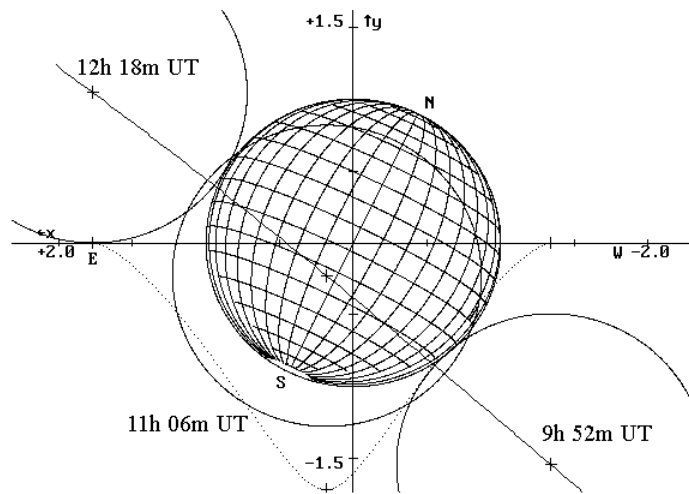


Рис. 1. Обстоятельства затмения 29 марта 2006 г. в пункте наблюдений Кацивели.

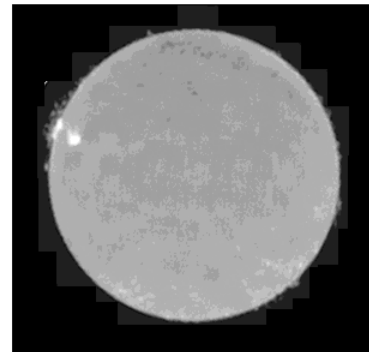


Рис. 2. Радиоизображение Солнца 29 марта 2006 г. на волне 1.37 см

results of eclipse the electron concentration near the top border of condensation was $N_e \approx 2.3 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$, the optical thickness was about $\tau \approx 0.1$ and electron temperature was $T_e \approx 10^6 \text{ K}$. Thus, the observation of eclipse on March 29, 2006 allowed us to determine experimentally the height of coronal condensation in epoch of solar activity minimum and to estimate physical parameters of plasma near its top border.

Ключевые слова: солнечное затмение, локальные источники радиоизлучения

1 Введение

Состояние атмосферы Солнца непрерывно изменяется как с долговременным 11-летним циклом, так и более быстро в зависимости от количества пятен на его поверхности. Эти изменения сопровождаются вариациями интенсивности солнечного радиоизлучения. Наблюдения радио-затмений дают сведения для определения размеров, положения и эффективной температуры источников радиоизлучения, а также позволяют судить о высоте излучающего слоя в атмосфере Солнца. Полоса затмения 29 марта 2006 г. проходила по территории Лаборатории радиоастрономии НИИ "КрАО". Наблюдения на стационарной аппаратуре, предназначенной для ежедневных наблюдений Солнца, позволили получить высококачественные записи затмения на волнах 10.5 и 12.0 см. На основе этих данных была определена пространственная структура и некоторые физические свойства атмосферы Солнца, соответствующие минимуму его активности между 23-м и 24-м 11-летними циклами.

2 Обстоятельства затмения и параметры аппаратуры

Обстоятельства затмения в пункте наблюдений были сравнительно благоприятными. В момент максимальной фазы затмения Луна закрывала 0.858 видимой поверхности диска Солнца. Первый контакт происходил при расположении Солнца вблизи местного меридиана, благодаря чему тропосферные флуктуации принимаемого сигнала были минимальными. Высота Солнца над горизонтом составляла 49° в начале затмения, а в конце затмения уменьшилась до 37° . Легкая

облачность не мешала наблюдать фазы затмения в оптический гид. Было выяснено, что моменты 1-го и 4-го контактов совпадают с точностью ± 10 с с эфемеридами (рис. 1), рассчитанными с помощью компьютерной программы, составленной и любезно предоставленной нам Г.Б. Гельфрейхом и А.Н. Коржавиным (ГАО-САО РАН).

По данным (Интернет-1) в день затмения на диске Солнца наблюдалось две группы пятен: NOAA 0865 и NOAA 0866. Группа 0865 с координатами S12E48 была развивающейся, состояла из 10 пятен общей площадью 130 МДП, но ее вспышечная активность была очень низкой и в течение дня в ней не было зарегистрировано ни одной вспышки. Группа 0866 появилась на восточном лимбе лишь 28 марта, имела координаты S06E72 и включала одно пятно площадью 70 МДП. Над группами на волне 1.37 см (Интернет-2) наблюдалось повышенное радиоизлучение (локальные источники). В некоторых местах на лимбе имелись детали, выходявшие за пределы радиодиска (рис. 2).

Плотность потока в день затмения на волне 10.7 см составляла $81.7 \cdot 10^{-22}$ Вт/(м²Гц) по данным станции Оттава (Интернет-3), принятой в качестве опорной в Мировой сети станций Службы Солнца. Минимальное значение потока в предзатменный период наблюдалось в интервале дат 09 марта–18 марта 2006 г. и равнялось $72 \cdot 10^{-22}$ Вт/(м²Гц). Увеличение потока на 9 СЕП (СЕП–солнечные единицы потока, 1 СЕП= 10^{-22} Вт/(м²Гц)) ко дню затмения связано, по-видимому, с излучением активных областей.

