

УДК 523.98

Результаты наблюдений затмения 1.08.2008 г. на РТ-22 КрАО: компактные радиоисточники в приполярной области Солнца

С.А. Самисько, Л.И. Цветков

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

Поступила в редакцию 10 февраля 2009 г.

Аннотация. По наблюдениям затмения Солнца 1 августа 2008 года на волнах 2.0, 2.8 и 3.5 см определены параметры компактных радиоисточников, совпадающих по положению с яркими EUR-структурами по наблюдениям на SOHO/EIT. Их средние размеры оказались равными 7.7", среднее значение потока радиоизлучения составило 0.34 с. е. п., яркостные температуры растут с длиной волны в пределах от 100 до 800 К.

OBSERVATIONS OF AN ECLIPSE ON 2008 AUGUST 1 AT THE RT-22 CRAO: COMPACT RADIATION SOURCES NEAR POLAR REGION OF THE SUN, *by S.A. Samisko, L.I. Tsvetkov*. On observations of an eclipse of the Sun on August 1, 2008 at wavelengths 2.0, 2.8 and 3.5 cm the parameters of compact radiation sources conterminous on position with the bright EUR-patterns on the observations at SOHO/EIT are determined. Their mean sizes have appeared equal 7.7", average value of a flux of radio emission has constituted 0.34 s.f.u., the brightness temperatures grow with a wavelength in limits from 100 up to 800 K.

Ключевые слова: затмение Солнца, микроволновое излучение, яркие EUR-структуры

1 Введение

Обширный ряд наблюдений ярких точек, которые видны в рентгене, был проведен с борта космического аппарата (КА) “Скайлэб”. Эти мелкие излучающие детали в двух измерениях весьма похожи на миниатюрные активные области. Они располагаются над районами биполярного магнитного поля и они столь компактны, что не разрешались инструментами этого КА (< 3000 км). Как и в активных областях (АО), рядом с ними часто наблюдается увеличение яркости, и не исключено, что это явление аналогично вспышкам в АО. Однако яркие рентгеновские точки отличаются от активных областей равномерным распределением по диску Солнца (Нойс, 1979).

Результаты прошлых наблюдений солнечных затмений на РТ-22 КрАО (Бабин и др., 2001) свидетельствуют, что такие наблюдения позволяют не только локализовать отдельные источники, но и получать распределения интенсивности радиоизлучения по источнику с разрешением порядка 2–4 угловые секунды, сравнимым с угловым разрешением крупных современных радиоинтерферометров.

Распределения радиояркости в невозмущенных областях изучались нами по наблюдениям затмений Солнца, имевших место в 1975, 2005 и 2006 гг. (Бабин и др., 2001; Будзиновская и др., 2002;

Самисько и Цветков, 2008). Результаты наблюдений затмений Солнца в 2003, 2005 и 2006 гг. позволили сопоставить размеры радиогрануляции невозмущенного Солнца в областях расположения корональных дыр и в области расположения групп пятен. Выявлены два интервала характерных размеров неоднородностей распределения радиояркости ($4,5\text{--}10,5''$) и ($29\text{--}40''$) на участках невозмущенного Солнца и корональных дыр (КД). Во время наблюдений на РТ-22 частного затмения 15.05.1975 г. Луна затеняла участки Солнца вблизи северного полюса. При обработке затменных кривых были обнаружены перепады радиояркости, соответствующие локальным источникам с угловыми размерами порядка нескольких секунд, однако сопоставить их с оптическими образованиями не удалось из-за отсутствия надежных оптических данных.

В (Ниндос и др., 1999) изучались радиоизображения спокойного Солнца, выполненные с помощью радиогелиографа Нобейама на частоте 17 ГГц. В приполярных областях обнаружены неоднородные компактные источники с превышением яркостной температуры около 3500 К. Сопоставление радиоизображений на частоте 17 ГГц с почти одновременными SOHO/EIT изображениями показало, что полной корреляции между этими компактными источниками и яркими EUV-структурами в линиях He II 304 \AA и Fe XII 195 \AA не существует. Утверждается, что (304 \AA EIT images) отражают структуру хромосферной сетки спокойного Солнца, тогда как (195 \AA images) характеризуют корональные структуры. Сравнение радиоданных с EIT images должно помочь в разрешении запутанной картины этого необъясненного явления.

