

УДК 523.98

## Наблюдения в Крыму солнечного затмения 1 августа 2008 г. на волнах 10.5 и 12 см в эпоху минимума солнечной активности

Ю. Ф. Юровский

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный  
*yurovuf@yandex.ru*

Поступила в редакцию 20 декабря 2008 г.

**Аннотация.** Анализ наблюдений затмения 1 августа 2008 г. на волнах 10.5 и 12 см показал, что в эпоху глубокого минимума между 23-м и 24-м циклами солнечной активности радиорadius диска Солнца в экваториальном направлении был на  $120 \cdot 10^3$  км больше радиорadiusа в полярном направлении. При этом яркостная температура полярной области оказалась порядка  $(35-37) \cdot 10^3$  К и соответствовала выходу излучения из верхних слоев хромосферы с высоты около  $11 \cdot 10^3$  км. На гелиошироте  $< 25^\circ$  за пределами видимого диска на расстоянии около  $70 \cdot 10^3$  км от фотосферы наблюдалось повышение радиояркостности до  $100 \cdot 10^3$  К, что свидетельствует об увеличении концентрации электронов в экваториальной зоне короны при полном отсутствии групп пятен на диске Солнца.

OBSERVATION IN CRIMEA OF SOLAR ECLIPSE OF AUGUST, 1 2008 AT WAVELENGTH 10.5 AND 12 CM IN THE EPOCH OF A MINIMUM OF SUN ACTIVITY, by Yu. Yurovsky. Analysis of observation of eclipse of August, 1, 2008 at wavelengths of 10.5 and 12 cm showed, that in the epoch of deep minimum between the 23th and 24th cycles of sun activity a radioradius of solar disk in equatorial direction was large on  $120 \cdot 10^3$  km in comparison with the radioradius in polar direction. The brightness temperature of polar region was equal about  $(35-37) \cdot 10^3$  K and it corresponded to the radiation of emission from the upper layers of chromosphere with a height an about  $11 \cdot 10^3$  km. An increase of radio brightness up to  $100 \cdot 10^3$  K was observed on the helio-latitudes  $< 25^\circ$  outside of a visible disk in the distance of about  $70 \cdot 10^3$  km from a photosphere. That testifies to an increase the concentration of electrons in the equatorial zone of corona at complete absence of groups of spots on solar disk.

**Ключевые слова:** солнечное затмение, радиоизлучение Солнца

---

### 1 Введение

Наблюдения солнечных затмений в радиодиапазоне позволяют оценить распределение радиояркостности по диску Солнца благодаря известному с высокой точностью в каждый момент времени положению диска Луны. Полоса затмения 1 августа 2008 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 см. Плотность и структура солнечной короны, откуда выходит радиоизлучение, изменяется синхронно с 11-летним периодом солнечной активности. Таким образом, данные затмения