Согласно усредненным данным, опубликованным в (Шимамбукуро, 1980), отношение величины потока на волне 12 см к потоку на волне 10 см составляет $F_{12}/F_{10} \approx 0.889$. На основе этого отношения и данных Оттавы можно полагать, что поток от невозмущенного Солнца на волне 12.0 см в день затмения был равен $F_{12} \approx 66.7$ СЕП. Величина потока в день затмения возросла из-за наличия локальных источников и внезатменный поток 29 марта 2006 г. на волне 12.0 см оказался равен 84.7 СЕП.

2.1 Аппаратура и подготовка данных наблюдений для анализа

Радиотелескоп на волны 10.5 и 12 см представлял собой параболическую антенну диаметром 3 м, установленную в радиопрозрачном куполе и снабженную электрическим приводом по часовому углу. В фокусе параболоида установлен совмещенный облучатель, соединенный с радиометрами модуляционного типа. Полоса пропускания каждого канала составляла 40 МГц, постоянная времени была выбрана равной 1 с. Точность регистрации потока (ширина шумовой дорожки) определялась тропосферными флуктуациями и в часы затмения составляла около 0.2% внезатменного потока Солнца. Сигнал дискретизировался на 1024 уровня (кванта) и запись осуществлялась в цифровом виде с частотой отсчетов 1 Гц.

Модуляция сигнала при наблюдениях осуществлялась путем переключения входов радиометров с антенны на эквивалент с частотой 1000 Гц. Эквивалент антенны имел "комнатную" температуру (около 293 К), а температура неба в диапазоне 10 см волн составляла приблизительно 20 К. Фазовые детекторы радиометров выделяют пониженную относительно эквивалента температуру неба как сигнал отрицательной полярности. В результате Солнце наблюдается на фоне как бы "отрицательной" температуры. Эта температура была измерена сразу после окончания затмения путем отвода антенны от направления на Солнце. Затем она была вычтена из исходной записи.

Регистрация потока Солнца в предшествующий затмению день и на следующий день после затмения показала, что вариации записей имеют сходный характер и вызваны, по-видимому, погрешностями аппаратуры и поглощением в тропосфере. Поэтому можно полагать, что и в день затмения эти вариации имели подобный характер. На этом основании был вычислен средний по этим двум дням коэффициент вариаций и затем затменные кривые были умножены на этот коэффициент для устранения тропосферных вариаций из наблюдения затмения.

Записи затмения, подготовленные описанным способом для дальнейшего анализа, на волнах 10.5 и 12.0 см заметно отличаются друг от друга, что свидетельствует о различном распределении радиояркости по диску Солнца даже при разности длин волн всего на 20% .



Рис. 3. В день затмения на волне 1.75 см в районе I-го контакта над лимбом наблюдался компактный радиосточник.

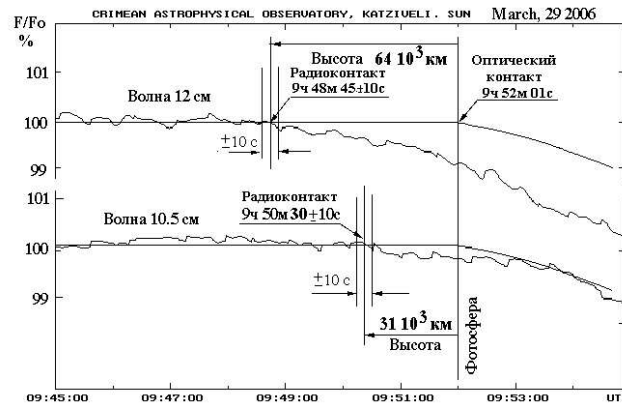


Рис. 4. Определение высоты излучающего слоя по моменту I-го радиоконтакта на волнах 10.5 и 12.0 см.

3 Высота излучающего слоя в районе первого радиоконтакта на волнах 10.5 и 12.0 см.

По данным измерений в оптическом диапазоне в районе первого контакта заметных групп пятен в предыдущие дни и в день затмения не наблюдалось. Однако на волне 1.75 см по данным радиогелиографа Nobeyama (Интернет-2) как раз в точке I-го контакта над лимбом наблюдалось локальное повышение радиояркостности (рис. 3). Следовательно, в данном случае по моменту радиоконтакта можно найти высоту излучающего слоя локального источника, а не край диска невозмущенного Солнца.

Момент первого оптического контакта в пункте наблюдений произошел в 9 ч 52 мин 01 с UT. Моменты радиоконтактов были найдены по записям радиозатмения как устойчивое уменьшение уровня потока Солнца, превышающее ширину шумовой дорожки. На рис.4 показаны участки записей на длинах волн 10.5 и 12.0 см, включающие момент I-го контакта, и кривые закрытия площади диска с радиусом, равным радиусу фотосферы. Радиоконтакт на волне 10.5 см произошел раньше оптического контакта на $1 \text{ мин } 35 \pm 10 \text{ с}$. По известной из эфемерид линейной скорости лунного лимба в проекции на диск Солнца $V_{\text{л}} \approx 0.31 \cdot 10^3 \text{ км/с}$ находим, что граница излучающего слоя на этой длине волны 29.03.2006 г. находилась на высоте $h_{10.5} \approx (29 \pm 3) \cdot 10^3 \text{ км}$, или в угловом масштабе располагалась на расстоянии $h_{10.5} = 1'22''$ от фотосферы. Аналогично для волны 12.0 см находим $h_{12.0} = 2'48''$, или $h_{12.0} \approx (62 \pm 3) \cdot 10^3 \text{ км}$.