Согласно (Похелайнен, 2000), анализ распределений радиояркости вблизи полюсов Солнца на частоте 87 ГГц подтверждает наличие структурных образований, соответствующих полярным щеткам (polar plumes), полярчаниям в ультрафиолете (EUR-brightenings) или ярким рентгеновским точкам (ЯРТ) (soft X-ray bright points). Некоторые такие радиоисточники на миллиметровых волнах имеют яркостную температуру 30–150 К (расчетные значения: 10–390 К). Локальные радиополярчания (РП) в областях расположения корональных дыр могут быть связаны с полярными щетками и яркими точками (bright points). Также высказывается предположение, что необъясненные РП на 87 ГГц в приполярных КД и экваториальных КД подтверждают тот факт, что они не связаны со структурами EUV. Наиболее вероятными кандидатами в формировании этих компактных источников (волна 3.5 мм) являются магнитные элементы и структуры с повышенной температурой, которые располагаются ниже слоя генерации He II 304 \AA .

В настоящей работе анализируются результаты обработки затменных наблюдений на трех волнах сантиметрового диапазона на момент времени около 10:21 UT (максимальной фазы затмения 1.08.2008 г. в п. Кацивели) и данные измерений SOHO/EIT в линии 195 \AA .

Обстоятельства затмения в пункте наблюдений и использованные данные внеатмосферных измерений изложены во втором разделе, методика наблюдений и обработки — в третьем. Результаты вычислений параметров локальных компактных источников представлены в таблице. В заключительном разделе обсуждаются результаты спутниковых измерений на SOHO, перечислены основные результаты радионаблюдений и приводятся аргументы в пользу существования в нижней короне неоднородностей типа шлемовидных структур согласно модели (Цап и др., 2008).

2 Обстоятельства солнечного затмения 1.08.2008 г. в пункте наблюдений (Крым, п. Кацивели, РТ-22) и интернет-данные

Наблюдения проводились в лаборатории радиоастрономии НИИ “КрАО” на радиотелескопе РТ-22 в точке с координатами 2 ч 15 мин 55 с восточной долготы и 44 град. 23 мин 20 с северной широты. Первый оптический контакт наблюдался в 9:23 UT. Четвертый оптический контакт произошел в 11:12 UT. В момент максимальной фазы в 10:21 UT закрывалось 0.16 видимой площади фотосферы. Погодные условия были благоприятными: ветер практически отсутствовал, но иногда Солнце закрывалось легкими кучевыми облаками.

Геометрические обстоятельства затмения были вычислены Ю.Ф. Юровским с помощью программы, разработанной и любезно предоставленной нам Г.Б. Гельфрейхом и А.Н. Коржавиным (ГАО РАН, Россия). Сценарий затмения отражен на рис. 1.

