

УДК 523.94:521.81

Радиоизлучение невозмущенного Солнца и локальных источников на волнах 5, 10.7, 12 и 95 см по наблюдениям затмения 4 января 2011 г. в Крыму

Ю. Ф. Юровский

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

Поступила в редакцию 18 октября 2011 г.

Аннотация. По наблюдениям затмения определены радиорadiусы Солнца $R_5 \approx (1.0 \pm 0.015)R_\odot$, $R_{10,12} \approx (1.05 \pm 0.003)R_\odot$ и $R_{95} \approx (1.2 \pm 0.02)R_\odot$ соответственно на волнах 5, 10.7, 12 и 95 см. Яркостная температура невозмущенных участков диска Солнца на этих волнах оказалась равной $Td_5 = (22 \pm 2) \cdot 10^3$, $Td_{10} = (44 \pm 3) \cdot 10^3$, $Td_{12} = (47 \pm 3) \cdot 10^3$ и $Td_{95} = (1000 \pm 30) \cdot 10^3$ К. Над группами пятен на коротких волнах 5, 10.7 и 12 см находились локальные источники радиоизлучения размерами от 1.9 до 2.4 угл. мин. с яркостной температурой от $80 \cdot 10^3$ до $1.75 \cdot 10^6$ К. На волне 95 см радиопоток локальных источников оказался ниже порога обнаружения $\pm 1.0 \cdot 10^{-22}$ Вт/м² Гц. Сравнение полученных величин с результатами наблюдения другого затмения 1 августа 2008 г., происходившего в эпоху минимума 11-летнего цикла солнечной активности, показало, что радиорadiус Солнца на волнах 10.7 и 12 см увеличился с $1.016 R_\odot$ до $1.05 \pm 0.003 R_\odot$, высота излучающего слоя на этих волнах переместилась с $11 \cdot 10^3$ км до $(30 \pm 7) \cdot 10^3$ км, яркостная температура “невозмущенного” Солнца возросла с $(35.8 \pm 0.4) \cdot 10^3$ К до $(44 \pm 3) \cdot 10^3$ К на волне 10.7 см и с $(37.3 \pm 0.4) \cdot 10^3$ К до $(47 \pm 3) \cdot 10^3$ К на волне 12 см. Следовательно, в связи с началом нового 24-го цикла солнечной активности параметры солнечной атмосферы за 2 года заметно изменились. Почти полное отсутствие локальных источников на наиболее длинной волне 95 см свидетельствует о том, что магнитные поля групп пятен 4.01.2011 г. были слабыми и не проникали на высоту, откуда могло исходить их излучение. Если это свойство присуще большинству групп пятен 24-го цикла, то оно может быть причиной его низкой вспышечной активности.

RADIO EMISSION OF THE QUIET SUN AND LOCAL SOURCES AT WAVELENGTHS 5, 10.7, 12 AND 95 CM DURING THE OBSERVATION OF ECLIPSE ON JANUARY 4, 2011 IN CRIMEA, by Yu.F. Yurovsky. The radio radiuses of the Sun are determined on the base of eclipse observations as $R_5 = (1.00.015)R_\odot$, $R_{10,12} = (1.050.003)R_\odot$ and $R_{95} = (1.20.02)R_\odot$ at wavelengths 5, 10.7, 12 and 95 cm. The brightness temperature of quiet areas of the solar disk at these wavelengths appeared equal $Td_5 = (22 \pm 2) \cdot 10^3$, $Td_{10} = (44 \pm 3) \cdot 10^3$, $Td_{12} = (47 \pm 3) \cdot 10^3$ and $Td_{95} = (1000 \pm 30) \cdot 10^3$ K. There were local sources of radio emission above the spot groups at short wavelengths 5, 10.7 and 12 cm and they had sizes from 1.9 to 2.4 angular min. with brightness temperature from $80 \cdot 10^3$ to $1.75 \cdot 10^6$ K. The radio flux of local sources at wavelength 95 cm appeared below the detection threshold $1.0 \cdot 10^{-22}$ W/m²Hz. The comparison of the obtained values to the results of observation of other eclipse on August 1, 2008, happened at the epoch of minimum of the 11-year cycle of solar activity, showed that the radio radius of the Sun at wavelengths 10.7 and 12 cm increased from $1.016 R_\odot$ to $(1.050 \pm 003)R_\odot$, the height of emissive layer at these wavelengths relocated from $11 \cdot 10^3$ km to $(30.7) \cdot 10^3$ km, the brightness temperature

of the quiet Sun increased from $(35.8 \pm 0.4) \cdot 10^3$ K to $(44.3) \cdot 10^3$ K at wavelength 10.7 cm, and from $(37.3 \pm 0.4) \cdot 10^3$ K to $(47.3) \cdot 10^3$ K at wavelength 12 cm. Consequently, during 2 years parameters of the solar atmosphere changed noticeably because of the beginning of the new 24th cycle of activity. Almost complete absence of local sources at the longest wavelength 95 cm testifies that magnetic fields of the spot groups 4.01.2011 were weak and did not penetrate at a height, their emission could come from. If this property is inherent to most sunspot groups of cycle 24, it can be the reason of its low flare activity.

Ключевые слова: солнечное затмение, радиоизлучение

1 Введение

Существование жизни на Земле обеспечивается энергией Солнца. В среднем суммарная энергия составляет около 1.3 кВт/м^2 . Однако множество факторов свидетельствуют о ее переменности с периодом около 11 лет (Шимабукуро, 1980). Наиболее очевидной характеристикой изменения поверхности Солнца является число видимых солнечных пятен, хромосферных факелов и солнечных вспышек (Шкловский, 1962). Все эти явления вместе получили наименование солнечной активности. Особенно зависимы от уровня солнечной активности новые высокотехнологические направления человеческой деятельности, такие как космонавтика, радиосвязь, навигация, дистанционные системы контроля и управления, протяженные линии электропередачи, нефтепроводы и газопроводы.