Регулярная рефракция в сферически симметричной солнечной атмосфере смещает видимое положение источника в сторону центра диска, т. е. истинная высота источника излучения в действительности несколько больше, чем видимая. Оценка величины рефракционного смещения по методике, изложенной в (Железняков, 1964), дает поправку Δh к видимой высоте h на волнах 10.5 и 12.0 см приблизительно $\Delta h \approx 2.1 \cdot 10^3 \text{ км}$. Это значение меньше погрешности наших измерений, тем не менее добавим поправку к найденным значениям и окончательно получим: $h_{10.5} \approx (31 \pm 3) \cdot 10^3 \text{ км}$, $h_{12.0} \approx (64 \pm 3) \cdot 10^3 \text{ км}$.

Наличие радиояркой детали в районе I-го контакта на волне 1.75 см не позволяет рассматривать найденную высоту излучающего слоя как границу излучающей поверхности невозмущенного Солнца. По-видимому, это верхняя граница слабой корональной конденсации, расположенной над участком Солнца, не содержавшем видимых пятен.

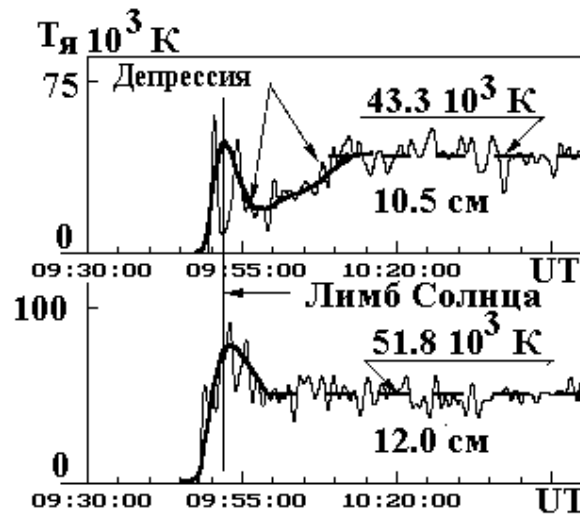


Рис. 5. Распределение яркостной температуры, полученное в течение закрытия невозмущенного участка диска Солнца.

4 Радиояркость невозмущенного Солнца.

По изменению потока во время затмения имеется возможность найти эффективную (эквивалентную) температуру абсолютно черного тела, излучающего такую же мощность, как и реальное Солнце. Радиояркостная температура излучающей области определяется по известной формуле (Железняков, 1964):

$$T_b = \frac{dF \cdot \lambda^2}{2k \cdot d\Omega} K, \quad (1)$$

где dF – перепад потока на исследуемом интервале времени в Вт/(м²Гц);

λ – длина волны в м;

$k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град – постоянная Больцмана;

$d\Omega = 4\pi \sin^2(32R_d/240)dA/A$ – телесный угол в стер, занимаемый излучающей площадкой;

R_d – радиорadius Солнца в единицах радиуса фотосферы $R_\odot \approx 700 \cdot 10^3$ км;

dA – площадь открываемой или закрываемой площадки в произвольных единицах измерения;

$A=1$ – площадь всего диска Солнца с радиусом R_d в тех же единицах измерения.

Известно, что на волнах длиннее 10 см протяженность радиосолнца вдоль экватора больше, чем в полярном направлении, т.е. Солнце в радиолучах не круглое. Для сравнения результатов различных наблюдений принято вычислять радиояркость диска, имеющего некоторый средний радиус. Для определенности будем полагать, что невозмущенное Солнце представляет собой равномерно излучающий диск с радиусом, соответствующим моменту 1-го радиоконтакта. Тогда по найденной высоте границы излучающего слоя находим радиорadius Солнца в долях радиуса фотосферы: $R_{10.5} \approx (1.044 \pm 0.004)R_\odot$ и $R_{12.0} \approx (1.091 \pm 0.004)R_\odot$.

Конвекция в приповерхностном слое Солнца никогда не прекращается и постоянно возмущает вышележащие слои. Поэтому невозмущенными участками солнечной поверхности называют те из них, на которых отсутствуют пятна, флоккулы и другие образования (кроме грануляции), ясно видимые в оптическом диапазоне. Здесь мы будем считать невозмущенными те участки диска, на которых по данным гелиографа Нобеяма нет ярких образований в радиолучах на волне 1.37 см.

Закрытие на волне 12.0 см в течение интервала времени 10:00–10:45 UT части диска невозмущенного Солнца радиусом $R_{12.0} = 1.091R_\odot$ привело к изменению потока на 36.0 СЕП и при этом закрылось 0.5389 площади диска, телесный угол которой составлял $3.66 \cdot 10^{-5}$ стер. Отсюда

находим усредненную по этой площади температуру $T_{d(zakr)} = 51.3 \cdot 10^3$ К. При открытии диска в интервале 11:20–12:00 UT аналогичные оценки дают $T_{d(otkr)} = 52.3 \cdot 10^3$ К. Средняя температура получается равной $T_{d12.0} = (51.8 \pm 0.5)10^3$ К. На волне 10.5 см вычисления яркостной температуры таким же способом дали величину $T_{d10.5} = (43.7 \pm 0.5)10^3$ К.