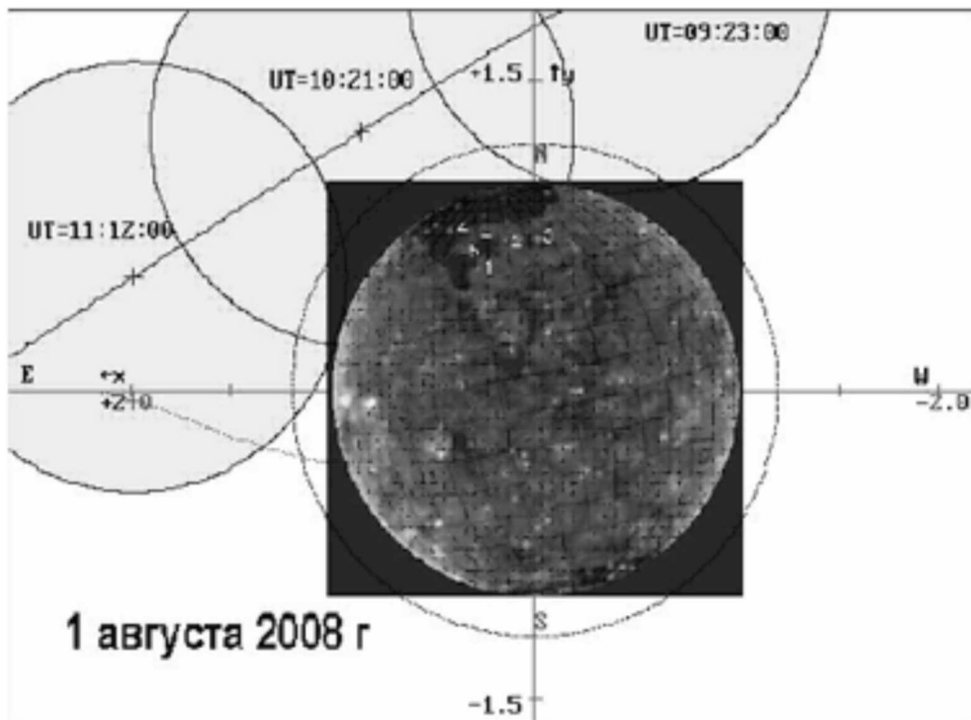


Рис. 1. Обстоятельства затмения Солнца. Совмещение с картой SOHO/EIT 195 Å на момент 10:21:00 UT. EUR-полярничания обозначены цифрами справа. Крестик – положение максимума диаграммы направленности телескопа

Для отождествления радиоисточников с объектами в иных диапазонах излучения, включая корональные дыры, были использованы материалы наблюдений, выставленные в INTERNET на сайтах:

http://www.sec.noaa.gov/solar_sites.html;

<http://www.solar.nro.nao.ac.jp/norh/images/>;

http://www.dxlc.com/solar/old_reports.

Сопоставление изображений для идентификации КД и локальных повышений радиояркости осуществлялось наложением изображения SOHO/EIT на координатную сетку Солнца. Поворот изображения на момент максимальной фазы затмения Солнца на площадке РТ-22 осуществлялся по программе, любезно предоставленной Топчило Н.А. (ЛГУ, Россия). На рис. 1 показано совмещенное изображение Солнца по данным SOHO/EIT 2008.08.01 195 Å, 02:37:00. Видны неравномерно распределенные по диску яркие точки. В районе северного полюса более затемненная область, которая свидетельствует о наличии КД. Цифрами обозначены яркие точки, которые обозначают площадки, где можно было ожидать локальные повышения радиояркости и, следовательно, перепады интенсивности на кривых закрытия-открытия. Крестиком обозначено положение максимума диаграммы направленности (ДН) радиотелескопа.

На рис. 2 представлена северная часть изображения SOHO/EIT в увеличенном масштабе. Яркие точки 1, 2, 3 и 4 заметно отличаются от фона. Точка 5 не имеет объекта с четкими границами, однако к этой точке близка граница между КД и спокойным Солнцем. Центр диаграммы направленности во время слежения за участком вблизи северного полюса обозначен крестиком. При этом яркие точки 1, 2, 4, 5 попадали внутрь площадки, охватываемой телесным углом ДН на волне 3.5 см по уровню половинной мощности. Точка 3 располагалась на большом удалении от центра

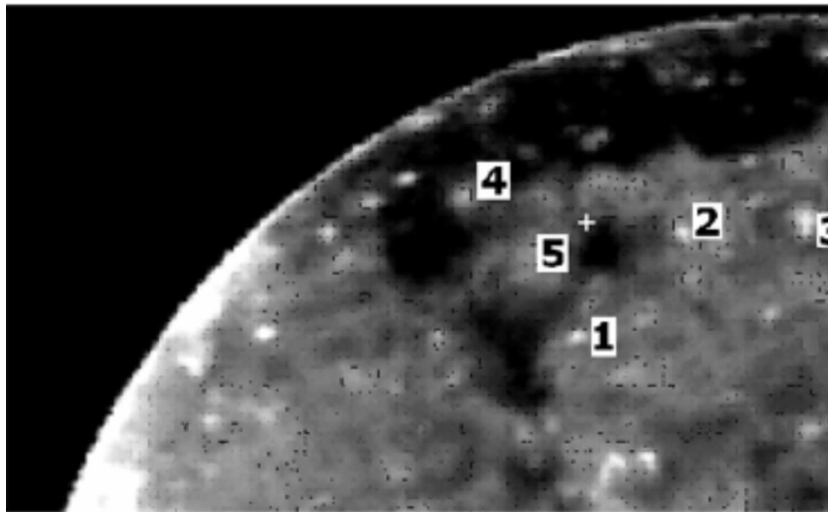


Рис. 2. Северная часть изображения Солнца по данным SOHO/EIT 195 Å в увеличенном масштабе. Обозначения такие же, как и на рис. 1