В диапазоне радиоспектра излучается ничтожно малая доля полной энергии Солнца, но радиоизлучение содержит ценную информацию о солнечной атмосфере и ее изменениях. Об этом свидетельствует сопоставление уровня радиоизлучения на волне 10.7 см со средним числом солнечных пятен (рис. 1). Поэтому радиоизлучение служит диагностическим средством при краткосрочном прогнозировании солнечных вспышек, извергающих частицы высокой энергии и магнитные поля, а также является индикатором уровня генерации ультрафиолетового и рентгеновского излучения.

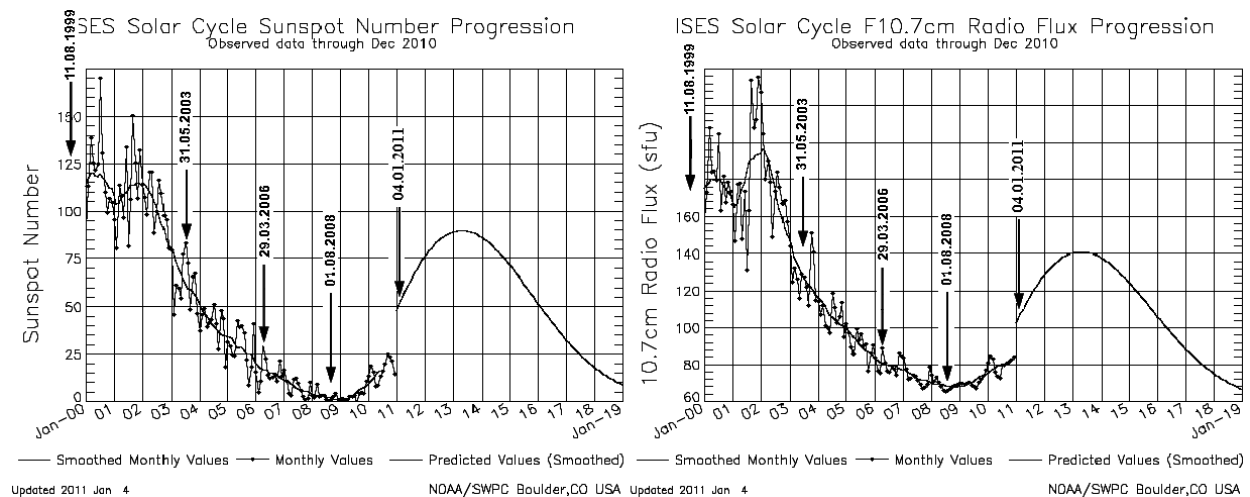


Рис. 1. Прогноз 24-го цикла солнечной активности 2011 года по данным NOAA/SWPC Boulder, CO USA (2011). Стрелками обозначены затмения, наблюдавшиеся в Крыму

В потоке радиоизлучения обычно различают излучение “спокойного” Солнца, медленно меняющийся компонент (или S-компонент) и радиовсплески (Железняков, 1964). Спокойное радиосолнце может быть представлено как абсолютно черное тело с видимой яркостной температурой от 6000 K

на волне 1 мм до более 10^6 К на метровых волнах. S-компонент генерируется в локальных районах солнечной атмосферы с высокими электронной концентрацией и напряженностью магнитного поля, которые связаны с активными областями. Быстро меняющееся излучение всплесков охватывает весь радиоспектр и имеет интенсивность, на несколько порядков превышающую интенсивность излучения спокойного Солнца.

Поскольку разные компоненты солнечного радиоизлучения генерируются в различных участках солнечной атмосферы, то для их изучения необходимы наблюдения с достаточным пространственным (угловым) разрешением. Такую возможность предоставляют солнечные затмения. Диск Луны закрывает/открывает диск Солнца и происходящие при этом вариации скорости изменения потока пропорциональны радиояркости затмеваемых участков. Так как положение Луны относительно Солнца известно с высокой точностью, то это позволяет сопоставлять положение и размеры наблюдаемых в радиолучах неоднородностей радиояркости с деталями солнечной атмосферы, видимыми в других диапазонах спектра, и на этой основе оценивать физические параметры излучающей области.

Затмение 4 января 2011 г. происходило на стадии роста текущего 24-го цикла солнечной активности. На рис. 1 заметно более медленное нарастание плотности потока на волне 10.7 см по сравнению с прогнозом 2011 г., подготовленным NOAA/SWPC Boulder, CO USA (2011). По сведениям Лаборатории рентгеновской астрономии Солнца (ФИАН, 2011) начало этого цикла отличалось также слабой вспышечной активностью.

Полоса этого затмения проходила по территории лаборатории радиоастрономии КрАО, что позволило произвести наблюдения на стационарной аппаратуре и получить высокое качество наблюдательных данных. Далее во втором разделе приведены обстоятельства затмения, дано краткое описание аппаратуры и общие сведения о состоянии Солнца в день затмения. В третьем разделе по моментам радиоконтактов найдена высота излучающего слоя на всех волнах наблюдений (определен радиорadius Солнца). Затем в четвертом разделе по найденному радиусу вычислена эффективная температура “невозмущенных” участков диска Солнца. В пятом разделе определена яркостная температура локальных источников радиоизлучения, связанных с группами пятен, закрытие/открытие которых сопровождалось появлением “ступенек” на кривых радиозатмения. В заключение проведено сравнение полученных данных с результатами наблюдения другого затмения, происшедшего 1 августа 2008 г. в фазе минимума 11-летнего цикла солнечной активности, и приведены общие выводы, полученные в результате наблюдения этих затмений.