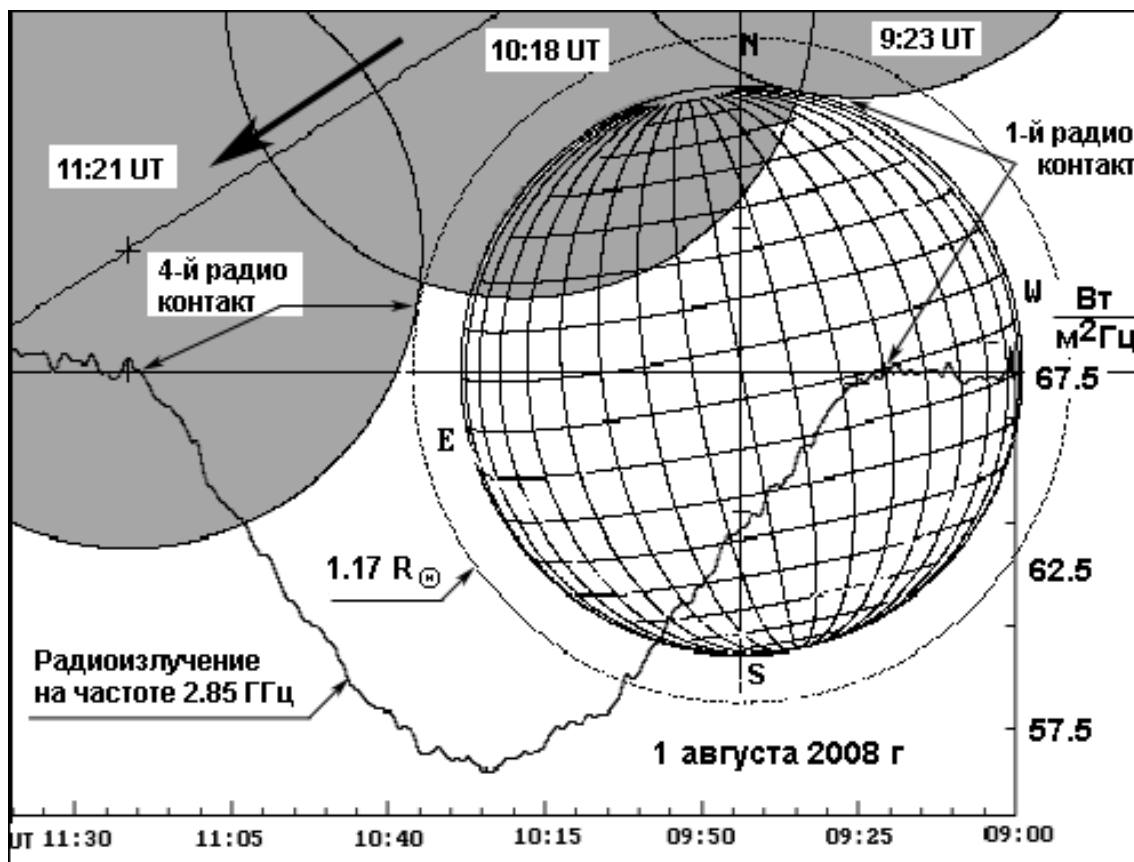


Рис. 1. Обстоятельства затмения в пункте наблюдений (НИИ "КрАО", Крым)

1 августа 2008 года характеризуют пространственную структуру и физические свойства атмосферы Солнца, соответствующие минимуму его активности между 23-м и 24-м 11-летними циклами.

Обстоятельства затмения в пункте наблюдений изложены во втором разделе. Технические параметры аппаратуры, методика наблюдения затмения и погрешности измерений приведены в третьем разделе. В четвертом разделе описана оценка высоты излучающего слоя в близполюсной зоне Солнца и в районе его экватора. Результаты вычисления радиояркостной температуры приведены в пятом разделе. В Заключении перечислены найденные по данным затмения количественные оценки параметров солнечной атмосферы.

## 2 Обстоятельства солнечного затмения 1 августа 2008 г в пункте наблюдений (Крым, п. Кацивели, РТ-22)

Наблюдения проводились в лаборатории радиоастрономии НИИ "КрАО" в Крыму (п. Кацивели) в точке с координатами 2 ч 15 мин 55 с восточной долготы и  $44^{\circ} 23' 20''$  северной широты. Первый оптический контакт наблюдался в 9 ч 23 мин мирового времени (UT). В момент максимальной фазы в 10:18 UT закрывалось 0.16 видимой площади фотосферы. Четвертый оптический контакт произошел в 11:12 UT, так что продолжительность оптического затмения составила около 1 ч 49 мин. В момент максимальной фазы Солнце находилось вблизи местного меридиана и его высота над горизонтом составляла  $63^{\circ}$ . Ветер практически отсутствовал, но иногда Солнце на непродолжительное время закрывалось легкими кучевыми облаками.

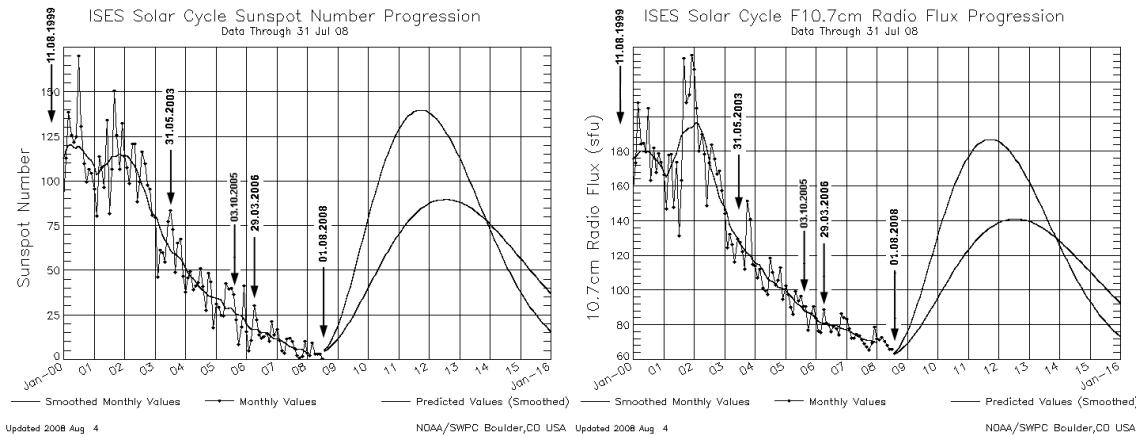


Рис. 2. Количество пятен (а) и плотность потока (б) были минимальны в день затмения 1 августа 2008 г.