ДН, и ожидаемые эффекты от ее покрытия-открытия оказались незначительными, поэтому она исключена из рассмотрения.

С целью пояснения ситуации на Солнце в день затмения нами использовались данные с гелиографа Нобейама за 1.08.2008, снятые в 6:40 UT, т. е. за 3 часа 40 минут до максимальной фазы затмения в нашем пункте наблюдений.

Радиокарта Солнца на волне 1.76 см, полученная в результате обработки программой **IDL 6.1** и наложенная на изображение SOHO/EIT, не показала четкого совпадения распределения радиояркости по данным гелиографа Нобейама в точках 1, 2, 3, 4, 5, отмеченных на рис. 2.

Анализ изображения Солнца с японского спутника Hinode XRT Filter 30-Jul-2008 18:02:33 свидетельствует о наличии ярких рентгеновских точек вблизи северного полюса Солнца по координатам, близким для точек 1 и 2.

3 Методика наблюдений и обработки

Наблюдения затмения проводились на РТ-22 на волнах 2.0, 2.8 и 3.5 см с угловым разрешением 3.6, 5.0 и 6.0 угл. мин соответственно. Точность измерений при наблюдениях Солнца составляла 0.1 с. е. п. (1 с. е. п. = 10^{-22} Вт/м²Гц). В интервале 8:31–9:09 UT радиотелескоп следил за участком неба: наблюдался процесс покрытия ДН телескопа Луной. В интервале 09:18–10:55 UT радиотелескоп сопровождал диаграммой направленности площадку вблизи северного полюса: наблюдался процесс закрытия и открытия этой площадки диском Луны. В интервале 10:56–11:25 UT радиотелескоп сопровождал площадку на диске Солнца вблизи IV-контакта. Данные наблюдений записывались в память персонального компьютера с помощью вычислительного комплекса, описанного в (Баранов и др., 1998).

Система управления радиотелескопом позволяла быстро производить переустановку антенны с одной точки диска Солнца на другую. Скорость движения края диска Луны относительно Солнца вблизи I контакта составляла 0.40"/сек, вблизи IV контакта — 0.42"/сек. При обработке записей закрытия-открытия области вблизи N-полюса скорость края диска Луны принималась 0.41"/сек. Опрос трех каналов радиометров производился каждую секунду. В период, предшествующий затмению, было проведено сканирование диска Солнца для построения радиоизображения и для определения реальных координат центра диска Солнца с целью вычисления ошибок наведения.