Данные затмения позволяют также вычислить по формуле (1) яркостную температуру более узких "серпов" диска и получить таким образом более детальное представление о распределении яркостной температуры невозмущенного Солнца. Результат расчета на двух длинах волн для интервала времени 9:30:00–10:50:00 UT представлен на рис. 5. Для уменьшения флуктуаций, вызванных шумами на записях затмения, приращение потока определялось за интервал времени 20 с, а полученные кривые были сглажены скользящим средним с окном 60 с, хотя при этом пришлось примириться с неизбежным ухудшением углового разрешения.

Характерной особенностью найденных распределений является увеличение яркостной температуры вблизи лимба Солнца. Закрытие лимбового поярчания на волне 12.0 см происходило в течение 4 мин 30 с, изменение потока составило около 1.6 СЕП. За это время диск Луны закрыл 0.02 (2%) площади радиодиска. Усредненная по этой площади яркостная температура составила $T_{b12.0} = 61.4 \cdot 10^3$ К, но в максимуме температура была несколько больше (см. рис. 5) и достигала приблизительно $80 \cdot 10^3$ К. На волне 10.5 см температура в максимуме поярчания оказалась несколько меньше, около $T_{b10.5} = 50 \cdot 10^3$ К. Поярчание вблизи лимба объясняется увеличением длины пути радиолуча в "горячей" короне при приближении к краю диска. Однако найденная по материалам данного затмения численная величина поярчания может иметь некоторую погрешность из-за следов активности, наблюдавшихся на волне 1.75 см в районе I-го контакта.

Из-за шумов положение максимумов поярчания определено с погрешностью $\pm 20 \cdot 10^3$ км. В результате можно лишь утверждать, что на обеих волнах максимумы поярчания находились приблизительно на лимбе Солнца, но разницу в их положениях на двух волнах по нашим наблюдениям надежно установить не удалось.

Особенностью распределения радиояркости на волне 10.5 см является наличие области пониженной яркости (депрессии) до величины $T_d \approx 20 \cdot 10^3$ К, располагавшейся вблизи западного края диска Солнца. Реальность депрессии подтверждается открытием этой области после максимальной фазы затмения. В интервале времени 10:15–10:25 UT скорость нарастания потока была меньше, чем должна была бы быть при открытии диска с яркостной температурой $T_{d10.5} = 43.3 \cdot 10^3$ К. Однако происходившее перед этим закрытие локального источника, связанного с активной областью NOAA 0866, вносит некоторую неопределенность в распределение температуры, что препятствует получению численных оценок по этому участку кривой открытия. На волне 12.0 см в соответствующих интервалах времени (рис. 5) пониженная радиояркостная температура не наблюдалась ни при закрытии, ни при открытии.

5 Локальные источники радиоизлучения на волнах 10.5 и 12.0 см.

Резкие перепады потока, соответствующие покрытию диском Луны локальных радиоисточников, произошли в интервале времени 10:55–11:05 UT вблизи максимальной фазы затмения и в интервале 12:07–12:25 UT, захватывающем область IV контакта. Закрытие и открытие источников происходило на фоне сопутствующего закрытия/открытия участков диска невозмущенного Солнца. Этот вклад необходимо вычесть для выделения излучения только локальных источников. Если диск невозмущенного Солнца считать равномерно ярким, то величина потока от него в течение затмения будет пропорциональна площади открытой части диска. Вклад локальных источников будет смещать кривую покрытия площади по оси ординат на величину потока источников в течение времени их закрытия/открытия.

Пример такой обработки данных показан на рис. 6. Кривые закрытия равномерно ярких дисков довольно точно совпадают на обеих волнах с кривыми затмения в интервалах времени 10:00–10:50 UT и 11:15–12:00 UT, в течение которых не происходило закрытия/открытия заметных локальных источников, поток от которых превышал бы погрешность измерений. Найдем параметры тех радиоисточников, перепад потока при закрытии которых существенно превышал шумы.

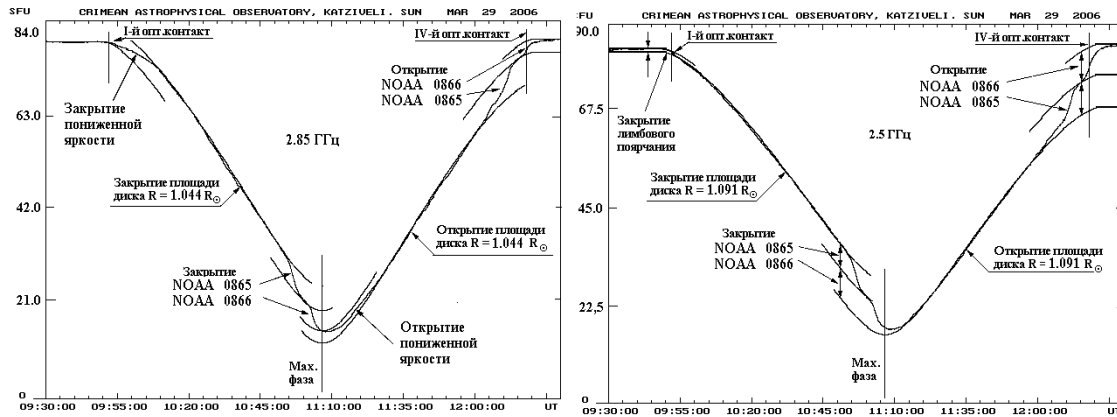


Рис. 6. Совмещение реальных записей затмения на волнах 10.5 см и 12.0 см с кривыми закрытия площади равномерно ярких дисков радиусом 1.044 и 1.091 радиуса фотосферы.