Геометрические обстоятельства затмения были вычислены с помощью программы, разработанной и любезно предоставленной нам Г.Б. Гельфрейхом и А.Н. Коржавиным (ГАО-САО РАН). Общая картина наблюдавшегося явления показана на рис. 1. На этом же рисунке приведена полученная нами запись радиоизлучения Солнца на частоте 2.85 ГГц. Можно заметить, что первый радиоконтакт почти совпал по времени с моментом оптического контакта, но 4-й радиоконтакт наблюдался только через 9 минут после окончания оптического затмения. Это свидетельствует об эллиптичности радиоизображения Солнца.

Согласно измерениям на станции Пентиктон (<http://solar.pro.nao.ac.jp/>), принятой в качестве опорной в Мировой сети станций Службы Солнца, плотность потока на волне 10.7 составляла 67.5 СЕП (СЕП – солнечные единицы потока, 1 СЕП =  $10^{-22}$  Вт/м<sup>2</sup>Гц). По 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 Пентиктон можно полагать, что поток Солнца на волне 12.0 см в день затмения был равен  $F_{12} \approx 60.0$  СЕП.

По данным Центра космической среды (<http://sec.noaa.gov/Data/>) в день затмения на диске Солнца видимых групп пятен и флоккулов не наблюдалось, т. е. затмение происходило в эпоху минимума пятен и величины радиопотока между 23-м и 24-м 11-летними циклами солнечной активности (рис. 2, а, б).

### 3 Аппаратура и точность регистрации изменений потока Солнца

Наблюдения проводились на стационарном радиотелескопе НИИ “КрАО”, работающем на частотах 2.5 и 2.85 ГГц, на котором ведется регулярный мониторинг солнечной активности (Служба Солнца). Двухканальный радиотелескоп имеет параболическую антенну диаметром 3 м с электрическим приводом, расположенную для защиты от метеорологических воздействий в радиопрозрачном куполе диаметром 6 м. В фокусе параболоида установлен совмещенный облучатель линейной поляризации, соединенный с радиометрами модуляционного типа, настроенными на длины волн 12.0 и 10.5 см. Ширина диаграммы направленности радиотелескопа около 3°, антенная температура от невозмущенного Солнца на обеих волнах приблизительно равна  $T_a = 1500$  К. Радиометры имеют полосу пропускания 40 МГц и чувствительность  $\Delta T_a = 0.15$  К при  $\tau = 1$  с. Цифровая регистрация затмения производилась с частотой 1 Гц. Сигнал квантовался на  $\pm 512$  уровней. Получаемые на двух частотах данные записываются в один файл на соседние знакоместа, так что взаимная привязка данных по времени не завит от точности хода часов и сохраняется при любой манипуляции с исходным файлом. Результаты хранятся в базе данных, система управления которой позволяет отыскивать,