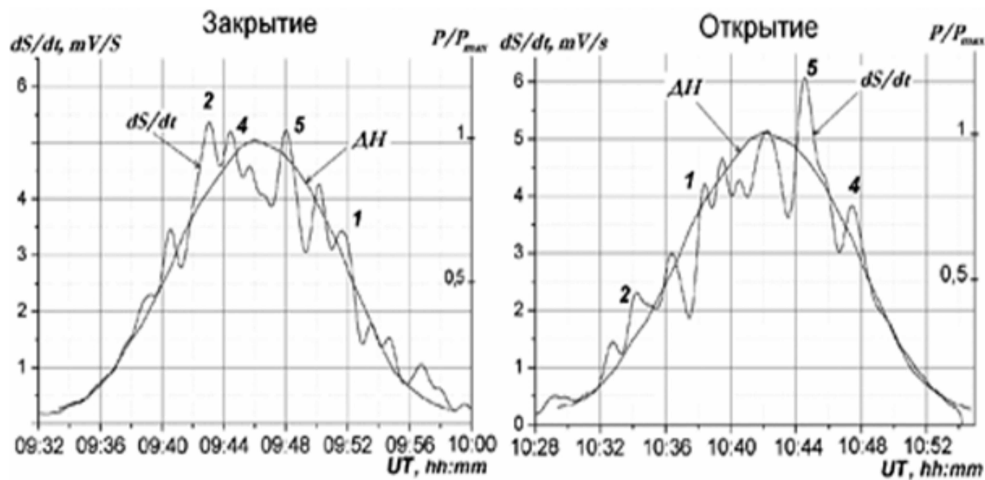


Рис. 3. Производные затменных кривых на волне 2.0 см во время закрытия и открытия площадки диска Солнца вблизи N-полюса. Нормированная ДН радиотелескопа. Цифрами обозначены источники, обнаруженные при закрытии и открытии лимбом Луны EUR-поярчаний согласно рис. 1 и рис. 2

Методика обработки затменных кривых описана в (Самисько и Цветков, 2008). На первом этапе кривые закрытия-открытия аппроксимировались полиномом, затем после вычитания полинома проводилось вычисление Фурье-спектров и оценка достоверности гармонических составляющих. Составляющие, выявленные на записях радиоизлучения от края диска Солнца, в записях затенения Луной ДН антенны радиотелескопа исключались из рассмотрения. В данном случае вычисление Фурье-спектров записей закрытия ДН телескопа Луной и открытия площадки в области IV контакта имело методический характер, с целью исключить флуктуации ведения антенны. Нами рассмотрены Фурье-спектр записи радиоизлучения на волне 3.5 см во время открытия площадки вблизи северного полюса, Фурье-спектр записи радиоизлучения на волне 3.5 см во время открытия края диска Солнца в области IV контакта и Фурье-спектр записи радиоизлучения на волне 2.8 см во время покрытия Луной ДН телескопа. Из сопоставления графиков (здесь не приводятся) было решено, что спектры существенно отличаются: максимальные по мощности спектральные составляющие, полученные при слежении за краем Солнца и при закрытии ДН Луной, оказались на частотах 0.0124, 0.006 и 0.023 Гц, в то время как запись радиоизлучения при слежении вблизи N-полюса содержит основное колебание на частоте 0.0177 Гц.

Выявление неоднородностей на участках Солнца в пределах телесного угла диаграммы направленности телескопа РТ-22 осуществлялось следующим образом. График интенсивности излучения данного участка (при закрытии или открытии) сглаживался по 13 точкам. Вычислялась производная dS/dt интенсивности излучения, график которой также сглаживался. Диаграмма направленности антенны была измерена ранее по мощному источнику радиоизлучения на краю диска Солнца и использовалась в нормированном варианте. Для нахождения коэффициента нормировки производной ее график совмещался с графиком ДН в графическом редакторе Origin 7.5. При этом для выявления радиоисточников использовалась усредненная огибающая графика производной.

Описанная выше методика иллюстрируется рисунком 3. Здесь представлены усредненные кривые производных dS/dt , mV/s по записям закрытия-открытия области вблизи N-полюса и нормированная ДН на волне 2.0 см за соответствующие интервалы слежения. Цифрами обозначены номера компактных радиоисточников, соответствующих ярким точкам на рис. 2. Отождествление источников осуществлялось путем сопоставления моментов закрытия и открытия обозначенных площадок в результате геометрических построений и положений максимумов на графиках производных. Координаты источника № 5, не имеющего явного поярчания в оптике, были определены по графикам на рис. 3. Данные рис. 3 использовались в дальнейшем для коррекции величин перепа-

дов интенсивности в каждой точке при вычислении перепадов потока, поскольку не все источники располагались в максимуме ДН.

4 Результаты вычислений параметров компактных радиоисточников

По изменению потока во время затмения имеется возможность найти яркостную температуру источников, а по нашим трехчастотным записям можно получить сведения о спектре этих образований в атмосфере Солнца (в переходном слое – в нижней короне). Яркостная температура излучающей области определяется по известной формуле (Железняков, 1964):

$$Tb = dF * \lambda^2 / 2k * d\Omega, K$$

где dF – перепад потока на исследуемом интервале времени в Вт/м²Гц; λ – длина волны в м; $k = 1.38 * 10^{-23}$ Дж /град – постоянная Больцмана; $d\Omega = 4\pi \sin^2(\Theta/4)$ – телесный угол встерадианах, занимаемый излучающей площадкой; Θ – угловой размер источника в градусах.