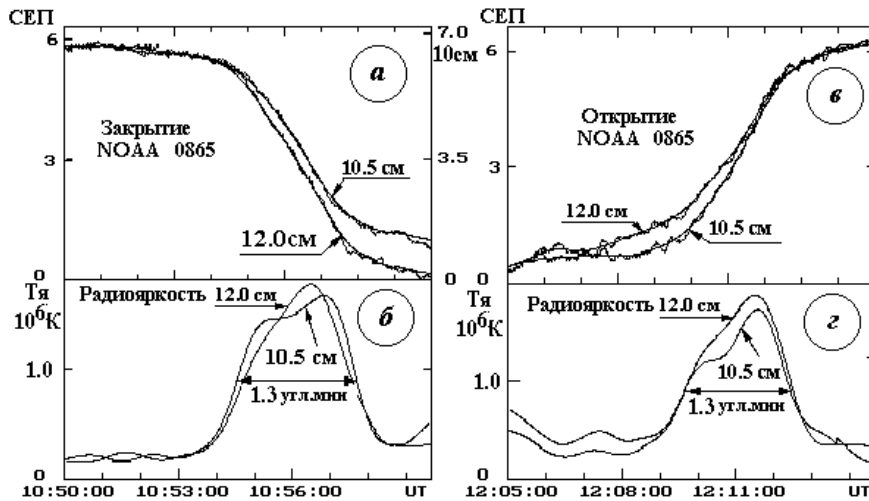


Рис. 7. Локальный источник над NOAA 0865, а - изменение потока, б - распределение яркостной температуры при закрытии источника, в и г - то же при его открытии.

5.1 Локальный источник NOAA 0865

Этот радиоисточник закрывался в интервале 10:54-10:58:00 UT. После вычитания излучения невозмущенного Солнца изменение потока приняло вид, показанный на рис.7,а,в. Для уменьшения шумов кривые были сглажены скользящим средним. Результат сглаживания нанесен на исходные кривые и практически полностью совпадает с ними.

Время закрытия и открытия этого радиоисточника составило около 3 мин. на обеих длинах волн. При скорости Луны $0.429' / \text{мин}$ размер источников в направлении движения края Луны получается равным $1.29'$. Обстоятельства данного затмения были таковы, что при закрытии и открытии источника лимб Луны перемещался практически в одном и том же направлении, т.е. были получены одномерные сканы по источнику. Для определенности при вычислении яркостной температуры будем полагать, что в пределах половинной интенсивности источник обладал круговой симметрией. В этом случае телесный угол можно вычислить с помощью выражения $\Omega = 6.8 \left(\frac{d}{32}\right)^2 10^{-5}$ стер, где d – диаметр источника в угл. мин. Перепад потока при закрытии этой центральной части источника

составил 4 СЕП. Отсюда по формуле (1) находим, что усредненная яркостная температура равна $T_{b10.5} = 1.42 \cdot 10^6$ К на волне 10.5 см и $T_{b12.0} = 1.86 \cdot 10^6$ К на волне 12.0 см.

Материалы наблюдений позволяют вычислить одномерное распределение радиояркости по источнику, но при этом приходится предполагать, что в направлении, перпендикулярном скану, радиояркость равномерна. Результаты вычислений показаны на рис. 7, панели б (закрытие) и г (открытие источников). По уровню половинной яркостной температуры размеры источников на обеих волнах приблизительно одинаковы. Совпадает (с точностью наших измерений) и их положение на диске Солнца. Распределение несколько несимметрично относительно своей середины, причем на более короткой волне 10.5 см эта асимметрия проявляется в виде расположения максимума яркости над восточной (хвостовой) частью группы пятен, а не над наибольшим головным пятном.