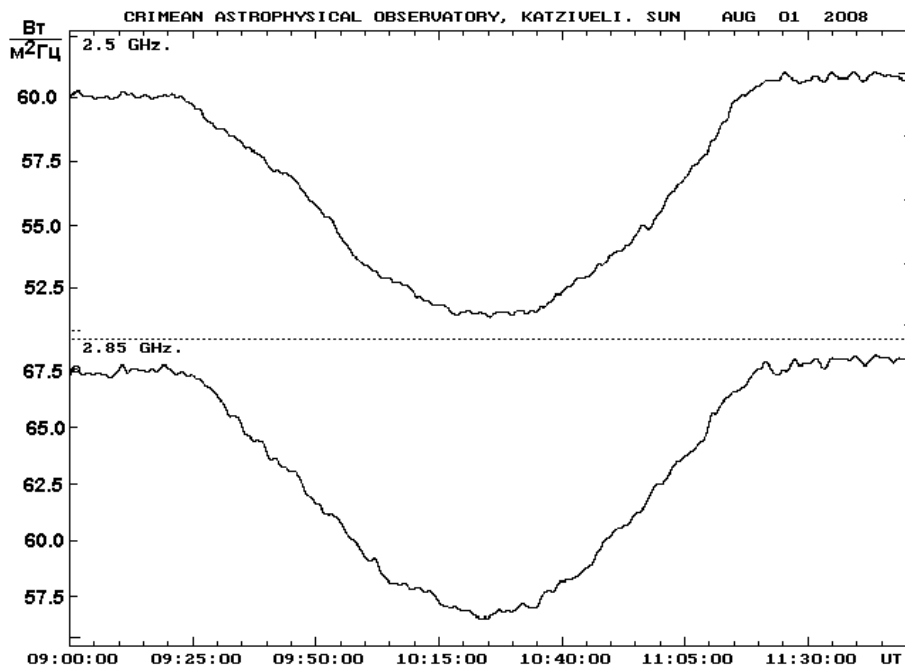


Рис. 3. Сглаженные кривые изменения солнечного потока в течение затмения

просматривать и извлекать необходимую цифровую запись для ее дальнейшей математической обработки.

### 3.1 Минимизация погрешностей наблюдения затмения.

При стандартных наблюдениях по программе Службы Солнца в НИИ “КрАО” используется квазиулевой метод, при котором излучение Солнца компенсируется сигналом генератора шума (ГШ) и радиометр записывает разностный сигнал, равный “нулю”. В этом случае вариации коэффициента усиления практически не сказываются на величине регистрируемого уровня Солнца. Но при затмении поток Солнца меняется из-за закрытия излучающего диска Луной и компенсация к “нулю” оказывается невозможной. Для обеспечения возможности устранения вариаций коэффициента усиления при записи затмения каждые 30 мин автоматически включался ГШ компенсации, и его сигнал вычитался из сигнала от Солнца. При анализе данных полученные “ступеньки” позволили учесть вариации коэффициента усиления.

При наблюдениях радиозатмений обычно предполагается, что любые изменения уровня сигнала являются результатом открытия/закрытия излучающих участков диска Солнца, а радиоизлучение самого Солнца неизменно в течение этого периода. Более совершенный метод заключается в проведении наблюдений из двух территориально разделенных пунктов, обстоятельства затмения в которых существенно различаются (см., например, Юровский и др., 1995). Поскольку затмение 1 августа 2008 г. наблюдалось нами в одном пункте, то нужно было в максимальной степени устранить вариации уровня сигнала, не связанные с затмением. Эти вариации могут возникать из-за изменения параметров аппаратуры, изменения прозрачности среды на пути радиолуча и из-за влияния отражений радиосигнала от местных предметов.

Контрольные наблюдения в предыдущие и последующие после затмения дни показали, что уровень записи потока Солнца в течение 2-х часов, соответствующих времени затмения, менялся приблизительно одинаково. Поэтому было предположено, что затмение происходило на фоне таких же изменений. Для их устранения из записи затмения были вычтены средние вариации за контрольные

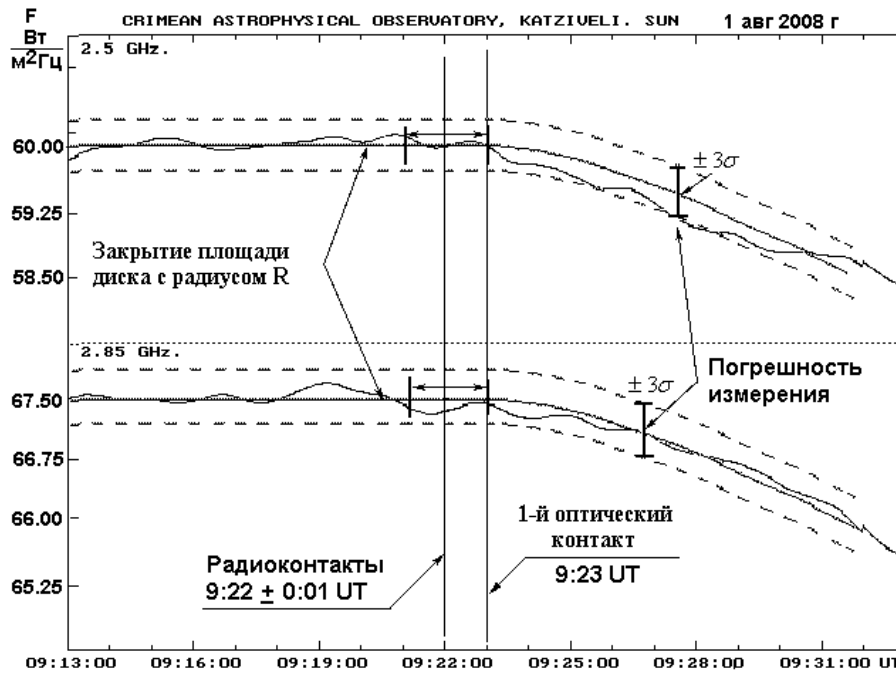


Рис. 4. 1-й радиоконтакт на обеих частотах наблюдений произошел на 1 минуту раньше оптического контакта

дни. Однако тропосферные вариации таким способом устранить не удалось, так как они не коррелированы на непересекающихся отрезках времени. В результате точность регистрации излучения Солнца оказалась хуже флуктуационной чувствительности радиометров.