Перепад потока от локального источника вычисляется в с. е. п. по формуле:

$$dFls = Fqs * \Delta Is * g / Is,$$

где Fqs – поток от спокойного Солнца в пределах телесного угла, ограниченного ДН телескопа на волнах 3.5, 2.8 и 2.0 см составляет 8.63; 7.80 и 7.38 с. е. п. (Бабин и др., 2001). ΔIs – перепад сигнала в mV, пропорциональный интенсивности источника (соответствует ΔU на рис. 4); Is – сигнал в mV, пропорциональный интенсивности спокойного Солнца в пределах телесного угла ДН радиотелескопа (см. рис. 4). Коэффициент g , учитывающий соотношение ДН радиотелескопа и размеров источников, в данном случае равен 1, поскольку, как это будет показано ниже, реальные размеры источников значительно меньше размеров ДН телескопа на указанных волнах.

Таблица 1. Параметры локальных источников

λ	Параметры / Источники	№ 1	№ 2	№ 4	№ 5
2.0 см	Перепад потока, dF , с. е. п.	0.27	0.37	0.27	0.46
	Размеры, Θ , угл. сек.	8.0	7.0	4.1	10.0
	Яркостная температура, Tb , К	100	180	380	110
2.8 см	Перепад потока, dF , с. е. п.	0.34	0.47	0.25	0.38
	Размеры, Θ , угл. сек.	10.0	6.4	5.0	10.0
	Яркостная температура, Tb , К	160	310	470	180
3.5 см	Перепад потока, dF , с. е. п.	0.39	0.30	0.26	0.30
	Размеры, Θ , угл. сек.	13.0	5.89	4.8	8.2
	Яркостная температура, Tb , К	170	660	790	330
	Средние размеры, Θ , угл. сек	10.3	6.6	4.6	9.4

На рис. 4 представлены фрагменты записей открытия источников № 1, 2, 4, 5 на волне 2.8 см в интервалах времени открытия соответствующих ярких точек. По оси ординат – выходное напряжение радиометра в mV, пропорциональное интенсивности радиоизлучения, по оси абсцисс – время в УТ. Величина перепадов интенсивности и интервалы времени открытия соответствующих источников на других волнах оценивались по аналогичным графикам.

На фрагментах кривых открытия прямыми отрезками указаны сглаженные изменения сигнала, причем ступеньки, связанные с открытием источников, выделяются без сомнения. Размеры источников в угловых величинах определялись путем пересчета интервалов времени с учетом скорости движения лимба Луны.