2 Обстоятельства солнечного затмения 4 января 2011 г. в пункте наблюдений

Наблюдения затмения проводились в лаборатории радиоастрономии НИИ “КрАО” в Крыму в точке с координатами 2 ч 15 м 55 с восточной долготы и $44^{\circ} 23' 20''$ северной широты. Траектория Луны относительно Солнца была рассчитана по данным Астрономического ежегодника с помощью компьютерной программы, разработанной сотрудниками ГАО-САО РАН Г.Б. Гельфрейхом и А.Н. Коржавиным (рис. 2). Первый оптический контакт в пункте наблюдений происходил в 7:16 мирового времени (UT). В момент максимальной фазы в 8:48 UT закрывалось 64 % видимой площади фотосферы. Последний контакт наступил в 10:24 UT, когда Солнце находилось вблизи местного меридиана на высоте 23° над горизонтом. Скорость перемещения лунного лимба в проекции на диск Солнца в районе 1-го контакта составляла $14.7 \cdot 10^3$ км/мин, в районе 4-го контакта – $13.93 \cdot 10^3$ км/мин. Погодные условия были благоприятными, ветер и дождь отсутствовали, облачность была незначительной.

Аппаратура. Наблюдения проводились на 4-х радиотелескопах, на которых в КрАО осуществляется ежедневный мониторинг солнечной активности. На волнах 10.7 и 12 см оба радиометра установлены на одной параболической антенне диаметром 3 м, находящейся в радиопрозрачном куполе для защиты от неблагоприятных климатических воздействий. В подобном куполе находится и антенна радиотелескопа диаметром 2 м на длину волны 5 см. Крупногабаритная антенна радиотелескопа метрового диапазона, состоящая из 112 полуволновых вибраторов, установлена на открытом

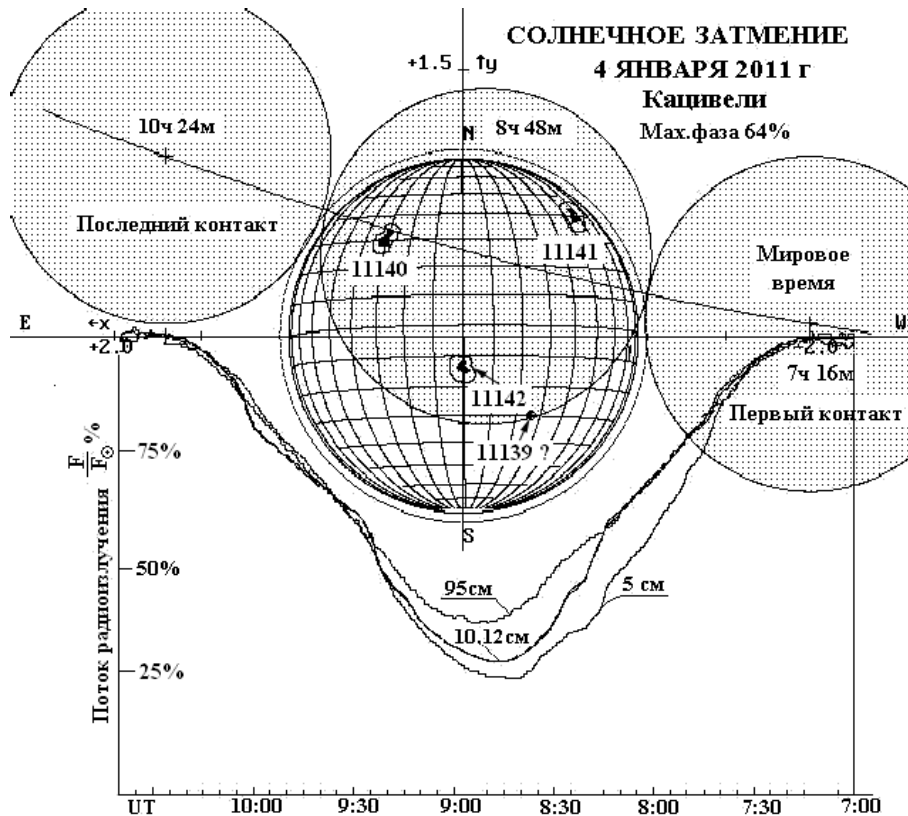


Рис. 2. Обстоятельства солнечного затмения 4 января 2011 г. в Крыму и графики изменения потока радиоизлучения в течение затмения на всех наблюдавшихся длинах волн

воздухе на параллактическом поворотном устройстве, обеспечивающем сопровождение Солнца при его суточном движении по небосводу. Все радиометры радиотелескопов – модуляционного типа, три из них, настроенные на 5 ГГц, 2.8 ГГц и 316 МГц, собраны по схеме прямого усиления, радиометр на частоту 2.5 ГГц – супергетеродинного типа. Чувствительность радиометров достаточно высокая, поэтому точность регистрации потока радиоизлучения Солнца определялась лишь флуктуациями сигнала тропосферного происхождения и влиянием отражения радиоволн от местных предметов (более подробные численные параметры аппаратуры приведены в статье Юровского, 2009).

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. По записям этих двух дней был вычислен средний коэффициент вариаций потока. Затем, полагая, что и в день затмения эти вариации имели подобный характер, затменные кривые были умножены на этот коэффициент для устранения тропосферных вариаций из наблюдения затмения. Общий вид полученных таким образом записей затмения на 4-х волнах показан на рис. 2. Для лучшей наглядности рисунка шкала ординат на каждой длине волны была вычислена в процентах от потока внезатменного Солнца. Вариации потока на записях соответствуют закрытию/открытию участков Солнца различной радиояркости. В связи с малым различием длин волн 10.7 и 12 см кривые затмения на частотах 2.85 и 2.5 ГГц практически совпали во всех деталях. Это свидетельствует о достаточно высоком качестве полученных записей.