5.2 Радиоисточник над NOAA 0866

Группа пятен NOAA 0866 находилась в часы затмения вблизи восточного лимба Солнца и состояла из одного видимого пятна, имевшего координаты S06E72. Траектория Луны проходила практически через центр пятна. Поэтому в течение затмения для этого источника было получено распределение интенсивности по высоте. Результаты наблюдений изображены на рис.8. Радиоисточник оказался существенно несимметричным относительно своего максимума излучения. Его наиболее яркая часть закрывалась в течение приблизительно 2.5 минут в интервале 11:02:00–11:04:30 UT. Скорость Луны в это время составляла $V_L = 0.45$ '/мин. и ее край переместился за 2.5 мин. на $1.13'$. Поток при этом уменьшился на 3.5 СЕП (на $2/3$ внезатменной величины). Яркостная температура этой центральной части источника по половинной интенсивности составила $T_{b10.5} = 1.64 \cdot 10^6$ К и $T_{b12.0} = 2.15 \cdot 10^6$ К при угловых размерах около $1.13'$ на обеих волнах. Остальная $1/3$ потока закрывалась в течение последующих 8-ми минут. Следует учесть, что закрытие источника происходило вблизи максимальной фазы затмения и сопровождалось одновременным закрытием восточного лимба и открытием западного лимба Солнца (известный эффект "вращения серпа" вблизи максимальной фазы). При этом вклад лимбового поярчения, по-видимому, изменялся, так как в полярных областях Солнца лимбовое поярчение отсутствует. Эти вариации потока могли исказить действительные изменения интенсивности, связанные с закрытием источника. Поэтому более надежным следует признать наблюдение распределения яркостной температуры в течение открытия радиоисточника в районе IV контакта, когда Луна уже не затмевала радиодиск Солнца (рис. 8, панели б и г).

Угловой размер центральной наиболее яркой части источника оказался таким же, как и при закрытии и равным $1.13'$ на обеих волнах. Яркостная температура на волне 12.0 см также практически не изменилась и осталась равной $T_{b12.0} = 2.15 \cdot 10^6$ К. Но на волне 10.5 см перепад потока получился заметно меньше, чем при закрытии, и составил всего около 2 СЕП вместо 3.5 СЕП. Соответственно и яркостная температура центральной части источника на этой волне получилась несколько меньше: $T_{b10.5} = 0.94 \cdot 10^6$ К. По-видимому, расхождение возникло из-за того, что при закрытии источника на волне 10.5 см происходило одновременное открытие области пониженной яркости, не учтенное при обработке данных, так как при вычислениях предполагалось, что в этот интервал времени открывался равномерно яркий диск с температурой $T_{d10.5} = (43.7 \pm 0.5)10^3$ К. На волне 12.0 см пониженная яркость не наблюдалась и вычисление параметров радиоисточника не были искажены.

В оптическом диапазоне закрытие пятна произошло в 11:01:18 UT, а открытие – в 12:16:18 UT, т.е. на 1 мин 42 с раньше максимума радиояркости на волне 10.5 см. За это время край Луны переместился в картинной плоскости на $33.5 \cdot 10^3$ км. Следовательно, максимум яркостной температуры на этой волне располагался над пятном на высоте $33.5 \cdot 10^3$ км. На волне 12.0 см максимум открылся еще на 30 с позже, т.е. находился на $9.8 \cdot 10^3$ км выше, на расстоянии $43.3 \cdot 10^3$ км от фотосферы.

Как видно на рис.8, панель в, после открытия наиболее яркой части источника и после окончания оптического затмения поток продолжал монотонно увеличиваться как и при закрытии еще в течение

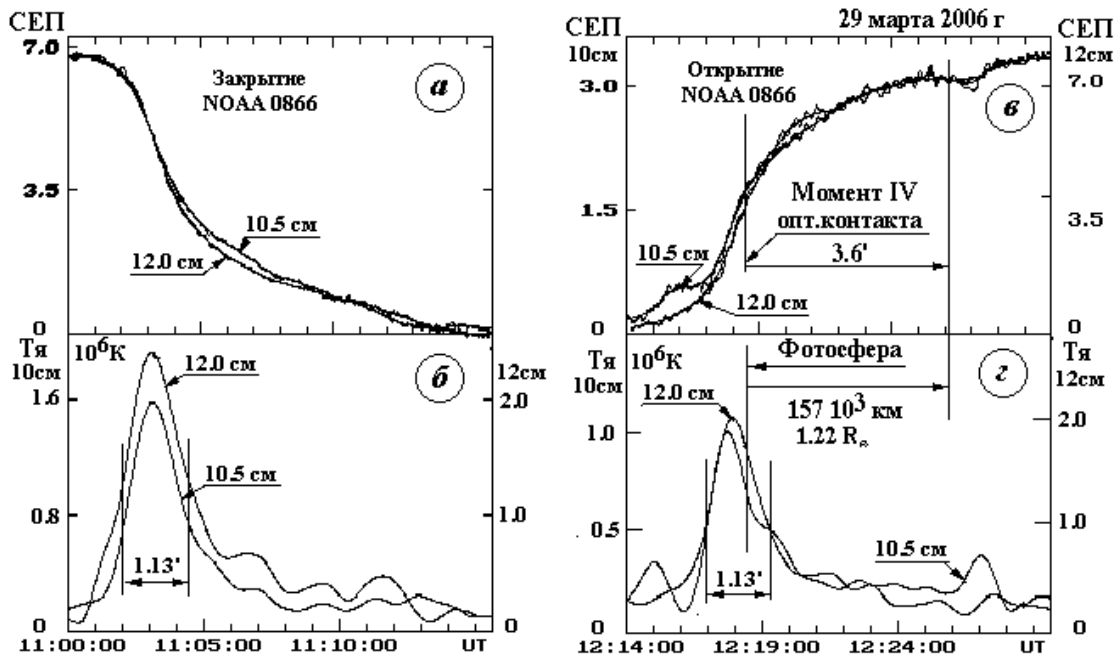


Рис. 8. Локальный источник над NOAA 0866 на волнах 10.5 и 12.0 см. а - изменение потока, б - распределение радиояркости при закрытии источника, в и г - то же при его открытии.