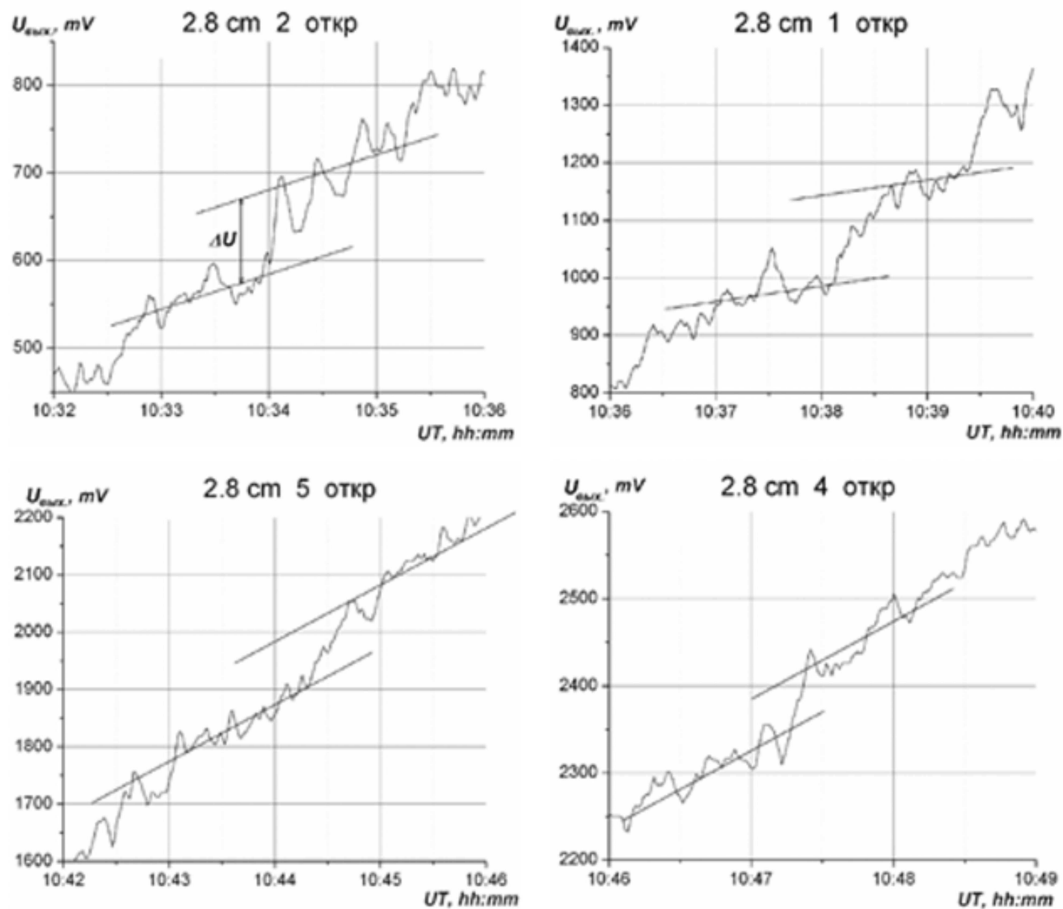


Рис. 4. Фрагменты затменных записей (без усреднения) на волне 2.8 см при открытии источников № 1, 2, 4, 5. По шкале ординат отложена величина выходного сигнала радиометра в мВ, по шкале абсцисс – время УТ. Прямыми отрезками отображены сглаженные изменения сигнала на интервале времени около 90 сек. Величина ступеньки пропорциональна перепаду потока от открытия источника. Уровень сигнала от спокойного Солнца в диапазоне 2.0–3.5 см находился в пределах 3000–3500 мВ

Результаты оценок и вычислений потоков и яркостных температур приведены в таблице 1.

В качестве комментария к таблице 1 можно отметить следующее: источник № 4, располагавшийся в области КД, имел наименьшие размеры и максимальные яркостные температуры. В то же время его размеры мало менялись по диапазону длин волн. Незначительные аналогичные изменения по диапазону длин волн характерны и для источников № 2, 5. Только размеры источника № 1 несколько увеличиваются с длиной волны. Таким образом, выявленные нами радиопоярчания (РП) являются компактными образованиями в атмосфере Солнца с повышенной температурой. Спектры яркостных температур компактных радиоисточников, построенные по данным табл. 1, представлены на рис. 5. Представленные спектры характерны для магнитно-тормозного излучения солнечных радиоисточников (Гельфрейх, 1974).

5 Обсуждение результатов и выводы

Как следует из краткого обзора, сведения о радиоизлучении ЯРТ и ярких EUR- образований достаточно отрывочны. В нашем случае впервые получены спектры этих образований в диапазоне

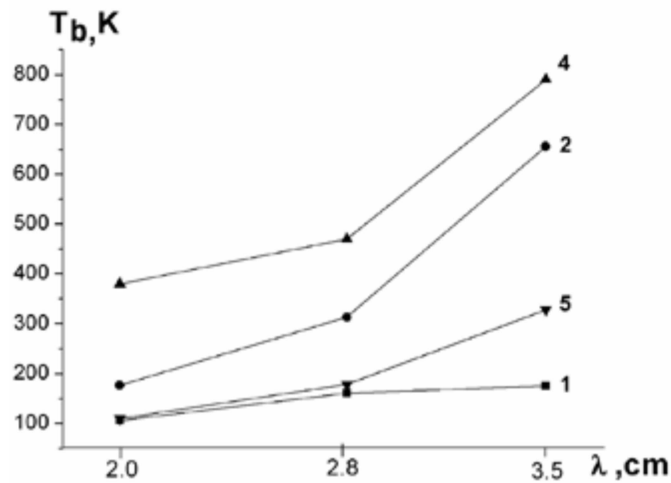


Рис. 5. Зависимость яркостной температуры от длины волны для отождествленных компактных радиоисточников