Активные области 4 января 2011 г. Для сопоставления характера радиоизлучения с деталями солнечной атмосферы, видимыми в других диапазонах спектра, использовались данные, публикуемые на интернет-странице SolarMonitor (2011 а,б), содержащей информацию об активных областях

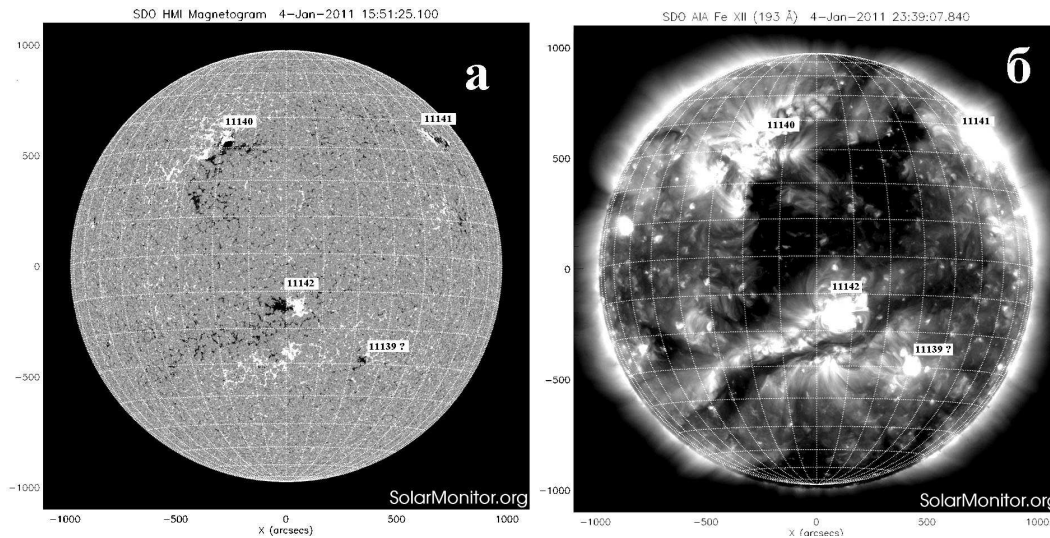


Рис. 3. Магнитные поля вблизи групп пятен на диске Солнца 4 января 2011 г. (а) и изображение хромосферы в линии Fe XII (193 Å) (б) по данным SolarMonitor (2011 а,б)

и солнечной активности. По этим сведениям в день затмения на диске Солнца наблюдались три группы пятен NOAA 11140, NOAA 11141 и NOAA 11142 (рис. 3а). Ранее существовавшая группа NOAA 11139 распалась, пятен в день затмения в ней не было, и на ее месте с координатами S30W25 осталось лишь некоторое магнитное поле. Приблизительное положение групп показано также на рис. 2. В течение затмения все эти группы закрывались диском Луны. Поскольку радиоизлучение выходит не с уровня фотосферы, а из расположенной выше хромосферы и короны, то лучшее соответствие получается при сравнении вариаций радиоизлучения с изображением Солнца в линии Fe XII (193 Å) (рис. 3б), излучение которой исходит с уровня около $80 \cdot 10^3$ км, т. е. из верхней хромосферы и переходного слоя, где генерируется радиоизлучение сантиметрового и дециметрового диапазонов.

Плотность радиопотока внезатменного Солнца. Для вычисления яркостной температуры участков диска Солнца необходимо знать создаваемый ими радиопоток в абсолютных единицах Вт/м²Гц. Так как абсолютная калибровка радиотелескопов – довольно сложная задача, сопряженная с некоторыми погрешностями, то было признано целесообразным воспользоваться усредненными данными 5-ти станций Мировой сети Службы Солнца, содержащими ежедневные измерения потока на 9 частотах от 245 МГц до 15400 МГц (NOAA/SWPC, 2011). Согласно этим данным плотность потока 4 января 2011 г. составляла $F_5 = (180 \pm 3) \cdot 10^{-22}$ Вт/м² Гц на волне 5 см, $F_{10} = (90.3 \pm 0.7) \cdot 10^{-22}$ Вт/м²Гц на волне 10.7 см, $F_{12} = (83 \pm 1) \cdot 10^{-22}$ Вт/м²Гц на волне 12 см и $F_{95} = (20 \pm 2) \cdot 10^{-22}$ Вт/м²Гц на волне 95 см. Эти значения потоков были приняты для вычисления яркостной температуры различных участков диска Солнца.

3 Высота над фотосферой излучающих слоев на различных длинах волн

Так как радиоизлучение выходит с уровней, лежащих выше фотосферы, то моменты радиоконтактов диска Луны с этими уровнями отличаются от моментов оптических контактов с фотосферой. Это дает возможность по разности моментов контактов при известной скорости лунного лимба V_L определить высоту излучающего слоя. Вариации потока на волнах 10.7 и 12 см в течение затмения оказались практически одинаковыми, поэтому анализ моментов контактов на этих волнах был объединен.