Для оценки реальной точности регистрации использовался фрагмент контрольной записи 2 августа 2008 г. с 9:0:0 до 11:0:0 UT, содержащий интервал времени затмения. Тренд был исключен путем вычитания скользящего среднего с окном шириной 600 с. Было найдено, что среднеквадратичные флуктуации сглаженной записи равны  $\sigma = 0.18 \%$  внезатменной интенсивности Солнца. Если флуктуации имеют гауссовское распределение, то полный размах флуктуаций (ширина шумовой дорожки) с вероятностью 0.995 лежит в пределах  $\Delta I = 6\sigma = 1.1 \%$ . Следовательно, эффектами затмения в наших данных можно считать лишь отклонения записи от среднего более чем на 1.1 %.

Таким образом, после вычитания аппаратных флуктуаций и сглаживания скользящим средним были получены кривые, показанные на рис. 3, и использованные далее для анализа результатов наблюдения затмения.

#### 4 Высота излучающего слоя в районе радиоконтактов

Обстоятельства затмения были таковы, что 1-й контакт происходил в близполюсной зоне, а 4-й контакт наблюдался уже в экваториальной зоне Солнца. Это дает возможность оценить протяженность радиодиска в экваториальном и полярном направлениях. Разница между моментами оптического и радиоконтакта при известной скорости движения лунного диска позволяет определить высоту излучающего слоя над уровнем фотосферы.

Фрагмент записи, содержащей момент 1-го контакта, показан на рис. 4. На этом же рисунке изображены кривые закрытия площади равномерно излучающего диска с радиусом  $1.016 R_{\odot}$ . Штриховыми линиями показаны пределы возможного отклонения записи  $\pm 3\sigma$  от среднего, найденные по контрольной записи 2 августа. Из-за наличия шумов моменты радиоконтактов оказалось

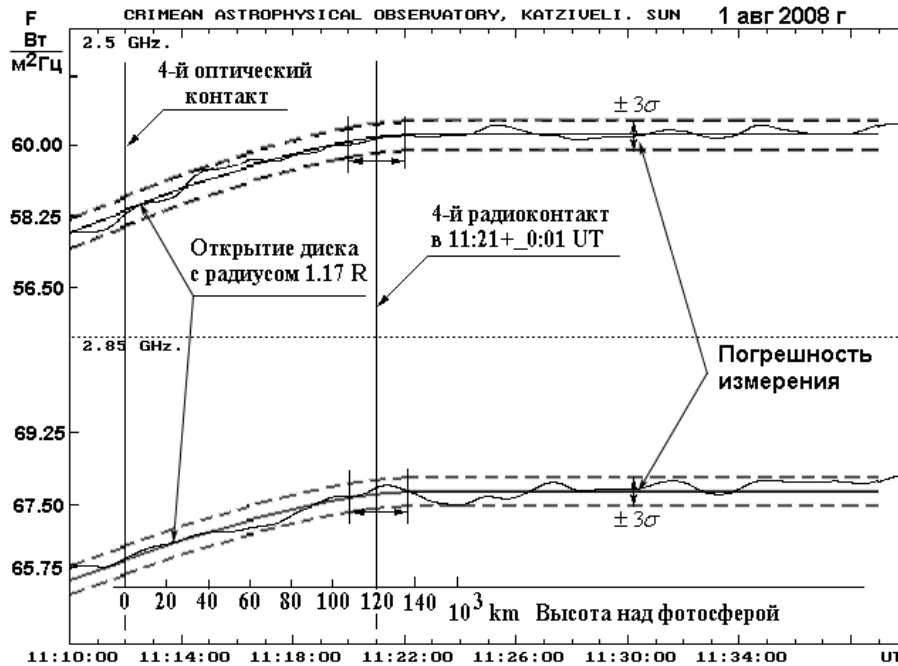


Рис. 5. В экваториальной области радиоизлучение выходит за край диска на  $120 \cdot 10^3$  км

возможным определить лишь с погрешностью  $\pm 1$  минута. Оказалось, что радиоконтакты на обеих частотах наблюдений произошли раньше оптического контакта приблизительно на 1 минуту. Скорость перемещения лунного лимба относительно видимого диска Солнца в момент 1-го контакта составляла  $11.2 \cdot 10^3$  км/мин. Следовательно, высота над фотосферой излучающего слоя в близполюсной зоне Солнца была около  $11 \cdot 10^3$  км ( $1.016 R_{\odot}$ ). Эта высота соответствует верхней области хромосферы, где температура достигает  $30 \cdot 10^3$  К (Шкловский, 1962).