приблизительно 8 минут с 12:18:30 до 12:26:30 UT. За это время край Луны удалился от лимба Солнца на 3.6'. Следовательно, связанные с NOAA 0866 радиоисточники на волнах 10.5 и 12.0 см имели протяженность по высоте до $1.22 R_{\odot}$ или до $157 \cdot 10^3$ км над фотосферой.

6 Оценка физических параметров плазмы в районе генерации радиоизлучения

Первоначально происхождение медленно меняющегося компонента солнечного радиоизлучения объяснялось как тормозное излучение электронов в уплотненной плазме над активной областью. Эти уплотнения были названы корональными конденсациями. Предполагалось, что они имеют приблизительно форму полусферы (Вальдмайер, Мюллер, 1950). Дальнейшее накопление наблюдательных данных привело к выводу о том, что корональная конденсация, вероятнее всего, представляет собой вытянутое по высоте образование, которое наблюдается в оптическом диапазоне как протяженный корональный луч (рис. 9) (Ньюкирк, 1961). Параметры луча оценивались с привлечением данных о его радиоизлучении, которое по-прежнему считалось тормозного происхождения. Однако некоторые свойства радиоизлучения оказалось невозможно объяснить действием только тормозного механизма. Наблюдения с высоким угловым разрешением привели к выводу о том, что радиоизлучение активной области состоит из компактного пятенного компонента и более протяженного излучения флоккульного поля, окружающего пятна. Предполагается, что пятенный компонент излучается на 2-:-3-й гармонике гирочастоты в магнитном поле над пятнами (Железняков, 1964). Имеются данные и о существовании межпятенного компонента синхротронной природы.

После исчезновения пятен на месте группы еще длительное время остается флоккульное поле. Корреляция наблюдаемого потока с площадью пятен улучшается, если кроме площади существующих пятен учитывать излучение флоккулов на месте уже распавшихся групп. Считается, что радиоизлучение флоккульного поля возникает благодаря тормозному излучению электронов в

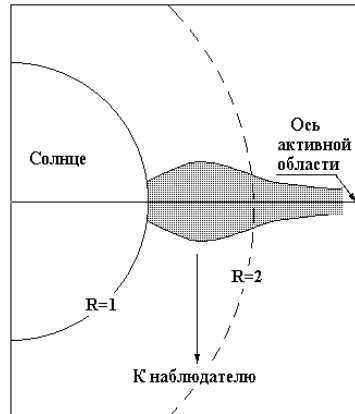


Рис. 9. Модель корональной конденсации (корональный луч Ньюкирка).

корональной конденсации.

Материалы наблюдения данного затмения в общих чертах соответствуют описанной структуре локального источника. Оценим по полученным данным некоторые физические свойства корональной конденсации. По-видимому, наиболее яркая часть радиоисточников соответствует пятенному компоненту. Оценим напряженность магнитного поля, необходимую для излучения на третьей гармонике циклотронной частоты, соответствующей длине волны 10.5 -:- 12.0 см. Так как циклотронная частота $\omega_H = \frac{eH_0}{mc}$, а ее третья гармоника $f_3 = f_H \cdot 3$, то

$$H_3 = \frac{2\pi \cdot f_3 \cdot m \cdot c}{3e}.$$

Здесь $f_3 = 2,7 \cdot 10^9$ Гц – частота третьей гармоники, $e = 4,8 \cdot 10^{-10}$ СГС, $m = 9,1 \cdot 10^{-28}$ г – заряд и масса электрона. Т. е. излучение генерируется в магнитных полях с напряженностью $H_3 = 320$ Э. Следовательно, такая напряженность магнитного поля существовала над группой пятен NOAA 0866 на высоте $(30-40)10^3$ км.

Температура солнечной атмосферы приближается к 10^6 К уже на высоте $15 \cdot 10^3$ км. Поэтому найденная яркостная температура радиоисточника на волне 10.5 см $T_{b10.5} = 0,94 \cdot 10^6$ К может рассматриваться как признак излучения тепловых электронов. На волне 12.0 см температура наиболее яркой части достигает $T_{b12.0} = 2,15 \cdot 10^6$ К. Хотя на этой волне источник расположен на $10 \cdot 10^3$ км выше, чем на волне 10.5 см, тем не менее, такая температура уже близка к предельной температуре короны. По-видимому, в излучении участвовали электроны, ускоренные до скорости, превышающей тепловую скорость.

Над яркой компактной частью источника располагалась протяженная область более слабого излучения, которое можно считать тормозным излучением электронов корональной конденсации. Температура этого ореола вблизи яркой части составляла $T_b = (250-300)10^3$ К и затем уменьшалась по мере увеличения высоты до величины $100 \cdot 10^3$ К (рис. 7). Так как высота границы этого компонента радиоисточника достигает $157 \cdot 10^3$ км, где температура короны около $T_k = 10^6$ К, то приходится предполагать, что источник имел оптическую толщину порядка $\tau \approx \frac{T_b}{T_k} \approx 0,1$. Если геометрическая форма конденсации соответствует корональному лучу Ньюкирка (рис. 9), то длина пути радиолуча s будет мало меняться с высотой и в нашем случае будет приблизительно равна $s \approx 150 \cdot 10^3$ км.