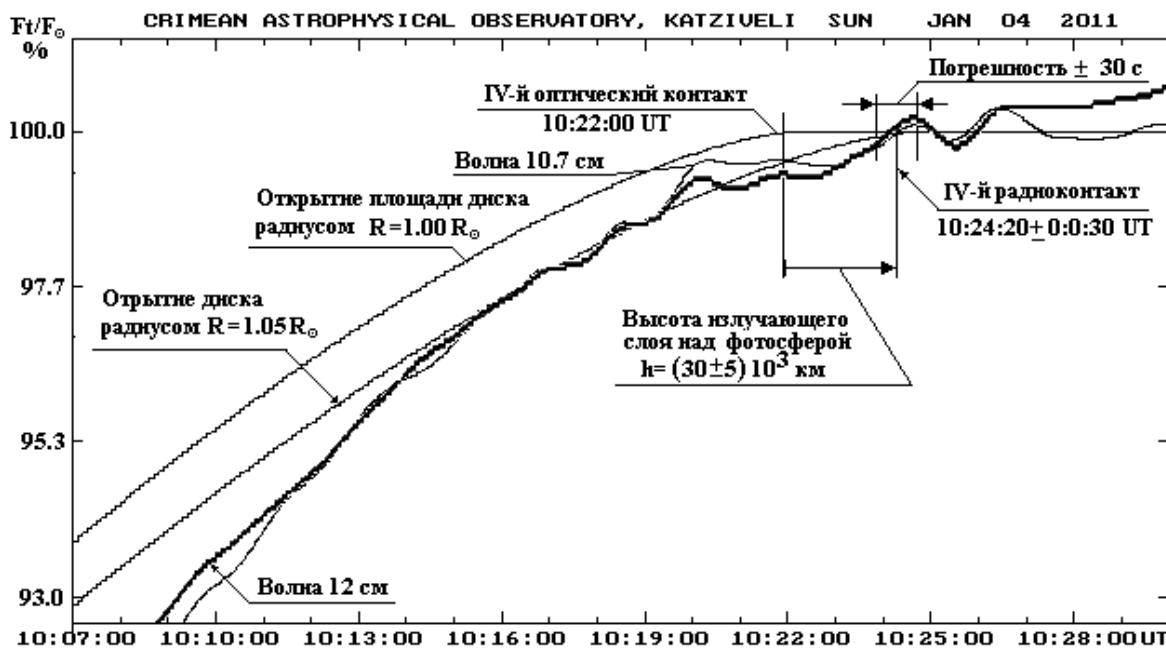


Рис. 4. Определение высоты излучающего слоя на волнах 10.7 и 12 см по разности моментов контактов с лунным лимбом в конце затмения

На рис. 4 показан пример методики определения высоты излучающего слоя по разности моментов 4-го оптического и 4-го радиоконтактов на обеих длинах волн. Достаточно очевидно, что радиокontakt произошел на 2 мин позже оптического контакта, но погрешности регистрации радиопотока (шумы) вносят неопределенность величиной около ± 30 с. Поэтому высота излучающего слоя на этих волнах получается равной $h_{10,12}(IVK) = 13.93 \cdot (2.3 \pm 0.5) = (32 \pm 7) \cdot 10^3$ км.

Высота радиослоя по записям области 1-го контакта получилась равной $h_{10,12}(I) = 14.7 \cdot (2.5 \pm 0.5) \cdot 10^3$ км = $(29 \pm 7) \cdot 10^3$ км. Отсюда находим среднюю высоту по измерениям моментов 1-го и 4-го контактов $h_{10,12} = (32 + 29)/2 = (30 \pm 7) \cdot 10^3$ км, что соответствует радиорadiusу $R_{10,12} \approx (1.05 \pm 0.003) \cdot R_{\odot}$.

Аналогичным способом была найдена высота излучающего слоя на волне 95 см:

$$h_{95}(IK) = 14.7 \cdot (9 \pm 0.5) \cdot 10^3 = (132.3 \pm 7.3) \cdot 10^3 \text{ км}, \quad h_{95}(IVK) = 13.93 \cdot (10 \pm 0.5) \cdot 10^3 = (139 \pm 7) \cdot 10^3 \text{ км}.$$

Средняя высота $h_{95} = (135 \pm 7) \cdot 10^3$ км. При этом средний радиорadius Солнца в зоне экваториальных гелиоширот получается равным $R_{95} \approx (1.2 \pm 0.02) \cdot R_{\odot}$.

На волне 5 см тропосферные флуктуации потока были более заметными, поэтому надежно определить разницу моментов контактов оказалось затруднительно. Можно лишь сказать, что высота излучающего слоя на этой длине волны находилась в пределах $\pm 10 \cdot 10^3$ км, т. е. радиорadius был близок к radiusу фотосферы $R_5 \approx (1.0 \pm 0.015) \cdot R_{\odot}$.

4 Радиояркость невозмущенного Солнца

Конвекция в приповерхностном слое Солнца никогда не прекращается и постоянно возмущает вышележащие слои. Поэтому по соглашению “невозмущенными” участками солнечной поверхности называют те из них, на которых отсутствуют пятна, флоккулы и другие образования (кроме грануляции), ясно видимые в “белом” свете оптического диапазона. Для сравнения результатов различных наблюдений принято вычислять эффективную яркостную температуру “абсолютно черного” излучающего участка диска. Судя по обстоятельствам затмения (рис. 2) можно полагать, что в момент

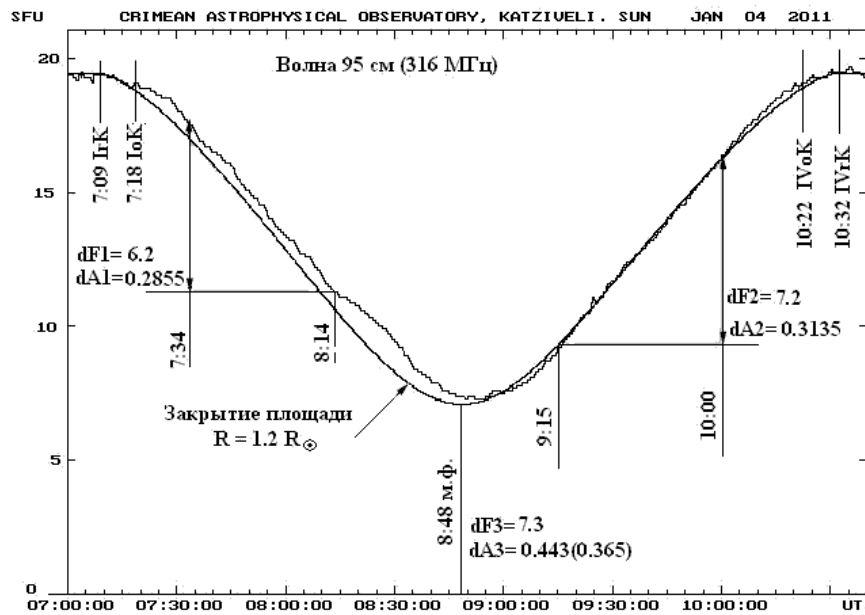


Рис. 5. Вычисление яркостной температуры участков невозмущенного Солнца на длине волны 95 см (316 МГц)

максимальной фазы затмения в 8:48 UT были закрыты все группы пятен, перечисленные в данных оптических наблюдений. В течение других интервалов времени происходило открытие/закрытие других участков диска, на которых отсутствовали активные образования. В соответствии с этим найдем на каждой длине волны наших наблюдений эффективную температуру этих участков диска, поток радиоизлучения от которых был бы равен наблюдавшемуся потоку.