2.0–3.5 см, в котором происходит генерация радиоизлучения в верхней части переходного слоя и в нижней короне. Указанные компактные источники проявляются в форме неоднородностей распределения яркостной температуры в атмосфере Солнца. Они выделяются на фоне яркостной температуры спокойного Солнца 9000–13500 К (Бачурин и др., 1974). На наш взгляд обнаруженные нами компактные источники, располагающиеся в солнечной атмосфере, есть подтверждение факта формирования шлемовидных структур и плазмидов в модели, разработанной в (Цап и др., 2008).

В качестве дополнительных аргументов обратимся к результатам, полученным с помощью японского спутника “Хиноде” (Котоку и др., 2007). Они наблюдали X-ray bright points (XBRs) в спокойной области Солнца с помощью телескопа XRT на борту спутника “Хиноде” 19 декабря 2006 г. Изображения всего Солнца в рентгеновских лучах выявили множество ярких рентгеновских точек со сложной структурой, эволюционирующих во времени. В большинстве случаев динамика эмиссии в спокойной области была связана с ЯРТ, и они имели петлевую или мультипетлевую структуру, которая наблюдается во время больших вспышек. Поярчения ЯРТ имеют сильные магнитные поля с противоположной полярностью вблизи основания арок. В то же время в (Котоку и др., 2007) приводятся примеры событий, связанных с исчезновением магнитного поля, некоторые ЯРТ-поярчения и угасания без какой-либо связи с движениями фотосферных магнитных полей. Приведенные в (Котоку и др., 2007) изображения площадок 40'' x 40'' содержат поярчения разнообразной формы с размерами 10–20'', располагающиеся между основаниями арок магнитных полей разной полярности.

Угловые размеры (4.5–10.5'') обнаруженных нами РП в два раза меньше видимых угловых размеров рентгеновских поярчений. Таким образом, обнаруженные нами радиоисточники, как **повышения** яркостной температуры в атмосфере Солнца, подтверждают формирование шлемовидных структур согласно модели (Цап и др., 2008).

В заключение выражаем благодарность Ю.Т. Цапу за помощь в наблюдениях на РТ-22 и полезные дискуссии, а также Г.Н. Шликать за подготовку рукописи к печати.

Литература

Бабин А.Н., Будзиновская И.А., Миронов М.А. и Цветков Л.И. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2001. Т. 97. С. 26.

- Бачурин А.Ф., Ерюшев Н.Н., Цветков Л.И. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1974. Т. 50. С. 180.
- Баранов Н.В., Миронов М.А., Никитин П.С., Цветков Л.И. // Кинем. и физ. небесн. тел. 1998. Т. 14. №. 1. С. 89.
- Будзиновская И.А., Миронов М.А., Цветков Л.И. // Кинем. и физ. небесн. тел. 2000. Т. 16. №. 5. С. 418.
- Будзиновская И.А., Цветков Л.И. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2002. Т. 98. С. 78.
- Гельфрейх Г.Б. // Докт. диссертация. 1974. Ленинград.
- Железняков В.В. // Радиоизлучение Солнца и планет. М.: Наука. 1964.
- Котоку и др. (J. Kotoku, R. Kano, S. Tsuneta et al.) // Publ. Astron. Soc. Japan. 2007. V. 59. P. 735.
- Ниндос и др. (A. Nindos, M.R. Kundu, S.M. White et al.) // Astrophys. J. 1999. V. 527. P. 415.
- Похелайнен (S. Pohjolainen) // Astron. Astrophys. 2000. V. 361. P. 349.
- Нойс Роберт // На переднем крае астрофизики. М.: МИР. 1979.
- Самисько С.А., Цветков Л.И. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2008. Т. 104. №. 1. С. 83.
- Цап и др. (Tsap Y.T., Kopylova Y.G., Stepanov A.V. et al.) // Solar Phys. 2008. (in press).