Учитывая, что $\tau \approx \kappa(\lambda)s$, коэффициент поглощения $\kappa(\lambda) = \frac{N_e^2}{f^2 T_e^{3/2}} \Lambda$, и $\Lambda = 0,124$ (де Ягер, 1962), найдем электронную концентрацию вблизи верхней границы радиоисточника:

$$N_{e(obs)} = \sqrt{0,1 \cdot f^2 T_e^{3/2} / \Lambda / s} = 2,3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$$

На оси корональной конденсации в модели Ньюкирка электронная концентрация равна $N_e(R) = 4.2 \cdot 10^4 \times 10^{(4.32/R)} \times 1.97$ (Ньюкирк, 1961). На высоте $150 \cdot 10^3$ км $R = 1.214R_\odot$. Отсюда находим определяемую параметрами модели электронную концентрацию: $N_{e(mod)} = 2.99 \cdot 10^8$ см⁻³. Различие между измеренным $N_{e(obs)}$ и модельным значением $N_{e(mod)}$ получилось несущественным.

Таким образом, результаты наблюдения затмения подтверждают двухкомпонентную модель радиоисточника и уточняют высоту расположения излучающих слоев. Можно полагать, что на волне 10-12 см радиоисточник состоит из яркого ядра магнитотормозного излучения, расположенного на высоте (30-40) 10^3 км, окруженного полупрозрачным куполом тормозного излучения протяженностью по высоте до $\approx 160 \cdot 10^3$ км.

7 Заключение

Анализ наблюдений солнечного затмения 29.03.2006 г в эпоху минимума активности Солнца привел к следующим результатам:

1. В районе I-го контакта на гелиошироте S25 граница излучающего слоя на длине волны 10.5 см находилась на высоте $h_{10.5} \approx (31 \pm 3)10^3$ км, а на волне 12.0 см – на высоте $h_{12.0} \approx (64 \pm 3)10^3$ км от фотосферы.

2. Яркостная температура невозмущенных участков диска Солнца была равна $T_{d10.5} = (43.7 \pm 0.5)10^3$ К на волне 10.5 см и $T_{d12.0} = (51.8 \pm 0.5)10^3$ К на волне 12 см.

3. Положение максимума лимбового поярчания на обеих длинах волн совпадало с оптическим лимбом. Размер поярчания вдоль траектории центра лунного диска составлял около $0.03R_\odot$ ($21 \cdot 10^3$ км), а яркостная температура была $T_{b10.5} \approx 50 \cdot 10^3$ К на волне 10.5 см и $T_{b12.0} \approx 80 \cdot 10^3$ К на волне 12.0 см.

4. Локальный источник над группой пятен NOAA 0865 на обеих волнах имел размер $1.29'$ в направлении движения края Луны. Яркостная температура как при закрытии, так и при открытии была одинаковой и равнялась $T_{b10.5} = 1.42 \cdot 10^6$ К на волне 10.5 см и $T_{b12.0} = 1.86 \cdot 10^6$ К на волне 12.0 см.

5. Радиоисточник над лимбовой группой пятен NOAA 0866 состоял из центральной части размером около $1.13'$ с яркостной температурой $T_{b10.5} = 0.94 \cdot 10^6$ К и $T_{b12.0} = 2.15 \cdot 10^6$ К, и менее интенсивного протяженного гало, простиравшегося до высоты $1.22R_\odot$ (до $157 \cdot 10^3$ км) над фотосферой, где его яркостная температура составляла около $0.1 \cdot 10^6$ К. Максимум яркостной температуры на волне 10.5 см располагался над пятном на высоте $33.5 \cdot 10^3$ км, а на волне 12.0 см – на высоте $43.3 \cdot 10^3$ км.

6. Структура радиоисточника, найденная по данным затмения, содержала на волнах 10-12 см яркое ядро магнитотормозного излучения, расположенное на высоте (30-40) 10^3 км над пятном, где напряженность магнитного поля была 320 Э. Ядро было окружено полупрозрачным куполом тормозного излучения протяженностью по высоте до $\approx 160 \cdot 10^3$ км над фотосферой, на верхней границе которого электронная концентрация была около $N_e = 2.3 \cdot 10^8$ см⁻³.

Литература

- Железняков В.В. // Радиоизлучение Солнца и планет. М.: "Наука". 1964. 560 с.
 Шкловский И.С. // Физика солнечной короны. М.: ГИФМЛ. 1962. 516 с.
 К. де Ягер. // Строение и динамика атмосферы Солнца. М.: ИЛ. 1962. 376 с.
 Ньюкирк (Newkirk G.) // Astrophys.J. 1961. V.133. No.3. P.983-1013.
 Вальдмайер, Мюллер (Waldmeier, M., Muller, H.) // Zs. Astrophys. 1950. V.27. P.58.
 Интернет-1: <http://umbra.nascom.nasa.gov/images/latest.html>
 Интернет-2: <http://solar.nro.nao.ac.jp/>
 Интернет-3: http://www.drao-ofr.hia-ihh.nrc-cnrc.gc.ca/icarus/www/sol_home.shtml
 Шимабукуро Ф.И. // в Сб. "Поток энергии Солнца и его изменения" под редакцией О.Уайта. Изд. "Мир". 1980. 558 с.