По данным наблюдения затмения радиояркость (эффективная температура) излучающей области определяется по известной формуле (Железняков, 1964, стр. 28):

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

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;

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

R_d – принятый для расчетов радиорadius Солнца в единицах радиуса фотосферы $R_\odot = 700 \cdot 10^3$ км;

dA – площадь открываемой или закрываемой площадки диска в произвольных единицах измерения, известная из эфемерид затмения;

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

Поясним процедуру вычислений на примере записи затмения на волне 95 см. Выбор этой длины волны объясняется тем, что в отличие от сантиметровых волн на этой записи визуально не обнаруживаются вариации потока, связанные с закрытием/открытием локальных источников радиоизлучения (рис. 5). Это неудивительно, так как в отсутствие шумовых бурь связь локальных источников на метровых волнах с активными областями надежно не установлена (Железняков, 1964, стр. 86). Следовательно, запись на волне 95 см можно рассматривать как закрытие/открытие равномерно яркого диска с радиусом $R_{95} \approx 1.2R_\odot$, найденным выше по моментам радиоконтактов.

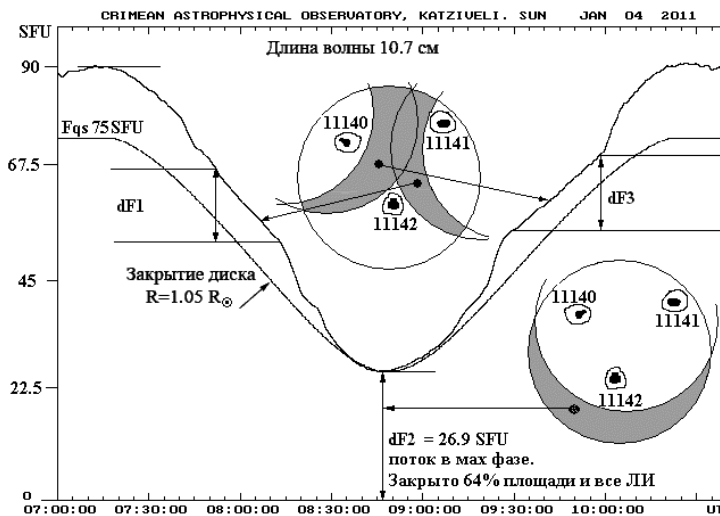


Рис. 6. Определение радиояркости невозмущенных участков диска Солнца на сантиметровых волнах

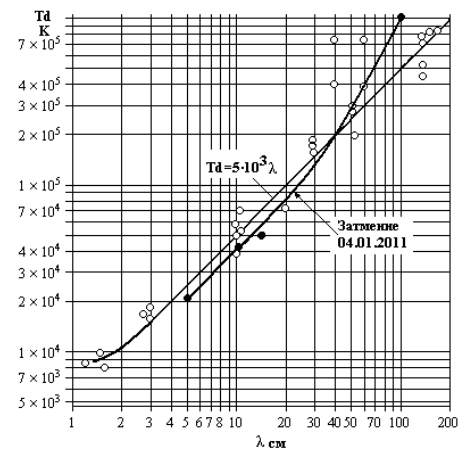


Рис. 7. Эффективная температура диска Солнца во время затмения 04.01.2011 г.

Действительно, в интервале времени 9:15 – 10:00 UT ход кривой затмения в пределах погрешностей совпадает с кривой открытия равномерно излучающего диска (рис. 5). В течение интервала времени 7:14–8:14 UT кривая затмения проходит несколько выше кривой закрытия площади диска, но приблизительно “параллельна” ей. “Параллельность” (эквиливантность) кривых свидетельствует о том, что закрывался участок диска Солнца, яркостная температура которого была равномерной. Смещение затменной кривой объясняется также некоторой асимметрией радиосолнца, которая проявилась в виде смещения минимума потока относительно момента максимальной фазы затмения приблизительно на ≈ 7 мин, что ясно видно на рис. 5.

После подстановки в формулу (1) численных значений результатов наблюдений затмения была найдена яркостная температура участков диска $T_{95}(1) \approx 1.04 \cdot 10^6$ К и $T_{95}(2) \approx 1.10 \cdot 10^6$ К. Оценка радиояркости по остаточному потоку в момент максимальной фазы затмения, когда заведомо были закрыты все области пятен, дает заметно меньшую величину $T^*_{95}(3) \approx 0.80 \cdot 10^6$ К. Объяснить это можно тем, что радиосолнце на метровых волнах эллиплично (Сваруп, 1961). Если эллиптичность составляет 15 %, то в момент максимальной фазы остается открытой меньшая площадь по сравнению с круглым диском радиусом $1.2R_{\odot}$ (приблизительно 36 % вместо 44 %). Поэтому оценка $T^*_{95}(3)$ по остаточному потоку в максимальной фазе получается заниженной. При учете эллиптичности температура оставшейся части диска получается равной $T_{95}(3) \approx 0.98 \cdot 10^6$ К.

Следовательно, можно принять среднюю температуру спокойного Солнца на волне 95 см равной $T_{d95} = (1.00 \pm 0.1) \cdot 10^6$ К. Отклонение величиной около 10 % обусловлено погрешностью в определении внезатменного потока по данным мировой сети станций Службы Солнца.

Для вычисления яркостной температуры на сантиметровых волнах более тщательно выбирались участки диска, не содержащие групп пятен и, соответственно, резких перепадов радиопотока. Распавшаяся группа пятен 11139 не учитывалась, так как не содержала пятен в день затмения и на записи радиоизлучения вблизи интервала времени 8:01 UT (закрытие области бывших пятен) и 8:50 UT (открытие этой области) заметных неоднородностей не обнаружено. Пример показан на рис. 6, который представляет собой упрощенный вариант рисунка обстоятельств затмения. На эскизе солнечного диска заштрихованы участки, по которым вычислялась усредненная яркостная температура. Методика вычислений не отличалась от описанной выше для волны 95 см, за исключением того, что на коротких волнах коррекция результатов за счет эллиптичности Солнца не проводилась. Результаты вычислений сведены в табл. 1.