4-й контакт наблюдался в северной полусфере Солнца на гелиошироте  $25^{\circ}$  и поэтому содержит сведения о параметрах экваториальной зоны солнечной атмосферы. Фрагмент записи вариаций радиоизлучения в интервале времени, включающем 4-й контакт, показан на рис. 5. Условные обозначения на этом рисунке идентичны обозначениям, описанным выше при анализе записи 1-го контакта. Радиозатмение продолжалось дольше оптического на  $9 \pm 1$  минут и 4-й радиокontakt наступил в  $11:21 \pm 0:01$  UT на обеих волнах наблюдений. По эфемеридам расстояние между центрами Луны и Солнца в момент 4-го контакта увеличивалось со скоростью  $0.17 R_{\odot}$  за 9 минут. Следовательно, лимб Луны в момент 4-го радиоконтакта находился от края Солнца приблизительно на расстоянии  $119 \cdot 10^3$  км. Для ориентировки в нижней части рис. 5 приведена шкала расстояния лунного лимба от фотосферы в каждый момент времени. Радиоизлучение прослеживалось до расстояния  $120 \cdot 10^3$  км, что соответствует радиорadiusу Солнца в экваториальном направлении, равному  $1.17 R_{\odot}$ . В соответствии с этим на рис. 5 показаны кривые открытия площади диска с радиусом  $1.17 R_{\odot}$ .

Известно, что форма короны меняется с фазой 11-летнего цикла солнечной активности. Корона эллиптическая в минимуме и более симметрична в максимуме цикла. Анализ моментов радиоконтактов во время затмения 1 августа 2008 г. позволил оценить степень эллиптичности в эпоху между 23 и 24 циклами. Выяснено, что на волнах 10 и 12 см радиорadius Солнца в экваториальном направлении был на  $120 \cdot 10^3$  км больше, чем в полярном направлении.