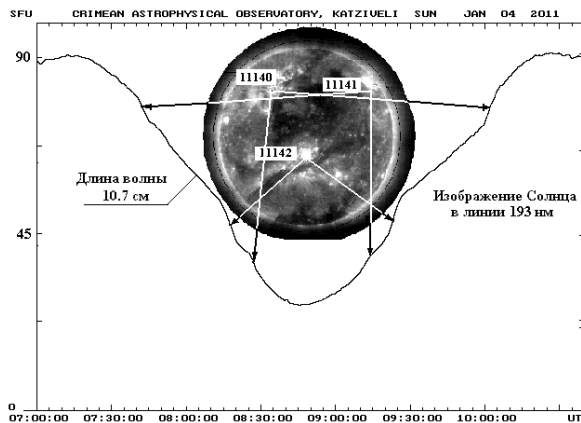


Рис. 8. Закрывание/открытие локальных источников радиоизлучения в течение затмения



Рис. 9. Иллюстрация методики вычисления их яркостной температуры T_b

Таблица 1. Яркостная температура участков невозмущенного Солнца

Участок диска/Длина волны	5 см	10.7 см	12 см	95 см
$T_d(1) \cdot 10^3$ К	25.8	46.56	49.5	1040
$T_d(2) \cdot 10^3$ К	22.96	40.6	43.4	1100
$T_d(3) \cdot 10^3$ К (в макс. фазе)	20.21	45.2	48.5	980
Средняя $T_d \cdot 10^3$ К	22 ± 2	44 ± 3	47 ± 3	1000 ± 100

На основе многочисленных наблюдений по международной программе “Года спокойного Солнца” установлено, что в диапазоне длин волн от 2 до 200 см яркостная температура невозмущенного Солнца удовлетворительно описывается выражением (Железняков, 1964)

$$T_d = 5 \cdot 10^3 \lambda(cm) K. \tag{2}$$

Результаты наблюдения затмения 04.02.2011 г. (табл. 1) показывают, что в начальной фазе 24-го 11-летнего цикла солнечной активности эффективная температура невозмущенного Солнца незначительно отличалась (рис. 7) от вычисленной по формуле (2). Некоторое отклонение хода кривых друг от друга могло появиться из-за неравномерности распределения радиояркости по диску Солнца. В наших вычислениях определялась усредненная температура значительных протяженных участков диска Солнца и поэтому неравномерность радиояркости усреднялась.

5 Яркостная температура локальных источников радиоизлучения

В течение затмения Луна постепенно закрывает/открывает радиоизлучающую поверхность диска Солнца. При этом изменение наблюдаемого потока от “невозмущенного” Солнца пропорционально площади видимой поверхности диска. Если же на диске присутствуют локальные неоднородности радиояркости, то скорость изменения потока в течение их закрытия/открытия отличается от скорости изменения потока “невозмущенного” Солнца и на кривой затмения появляются участки более быстрого изменения потока (рис. 8). Во время затмения 4 января 2011 г. на диске Солнца в оптическом диапазоне по данным SolarMonitor (2011a) наблюдались три группы пятен. Четвертая группа NOAA 11139 распалась, и пятна на месте ее бывшего расположения отсутствовали. Так как в радиодиапазоне излучение выходит с уровня хромосферы и переходного слоя, то для сравнения

Таблица 2. Размер α (угл. мин), поток F(SFU) и эфф. температура T_b(10³ K) локальных источников на разных длинах волн

Длина волны, см		NOAA 11140			NOAA 11141			NOAA 11142		
		α'	F, SFU	T _b 10 ³ K	α'	F, SFU	T _b 10 ³ K	α'	F, SFU	T _b 10 ³ K
5	Закр.	2.02	2.55	85	3.36	12.7	153	1.65	8.13	409
	Откр.	1.70	1.66	80	0	0	0	1.65	7.97	401
	Средн.	1.86	2.10	82	1.68	6.35	76	1.65	8.05	405
10.7	Закр.	2.35	3.6	407	1.68	3.53	779	1.65	6.10	1399
	Откр.	2.35	5.75	650	1.68	2.70	510	1.65	5.46	1258
	Средн.	2.35	4.67	528	1.68	2.76	645	1.65	5.78	1328
12	Закр.	2.35	2.86	406	1.68	2.52	703	1.65	6.12	1774
	Откр.	2.35	5.20	739	1.68	1.56	435	1.65	5.97	1730
	Средн.	2.35	4.03	572	1.68	2.04	569	1.65	6.05	1752

с оптическими деталями целесообразно использовать изображение Солнца в линии Fe XII, излучение которой образуется на сравнимой высоте (10-:-80)·10³ км. Как видно на рис. 8, над районами расположения групп пятен наблюдалась повышенная яркость в линии Fe XII. Закрытие/открытие этих областей диска Солнца сопровождалось вариациями скорости изменения радиопотока.

Эти участки кривой радиозатмения позволяют определить (рис. 9):

а) поток излучения F_i локального источника (ЛИ) за вычетом изменения потока dF невозмущенного Солнца, на фоне которого он наблюдался: $F_i = F_1 - F_2 - dF$;

б) интервал времени t_i закрытия/открытия ЛИ, характеризующий его размер. В зависимости от позиционного угла θ между траекторией центра Луны и областью лимба, закрывающего ЛИ, размер источника α будет равен $\alpha = V_L \cdot t_i \cdot \cos \theta$, где V_L – угловая скорость перемещения центра Луны, известная из эфемерид затмения.

По этим данным вычисляется средняя по площади источника яркостная (эффективная) температура

$$T_i = \frac{F_i \cdot \lambda^2}{2k \cdot \Omega_i} K. \quad (3)$$

Так как перемещение лунного лимба дает одномерное распределение интенсивности по источнику, то приходится предполагать, что источник имеет круговую симметрию, т. е. его размер в направлении, перпендикулярном краю Луны, такой же, как и в направлении перемещения этого края. Поэтому $\Omega_i = 4\pi \cdot \sin^2(\alpha/4) \approx 6.8 \cdot (\alpha/32)^2 \cdot 10^{-5}$ стер.

По описанной методике была вычислена яркостная температура всех локальных радиоисточников на трех длинах волн: 5, 10.7 и 12 см. Результаты вычислений приведены в табл. 2. Ограниченная точность измерения потока привела к тому, что яркостная температура относительно слабых источников над группами пятен NOAA 11140 и 11141 оказалась различной по данным их закрытия и последующего открытия. Поэтому в табл. 2 приведена также средняя величина этих двух измерений.

Полученные по результатам наблюдения затмения численные параметры ЛИ (угловой размер, температура) на коротких волнах 5, 10.7 и 12 см оказались в пределах типичных значений, присущих источникам медленно меняющегося компонента в этом диапазоне длин волн (Железняков, 1964, стр. 91). Существенных отклонений от обычно принимаемой кинетической температуры короны наблюдения затмения не выявили.

Но на длине волны 95 см (316 МГц) вариации потока, связанные с закрытием/открытием ЛИ, оказались за пределами точности наших измерений ± 1.0 Вт/м² Гц и поэтому не выделялись на фоне излучения невозмущенного Солнца. Предполагается, что локальные источники возникают в магнитных полях активных областей в результате действия циклотронного механизма излучения (Железняков, 1964, стр. 451). Почти полное отсутствие локальных источников во время затмения

Таблица 3. Сравнение результатов наблюдения 2-х затмений

Длина волны, см	Измеренный параметр	Затмение 1 августа 2008 г.	Затмение 4 января 2011 г.
10.7	Радиорadius, R_{\odot}	1.016	1.05 ± 0.003
	Высота, 10^3 км	11	30 ± 7
	Температура, 10^3 К	35.8 ± 0.4	44 ± 3
12	Радиорadius, R_{\odot}	1.016	1.05 ± 0.003
	Высота, 10^3 км	11	30 ± 7
	Температура, 10^3 К	37.3 ± 0.4	47 ± 3

4.01.2011 г. свидетельствует о том, что магнитные поля групп пятен были слабыми и не проникали на высоту, откуда могло исходить заметное излучение на наиболее длинной волне 95 см. Возможно, это свойство присуще большинству групп пятен 24-го цикла и является причиной его низкой вспышечной активности.

6 Заключение

В эпоху минимума солнечной активности между 23-м и 24-м 11-летними циклами (рис. 1) 1 августа 2008 г. наблюдалось очередное солнечное затмение, полоса которого также проходила по территории лаборатории радиоастрономии КРАО. Так как наблюдения этого затмения проводились на той же аппаратуре и обрабатывались по одинаковой методике (Юровский, 2009), то целесообразно провести сравнение этих результатов с наблюдениями обсуждаемого затмения 04.01.2011 г. для оценки изменения параметров солнечной атмосферы за 2 года в фазе нарастания 24-го цикла активности.

Результаты анализа затмения 1 августа 2008 г. на волнах 10.7 и 12 см показали, что радиорadius диска Солнца на обеих длинах волн 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 (Шкловский, 1962) это высота верхней области хромосферы, где электронная температура достигает $30 \cdot 10^3$ К. Действительно, измерение яркостной температуры по результатам затмения 1 августа 2008 г. дало величину $T_{d10} = (35.8 \pm 0.4) \cdot 10^3$ К на волне 10.7 см и $T_{d12} = (37.3 \pm 0.4) \cdot 10^3$ К на волне 12 см. Для удобства сравнения полученные величины сведены в табл. 3.

6.1 Выводы

В связи с началом нового 24-го цикла солнечной активности плотность солнечной атмосферы за 2 года увеличилась, что привело к изменению следующих измеряемых параметров:

- 1) радиорadius Солнца на волнах 10.7 и 12 см увеличился с $1.016R_{\odot}$ до $(1.05 \pm 0.003)R_{\odot}$;
- 2) высота излучающего слоя на этих волнах переместилась с $11 \cdot 10^3$ км до $(30 \pm 7) \cdot 10^3$ км;
- 3) яркостная температура “невозмущенного” Солнца возросла с $(35.8 \pm 0.4) \cdot 10^3$ К до $(44 \pm 3) \cdot 10^3$ К на волне 10.7 см, и с $(37.3 \pm 0.4) \cdot 10^3$ К до $(47 \pm 3) \cdot 10^3$ К на волне 12 см.
- 4) почти полное отсутствие локальных источников во время затмения 4.01.2011 г. на наиболее длинной волне 95 см свидетельствует о том, что магнитные поля групп пятен были слабыми и не проникали на высоту, откуда могло исходить заметное излучение ЛИ. Если это свойство присуще большинству групп пятен 24-го цикла, то оно может быть причиной его низкой вспышечной активности.

Литература

- Железняков В.В. // Радиоизлучение Солнца и планет. М.: Наука. 1964.
- Сваруп (Swarup G.) // *Astron. J.* 1961. V. 66. P. 296.
- Шкловский И.С. // Физика солнечной короны. ГИФМЛ. 1962.
- Шимабукуро Ф.И. // в сб. "Поток энергии Солнца и его изменения" / Ред. О. Уайт. М.: Мир. 1980.
- Юровский Ю.Ф. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2009. Т. 105. С. 57.
- NOAA/SWPC Boulder, CO USA // 2011. <http://www.swpc.noaa.gov/weekly/pdf/prf1844.pdf>.
- Лаборатория рентгеновской астрономии Солнца // ФИАН. 2011. <http://www.thesis.lebedev.ru/info/thesis-20110128.php>.
- NOAA/SWPC (Space Weather Prediction Center) // 2011. http://www.swpc.noaa.gov/ftplib/lists/radio/7day_rad.txt
- SolarMonitor // 2011a. http://www.solarmonitor.org/full_disk.php?date=20110104&type=shmi_maglc&indexnum=1
- SolarMonitor // 2011b. http://www.solarmonitor.org/full_disk.php?date=20110104&type=saia_00193&indexnum=1