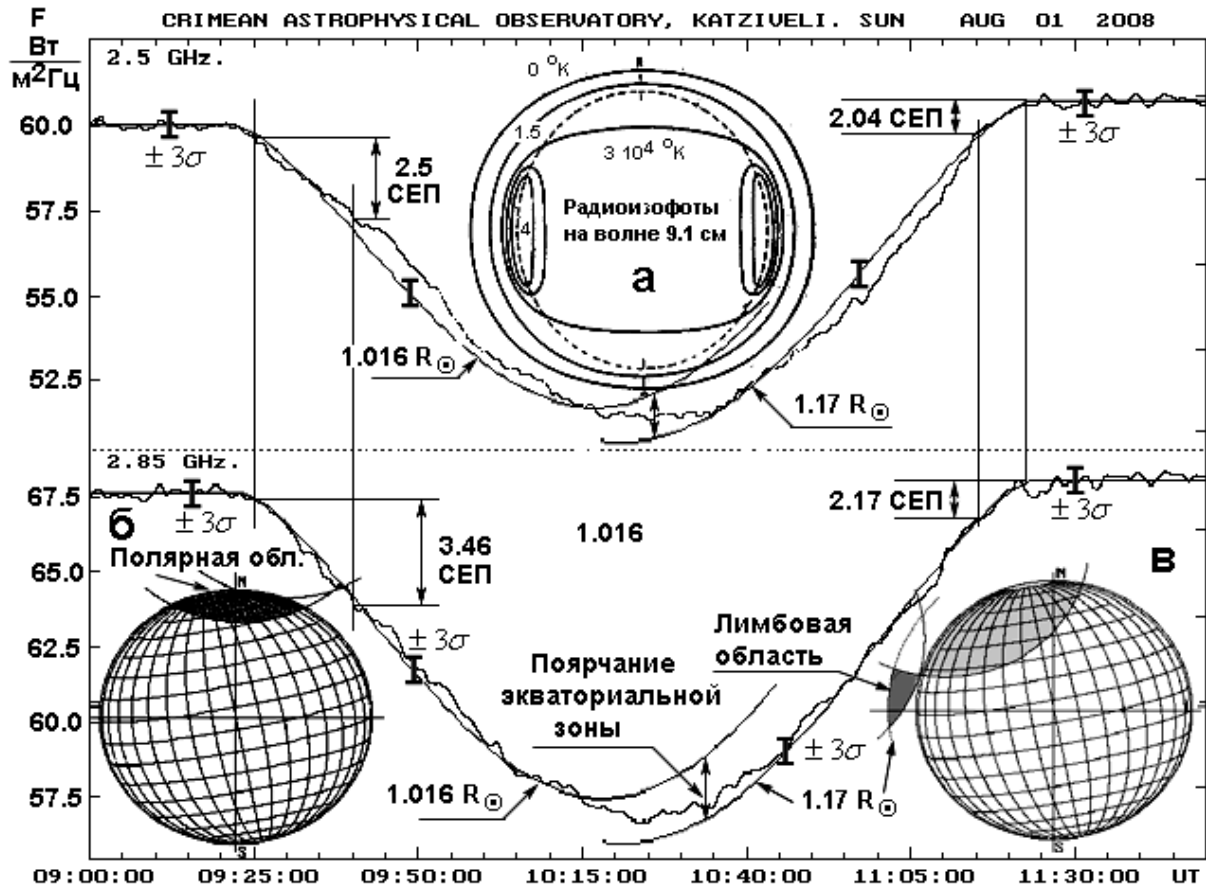


Рис. 6. Кривые затмения на обеих частотах удовлетворительно совпадают с кривыми закрытия площади диска с радиусом 1.016 R<sub>☉</sub> в области 1-го контакта и с радиусом 1.17 R<sub>☉</sub> в области 4-го контакта

### 5 Яркостная температура полярных и экваториальных участков диска 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):

$$T_b = \frac{dF \cdot \lambda^2}{2k \cdot d\Omega} K$$

где  $dF$  – перепад потока на исследуемом интервале времени в Вт/м<sup>2</sup>Гц;

$\lambda$  – длина волны в м;

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

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

$R_d$  – принятый для расчетов радиорadius Солнца в единицах радиуса фотосферы

$R_{☉} \approx 700 \cdot 10^3$  км;

$dA$  – площадь открывающейся или закрывающейся площадки в произвольных единицах измерения;

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

Известно, что распределение радиояркости по диску Солнца в диапазоне длин волн около 10 см неравномерное (рис. 5, а (Сваруп, 1961)). В течение данного затмения, в первой его половине, закрывались полярные области Солнца. Запись области 1-го радиоконтакта и последующее уменьшение потока удовлетворительно описывается кривой закрытия площади диска радиусом  $1.016 R_{\odot}$ . В течение интервала времени 9:25–9:40 UT закрылось  $\Delta s = 0.0581$  площади диска, телесный угол которой составлял  $d\Omega_1 = 0,395 \cdot 10^{-5}$  стер, что привело к изменению потока на  $dF = 3.46 \pm 0.7$  СЕП.

Отсюда находим усредненную по этой площади (рис. 5, б) температуру на волне 10.5 см  $T_{P10} = (35.8 \pm 0.4) \cdot 10^3$  К и на волне 12 см:  $T_{P12} = (37.3 \pm 0.4) \cdot 10^3$  К.

Вторая часть затмения в районе 4-го радиоконтакта лучше совпадает с кривой открытия площади диска радиусом  $1.17 R_{\odot}$ . Одномерность радиоскана во время затмения не позволяет однозначно восстановить распределение радиояркости без некоторых дополнительных предположений. Выбранная для вычислений выходящая за пределы солнечного диска область не захватывает полярную зону. Однако радиорadius  $1.17 R_{\odot}$  соответствует лишь моменту 4-го контакта на гелиошироте  $25^\circ$ , а на широте  $>50^\circ$  радиорadius скорее всего приближается к величине  $1.016 R_{\odot}$ , найденной по моменту 1-го контакта. Поэтому мы исключили ту часть области, широта которой больше  $50^\circ$ . В результате телесный угол для вычисления радиояркости оказался равным  $d\Omega = 0.08 \cdot 10^{-5}$  стер. Эта область обозначена более темной заливкой на рис. 5, в.

С учетом сделанных замечаний яркостная температура лимбовой области на волне 10.5 см составила  $T_{L10} = (90 \pm 0.9) \cdot 10^3$  К, а на волне 12 см –  $T_{L12} = (130 \pm 1.3) \cdot 10^3$  К. Поскольку это усредненная по всей площадке температура, то высоту излучающего слоя приходится также принять как среднюю высоту между крайними значениями, т. е. полагать, что указанная температура относится к слою, расположенному на высоте  $(60-70) \cdot 10^3$  км над фотосферой. Электронная температура на такой высоте уже достигает  $10^6$  К (Аллен, 1963). Так как измеренная температура существенно меньше, то, по-видимому, оптическая толщина вдоль луча меньше единицы и составляет около  $\tau = 0.1$ .

## 6 Заключение

Теория радиоизлучения спокойного Солнца была разработана сразу после его обнаружения. Последующие наблюдения показали, что тормозной механизм удовлетворительно описывает основные свойства этого излучения, включая увеличение радиояркости вблизи лимба. Однако некоторые особенности излучения связаны, по-видимому, с циклическими изменениями солнечной активности. Известно, например, что корона вытянута в экваториальном направлении в годы минимума 11-летнего цикла и более симметрична в эпоху максимума. Соответственно, радиоизображение Солнца оказывается эллиптическим и экваториальный радиорadius диска получается больше полярного радиуса. Но обычно измерение эллиптичности затрудняется наличием на диске Солнца локальных источников, связанных с группами пятен и флоккулами. Затмение 1 августа 2008 г. происходило в эпоху минимума солнечной активности, и по данным мировой сети станций Службы Солнца в это время на его поверхности не было видимых пятен и флоккулов. Следовательно, полученные нами результаты содержат сведения о свойствах невозмущенного Солнца, не искаженные присутствием активных образований.

Радиус в полярном направлении на обеих длинах волн наблюдений 10.5 и 12 см оказался одинаковым в пределах точности измерений и равным  $1.016 R_{\odot}$ . Это соответствует высоте излучающего слоя над фотосферой около  $11 \cdot 10^3$  км. Согласно общепринятой модели солнечной атмосферы это высота верхней области хромосферы, где электронная температура достигает  $30 \cdot 10^3$  К. Измерение яркостной температуры полярной области по результатам затмения на волне 10.5 см дало величину  $T_{P10} = (35.8 \pm 0.4) \cdot 10^3$  К и на волне 12 см:  $T_{P12} = (37.3 \pm 0.4) \cdot 10^3$  К. На этом основании можно заключить, что на высоких широтах радиоизлучение Солнца исходило из верхних слоев хромосферы, а вклад короны был незначителен из-за ее “прозрачности”.

Увеличение плотности короны в экваториальной зоне приводит к увеличению коэффициента поглощения и возрастанию оптической толщины короны. Поэтому радиозатмение экваториальной зоны продолжалось дольше оптического на  $9 \pm 1$  минут, что соответствует радиорadiusу Солнца



в экваториальном направлении равному  $1.17 R_{\odot}$ . Лимб Луны в момент 4-го радиоконтакта находился от края Солнца приблизительно на расстоянии  $119 \cdot 10^3$  км. Радиояркость рассчитывалась по площадке, центр которой находился над лимбом Солнца на расстоянии  $(60-70) \cdot 10^3$  км. Температура на такой высоте по данным общепринятой модели достигает  $10^6$  К, но измеренная температура составила только около  $100 \cdot 10^3$  К, что свидетельствует о величине оптической толщины вдоль луча порядка  $\tau = 0.1$ .

Таким образом, результаты анализа затмения 1 августа 2008 г. на волнах 10.5 и 12 см показали, что даже в эпоху глубокого минимума между 23-м и 24-м циклами солнечной активности радиорadius диска Солнца в экваториальном направлении был на  $120 \cdot 10^3$  км больше радиорadiusа в полярном направлении. При этом яркостная температура полярной области оказалась порядка  $(35-37) \cdot 10^3$  К и соответствовала выходу излучения из верхних слоев хромосферы. В экваториальной зоне за пределами видимого диска наблюдалась повышенная до  $100 \cdot 10^3$  К радиояркость, что свидетельствует об увеличении концентрации электронов в нижней короне при полном отсутствии групп пятен.

## Литература

- Аллен (Allen C.W.) // *Astrophysical Quantities*. Univers. of London. Athlone Press. 1963. P. 291.  
Железняков В.В. // *Радиоизлучение Солнца и планет*. М.: "Наука". 1964.  
Сваруп (Swarup G.) // *Astron. J.* 1961. V. 66. P. 296.  
Шимабукуро Ф.И. // *Поток энергии Солнца и его изменения*. / Ред. Уайт О. М.: Мир. 1980.  
Шкловский И.С. // *Физика солнечной короны*. ГИФМЛ. 1962.  
Юровский Ю.Ф., Поздняков М.М., Шевченко Г.И., Альварес О., Родригес Р., Сьерра П. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1995. Т. 89. С. 31.